

## بررسی ویژگی‌های دگرسانی در محدوده آبترش-یوزباشی چای و تحلیل رفتار ژئوشیمیایی عناصر (اصلی و کمیاب) در محیط دگرسانی

ناهید اسدی<sup>۱</sup>، محمد هاشم امامی<sup>۱\*</sup> و منیره خیرخواه<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اسلامشهر، اسلامشهر، ایران

### چکیده

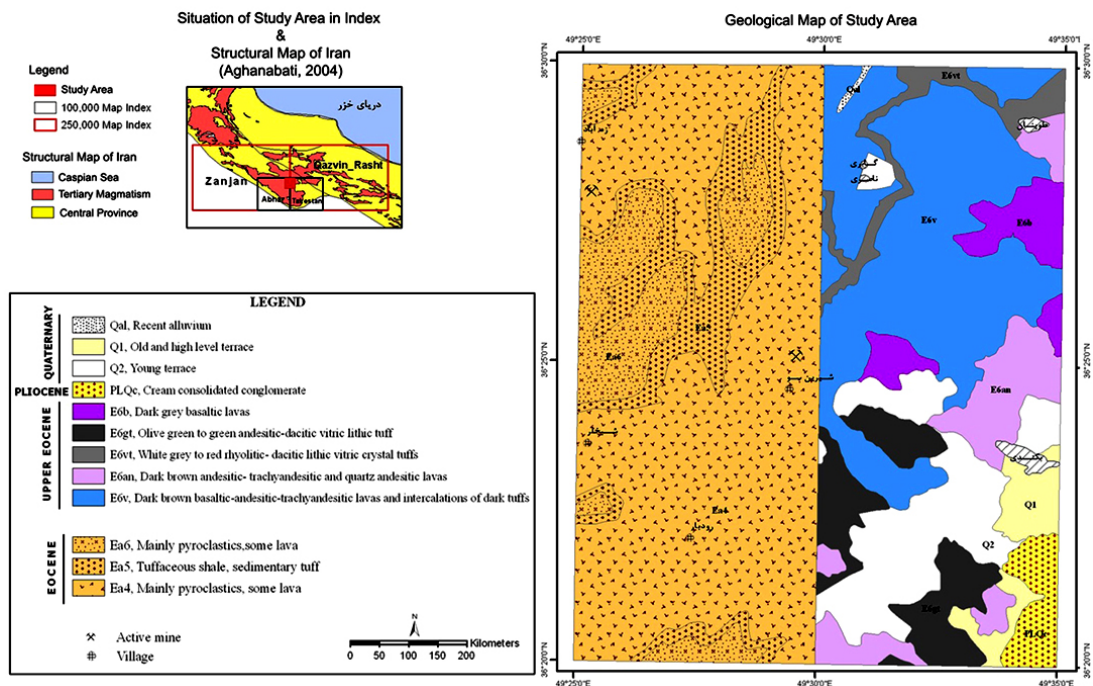
پهنه دگرسانی آبترش-یوزباشی چای واقع در زون طارم نمونه بارزی از دگرسانی نوع هیدروترمال است که در توفها و گدازه‌های تراکی آندزیتی اتوسن به وجود آمده است. بررسی‌های صحرایی، کانی‌شناسی، ژئوشیمیایی و تصاویر ماهواره‌ای مؤید وجود بخش‌های آرژیلی، آرژیلی پیشرفته، آلونیتی و سیلیسی در نواحی دگرسان شده است که این بخش‌ها از پایین به بالا زون‌بندی منظمی را ایجاد کرده‌اند. این زون‌بندی و همچنین شواهدی چون تبعیت دگرسانی از سیستم درز و شکست و به جا ماندن بخش‌هایی از سنگ میزبان سالم در بدنه زون‌های دگرسانی، هیدروترمال بودن دگرسانی را تأیید می‌کنند. با توجه به حضور گسترده کانی‌هایی چون کائولینیت، آلونیت، ژاروسیت و سیلیس در مجموعه کانی‌شناسی زون‌های دگرسانی و نیز با توجه به روند تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر (اصلی و کمیاب) طی مراحل مختلف دگرسانی به نظر می‌رسد این محدوده تحت تأثیر دگرسانی تیپ اسید-سولفات (High Sulfidation) قرار گرفته است. در منطقه مورد مطالعه، با بررسی نمودارها و واکنش‌های دگرسانی تبعیت تهی‌شدگی یا غنی‌شدگی یک عنصر طی مراحل دگرسانی از ماهیت ژئوشیمیایی آن عنصر، میزان فراوانی آن در سنگ مادر، نوع کانی‌های دگرسانی ایجاد شده در هر مرحله و ساختار آن‌ها و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی محلول دگرسانی تأیید می‌شود.

واژه‌های کلیدی: آبترش، آلونیت، دگرسانی اسید-سولفات، کائولینیت، هیدروترمال، یوزباشی چای

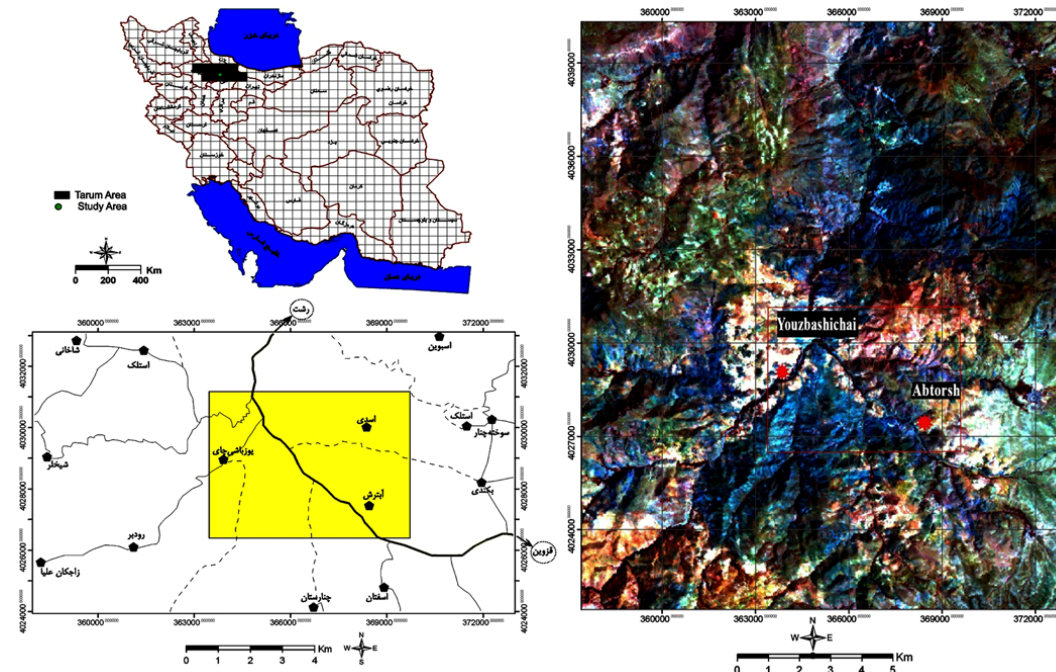
### مقدمه

(برگه‌های ۱:۱۰۰،۰۰۰ تاکستان و ابهر (در دست تهیه) را شامل می‌شود. در تقسیم‌بندی ساختاری آقناباتی (۱۳۸۳) این محدوده متعلق به پهنه مرکزی بخش گندوانایی (تجمعات ماگمایی ترشیری) است (شکل ۱). مهمترین راه دسترسی به منطقه جاده آسفالت قزوین-رشت است (شکل ۲).

محدوده مورد مطالعه واقع در زون دگرسانی طارم در محدوده جغرافیایی "۳۰'۲۲'۳۶" تا "۱۵'۲۵'۳۶" عرض شمالی و "۳۰'۲۸'۴۹" تا "۴۵'۳۲'۴۹" طول شرقی قرار گرفته است. این منطقه بخشی از چهارگوش ۱:۲۵۰،۰۰۰ قزوین-رشت و زنجان



شکل ۱- موقعیت محدوده مورد مطالعه و نقشه زمین‌شناسی منطقه



شکل ۲- موقعیت منطقه در محدوده طارم، راه‌های دسترسی و موقعیت مقاطع دگرسانی انتخاب شده بر روی تصویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup>

آذرآواری ائوسن است. ویژگی بارز این منطقه حضور پهنه‌های گسترده دگرسانی است. این پهنه‌های دگرسانی را در مناطق آب‌ترش، اسدی و یوزباشی‌چای می‌توان مشاهده نمود. زون‌های دگرسانی به‌طور کلی از

پیروان (۱۳۸۱) و آسیابانها (۱۳۸۰) در رساله دکتری و احمدیان (۱۳۷۰) در رساله کارشناسی ارشد خود مطالعات جامعی در این منطقه داشته‌اند. واحدهای سنگی سازنده منطقه شامل گدازه‌ها و واحدهای

آواری بسیار جالب با ساخت منشوری را ساخته‌اند. ستبرای این واحد حدود ۷۰۰ متر است و بافت پورفیری، پورفیری آمیگدوئیدال و اینترگرانولار دارد. اطراف روستاهای اسفتان، اسدی و چنارستان در امتداد جاده قزوین-رشت واحدهای آذرآواری شامل توف شیشه‌ای لیتیک‌دار تا بلورین داسیتی-آندزیتی به رنگ سبز تا سبز زیتونی با میان‌لایه‌هایی از گدازه‌های تراکی‌آندزیتی رخنمون یافته است. ستبرای این واحد بین ۱۰۰ تا ۴۰۰ متر متغیر است. این واحد توسط واحد آندزیتی پوشیده می‌شود.

### روش انجام پژوهش

با توجه به مشاهدات صحرایی در زون‌های دگرسانی منطقه بخش‌های آرژیلی، آلونیتی-ژاروسیتی و کلاک سیلیسی دیده می‌شود. گاهی دگرسانی پروپیلیتی نیز همراه این بخش‌ها وجود دارد. به منظور مطالعه زون‌های دگرسانی عملیات نمونه‌برداری در دو مقطع جداگانه و به دو روش انجام شده است: مقطع اول در زون دگرسانی آب‌ترش (در ابتدای جاده کوهین-لوشان) انتخاب شده است. در این مقطع که توالی منظمی از بخش‌های دگرسانی را نشان می‌دهد از سنگ میزبان سالم، بخش‌های با دگرسانی حدواسط و بخش‌های آرژیلی، آلونیتی-ژاروسیتی و سیلیسی به‌طور سیستماتیک نمونه‌برداری شده است. مقطع دوم دگرسانی در زون یوزباشی‌چای انتخاب شده است. در این مقطع در اغلب موارد عملکرد گسل‌ها و فعالیت‌های تکتونیکی توالی بخش‌های دگرسانی را به هم ریخته است و بخش‌های مختلف دگرسانی به‌صورت نامنظم و در هم ریخته هستند. نمونه‌های مورد مطالعه در این مقطع شامل نمونه سنگ میزبان سالم و نمونه زون دگرسان بوده است. نمونه‌برداری در این بخش به روش

بخش‌های سیلیسی، آلونیتی و آرژیلی تشکیل یافته‌اند. با توجه به بررسی‌های انجام شده در مورد زون‌های دگرسانی منطقه می‌توان چنین گفت:

سنگ میزبان دگرسانی علاوه بر توف‌های ائوسن، واحدهای آتشفشانی با ترکیب آندزیتی-تراکی آندزیتی و سن ائوسن میانی تا بالایی هستند که تشکیل آن‌ها مربوط به پس از رسوب‌گذاری توف‌های زیردریایی ائوسن بوده است و به‌نظر می‌رسد پس از پسروری دریای ائوسن در محیط خشکی-نیمه خشکی تشکیل شده باشند. همچنین توده نفوذی زاجکان پایین با ترکیب گرانودیوریت در نزدیکی زون‌های دگرسانی منطقه و در جنوب غرب محدوده مورد مطالعه برونزد دارد. از پایین به بالا زون‌بندی منظمی شامل بخش‌های آرژیلی، آرژیلی پیشرفته، آلونیتی و سیلیسی در نواحی دگرسان شده دیده می‌شود. در بدنه این واحدهای دگرسانی لکه‌هایی از سنگ مادر با ترکیب آندزیتی-تراکی آندزیتی به‌طور پراکنده به جا مانده است. مجموعه کانی‌شناسی این زون‌های دگرسانی فاقد کانی‌های دیاسپور و بوهمیت (شاخص خاستگاه رسوبی برای دگرسانی) است. و روند دگرسانی‌ها از سیستم درز و شکستگی و گسله‌های منطقه پیروی می‌کند. با توجه به این ویژگی‌ها گرمایی بودن دگرسانی را در این مناطق می‌توان نتیجه‌گیری کرد (اسدی، ۱۳۸۵).

### زمین‌شناسی عمومی

واحدهای سنگی برونزد یافته در محدوده مورد مطالعه شامل گدازه‌ها و واحدهای آذرآواری ائوسن است. گسترده‌ترین واحد سنگی مربوط به گدازه‌های الیوین‌بازالتی، تراکی‌بازالتی، آندزیت بازالتی، تراکی‌آندزیتی و آندزیت کوارتزار با میان‌لایه‌های توف به رنگ تیره و تیره متمایل به قهوه‌ای است که در امتداد جاده کوهین-لوشان تجمع‌های گدازه‌ای-آذر

نمونه‌های پودر) در سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور آنالیز شده‌اند.

همچنین به منظور تشخیص و رده‌بندی دگرسانی‌ها از تصاویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> و Aster استفاده شده است. در شکل ۳ موقعیت محدوده مورد مطالعه در منطقه طارم، راه‌های دسترسی و موقعیت مقاطع دگرسانی انتخاب شده بر روی تصویر ماهواره‌ای ETM<sup>+</sup> مشخص شده است.

Chip (لب پری) با فواصل منظم یک متری انجام شده است. شکل ۳ نمایی از واحدهای دگرسانی در منطقه یوزباشی‌چای را نشان می‌دهد.

نمونه‌های برداشت شده که شامل سه بخش سنگ میزبان سالم، سنگ نیمه‌دگرسان و بخش‌های کاملاً دگرسان (نمونه‌های پودر) بوده‌اند، به روش XRF(S4) (برای تعیین عناصر اصلی)، ICP-MS (برای تعیین عناصر کمیاب) و XRD (برای بررسی کانی‌شناسی



شکل ۳- نمونه‌ای از توالی واحدهای دگرسانی در مقطع یوزباشی‌چای

نشان می‌دهد که موقعیت نمونه‌های دگرسان و سنگ میزبان سالم در آن نشان داده شده است (شایان ذکر است که منظور از سنگ میزبان سالم در این نوشتار نمونه سنگ با حداقل دگرسانی است).

جدول ۱- نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی (XRD) در مقاطع دگرسانی آب‌ترش و یوزباشی‌چای

ردیف	نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی	
۱	کوارتز	زون دگرسانی
۲	کوارتز + آلونیت + هماتیت + کانولینیت	آب‌ترش
۳	کانولینیت + کوارتز + هماتیت	
۴	مونت‌موریلونیت + فلدسپار + کوارتز + کانولینیت + گوتیت + ژپس	
۵	مونت‌موریلونیت + کوارتز + ژاروزیت + آنتاز	
۱	کوارتز + آلونیت + کانولینیت + پیروفیلیت + ایلیت + کلریت	زون دگرسانی یوزباشی‌چای

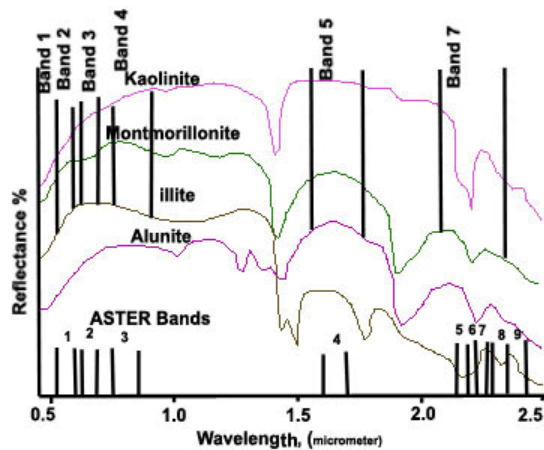
## رده‌بندی

### ۱- رده‌بندی شیمیایی

جدول ۱ نتایج بررسی‌های کانی‌شناسی در دو مقطع دگرسانی مورد مطالعه را نشان می‌دهد که به روش XRD انجام شده است. با توجه به جدول ۱ در زون دگرسانی آب‌ترش مجموعه‌های ۴ و ۵ معرف دگرسانی آرژیلی متوسط، مجموعه ۳ معرف دگرسانی آرژیلی پیشرفته، مجموعه ۲ دگرسانی آلونیتی و مجموعه ۱ معرف دگرسانی سیلیسی است. مجموعه کانی‌شناسی مشاهده شده در زون دگرسانی یوزباشی‌چای معرف دگرسانی آرژیلی پیشرفته است. شکل ۴ نمودار AKF (Burnham, 1962) را برای سنگ‌های رخساره آرژیلی

Aster با پردازش مناسب می‌توان تا حد زیادی این کانی‌ها را شناسایی کرد.

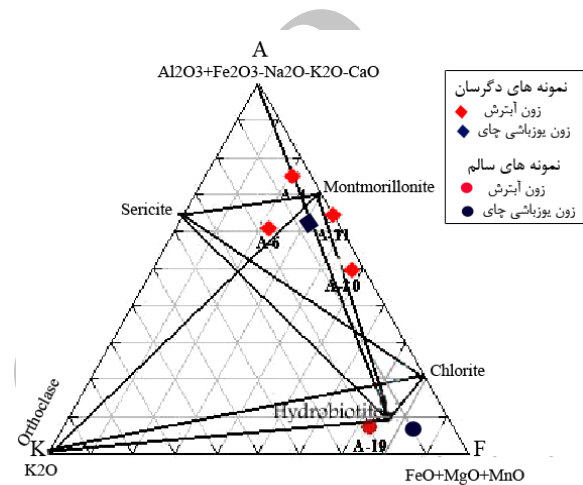
مهم‌ترین کانی‌هایی که در این تصاویر قابل شناسایی هستند، دارای OH در ساختمان خود هستند و عبارتند از: کائولینیت، دیکیت، پیروفیلیت، سریسیت، کلریت، اپیدوت، آلونیت، بیوتیت، ایلیت، ژاروسیت و نیز اکسیدهای آهن. شکل ۵ ویژگی جذب و انعکاس برخی کانی‌های مهم در تصویر Aster را نشان می‌دهد.



شکل ۵- ویژگی‌های جذب و انعکاس کانی‌های رسی در تصویر Aster

برای این که بتوانیم پدیده‌ای را بهتر مشاهده کنیم، باندی را که پدیده مورد نظر در آن بیشترین انعکاس را دارد، به رنگ قرمز اختصاص می‌دهیم. علت این امر، این است که چشم انسان قادر به تفکیک طیف‌های زیادتری از رنگ قرمز نسبت به رنگ‌های دیگر است. برای ایجاد تصویر رنگی باندهایی از تصویر انتخاب می‌شوند که کم‌ترین همبستگی را داشته باشند. ترکیب رنگی ۴،۵،۶ = RGB با کنتراست خطی، ترکیب استاندارد است که برای تشخیص دگرسانی ایلیت-سریسیت از دگرسانی آرژیلی (کائولینیت و آلونیت) مناسب است. در این تصویر باند ۴ تصویر Aster که در آن کانی‌های رسی

کانی‌های متداول رخساره آرژیلی، علاوه بر کانی‌هایی که در نمودار نشان داده شده، شامل کوارتز و آلبیت نیز هست. با توجه به این شکل در زون دگرسانی آبرش و همچنین زون یوزباشی‌چای، سنگ میزبان در محدوده سنگ‌های با کم‌ترین دگرسانی تا دگرسانی مونت‌موریلونیتی قرار گرفته است و سنگ‌های دگرسان در محدوده دگرسانی نوع کائولینیتی هستند.



شکل ۴- نمودار AKF (Burnham, 1962) برای سنگ‌های رخساره آرژیلی و موقعیت نمونه‌های دگرسان و سالم در این نمودار

## ۲- رده‌بندی بر اساس تصاویر ماهواره‌ای

با توجه به اینکه میزان انرژی جذب شده یا منعکس شده در پدیده‌های مختلف برای یک طول موج و متقابلاً برای یک پدیده در طول موج‌های گوناگون متفاوت است، با پردازش داده‌های ماهواره‌ای امکان شناسایی و بررسی حضور و یا عدم حضور کانی‌های شاخص برخی از دگرسانی‌ها میسر می‌شود. ماهواره لندست (سنجنده TM و ETM<sup>+</sup>) در محدوده طول موج ۲/۱ تا ۲/۴۵ دارای یک باند است، اما سنجنده Aster در این محدوده دارای پنج باند است. از آنجایی که تعداد قابل توجهی از کانی‌ها در این محدوده دارای طیف جذبی و انعکاسی خاص خود هستند، لذا با استفاده از اطلاعات سنجنده

## ژئوشیمی

در این بخش نمونه‌های مربوط به سنگ دگرسان را نسبت به سنگ مادر غیردگرسان از لحاظ ترکیب عناصر اصلی و کمیاب نرمالیز کرده و بدین منظور از نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی استفاده نموده‌ایم.

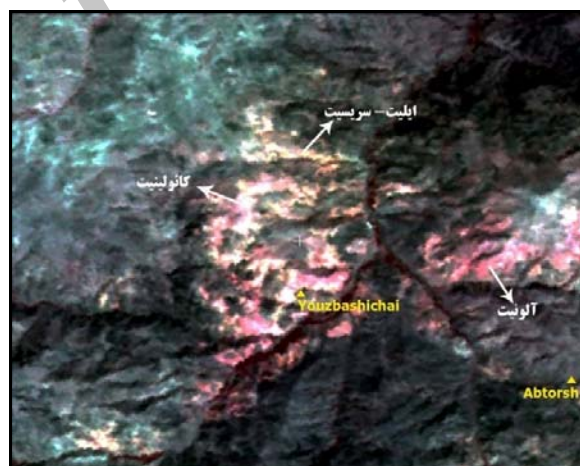
هدف از این مقایسه اولاً بررسی نحوه رفتار عناصر طی مراحل دگرسانی و ثانیاً پیش‌بینی ترکیب سیال و ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی آن بوده است. جدول‌های ۲ و ۳ مربوط به ترکیب عناصر اصلی و کمیاب در نمونه‌های دگرسان و سنگ مادر مربوطه در دو مقطع مورد مطالعه است.

در شکل‌های ۷ و ۸ عناصر اصلی و کمیاب موجود در نمونه‌های دگرسان و نیمه دگرسان مربوط به مقطع‌های ۱ و ۲ با سنگ مادر غیردگرسان آن‌ها مقایسه شده است. در نمودارهای مربوط به مقطع ۱ چنان‌که مشاهده می‌شود، میزان  $\text{SiO}_2$  در سنگ دگرسان با پیشرفت مراحل دگرسانی کاهش می‌یابد، اما در دگرسانی سیلیسی غنی‌شدگی  $\text{SiO}_2$  را شاهد هستیم.

$\text{Al}_2\text{O}_3$  و  $\text{TiO}_2$  در همه نمونه‌های دگرسان شده غنی‌شدگی دارند اما در دگرسانی سیلیسی کاملاً از سنگ شسته می‌شوند.  $\text{MgO}$ ،  $\text{CaO}$ ،  $\text{MnO}$ ،  $\text{Na}_2\text{O}$  و  $\text{K}_2\text{O}$  طی مراحل دگرسانی تهی‌شدگی یافته‌اند و در دگرسانی سیلیسی کاملاً از سنگ خارج شده‌اند.

$\text{P}_2\text{O}_5$  در دگرسانی آرژیلی پیشرفته و دگرسانی حدواسط کائولینیتی - اکسیدی غنی‌شدگی نشان می‌دهد. در نمونه مربوط به زون دگرسانی یوزباشی‌چای چنان‌که در شکل ۸ مشاهده می‌شود، همه عناصر به غیر از  $\text{SO}_3$ ،  $\text{L.O.I.}$  و  $\text{P}_2\text{O}_5$  تهی‌شدگی نسبت به سنگ مادر نشان می‌دهند.

حداکثر بازتاب را دارند (شکل ۴) در کانال قرمز قرار گرفته است. در این تصویر بخش‌هایی که دارای دگرسانی فیلک (ایلیت - سریسیت) هستند، دارای بازتاب نارنجی روشن تا سفید خواهند بود. همچنین نواحی از تصویر که بازتاب صورتی دارد، دگرسانی آرژیلی (کائولینیت - آلونیت) را نمایان می‌سازد. در این نواحی قسمت‌هایی که تن رنگی تیره‌تری دارند (صورتی تیره‌تر) احتمالاً آلونیتی هستند. چنین بازتابی به خوبی در تصویر Aster منطقه آبترش - یوزباشی‌چای مشاهده می‌شود (شکل ۶). با توجه به این تصویر آنچه در این منطقه دگرسان دیده می‌شود، عمدتاً دگرسانی نوع کائولینیت و آلونیت و به مقدار کمتر سریسیت است.



شکل ۶ - ترکیب رنگی  $\text{RGB} = ۴, ۵, ۶$  با کنتراست خطی برای تفکیک کانی‌های رسی ایلیت - سریسیت، کائولینیت و آلونیت بقایایی از سنگ آندزیتی در میان بخش‌های آرژیلی، به‌ویژه در منطقه یوزباشی‌چای به جا مانده است. بنابراین، سنگ میزبان این دگرسانی واحدهای آندزیتی بوده‌اند. این نتایج با نتایج به دست آمده از بررسی‌های ژئوشیمیایی کاملاً همخوانی دارد.

جدول ۲- نتایج آنالیز شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌های مربوط به زون‌های دگرسانی منطقه به روش XRF-S4 (مقادیر بر حسب درصد است)

محل نمونه برداری	نوع نمونه	شماره نمونه	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SrO	ZrO <sub>2</sub>	SO <sub>3</sub>
مقطع آبرش	سیلیسی	10	0.02	0.26	-	0.13	96.2	0.2		0.39				1.13
	آرژیلی پیشرفته	20	1.65	0.84	<1	13.39	48.65	0.25	0.64	0.46	14.87	0.06	0.01	6.32
	آرژیلی متوسط	11	0.11	<1	<1	21.79	56.76	0.27	0.24	0.67	11.38	0.12	0.02	0.81
	زون دگرسانی حدواسط	4	1.1	<1	1.45	16.3	57.5	0.2	0.55	0.96	3.78	0.09	0.02	1.99
		6	3.87	0.77	0.58	21.89	53.22	0.2	1.62	0.77	3.35	0.05	0.03	2.14
		14	0.326	-	0.855	9.714	36.67	0.118	13.38	0.523	5.095	-	-	20.79
		13	2.248	2.384	4.287	15.95	50.05	0.323	5.525	0.861	10.45	-	-	2.548
		12	1.654	0.297	1.608	13.242	40.72	0.212	6.926	0.547	5.444	-	-	11.933
	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	19	2.67	2.91	4.05	15.93	58.44	0.2	6.31	0.5	7.56	-	-	-
مقطع	نمونه دگرسان	1	3.37	2.42	3.59	17.01	57.02	0.23	6.15	0.67	5.9	-	-	0.38
یوزباشی‌چای	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	3	1.22	1.66	0.11	16.72	42.99	0.28	0.41	0.68	1.81	-	-	13.58

جدول ۳- نتایج آنالیز شیمیایی انجام شده بر روی نمونه‌های مربوط به زون‌های دگرسانی منطقه به روش ICP-MS (مقادیر بر حسب ppm است)

محل نمونه برداری	نوع نمونه	شماره نمونه	Be	B	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	As	Pb	Sc	V	Y	Yb	Nb
مقطع آبرش	آرژیلی پیشرفته	20	<2	133	333	<5	<10	26	42	<20	-	-	-	-	-	-
	آرژیلی متوسط	11	<2	26	314	<5	19	51	55	<20	-	-	-	-	-	-
	زون دگرسانی حدواسط	4	<2	<10	313	8	26	48	91	<20	-	-	-	-	-	-
		6	<2	<10	311	27	79	46	134	<20	-	-	-	-	-	-
		14	<2	23	322	39	70	44	124	<20	-	-	-	-	-	-
		13	<2	<10	307	29	36	107	232	<20	-	-	-	-	-	-
		12	<2	69	320	34	48	66	215	<20	-	-	-	-	-	-
	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	19	<2	-	83	25.3	48	76	94	-	-	25.8	35	2.5	-	-
مقطع	نمونه دگرسان	1	1.7	-	28.7	13.6	8	53.8	73.6	2.4	16.8	7	133	9.6	1.9	9.5
یوزباشی‌چای	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	3	0.9	-	37.5	5.3	1.7	25.7	13.6	10.6	13.3	0.5	197	9	<1	7.5

محل نمونه برداری	نوع نمونه	شماره نمونه	Sr	Mo	Ag	Cd	Sn	Sb	Ba	W	Eu	Ga	Ge	La	Li	Mn
مقطع آبرش	آرژیلی پیشرفته	20	<2	133	333	<5	<10	26	42	<20	-	-	-	-	-	-
	آرژیلی متوسط	11	<2	26	314	<5	19	51	55	<20	-	-	-	-	-	-
	زون دگرسانی حدواسط	4	<2	<10	313	8	26	48	91	<20	-	-	-	-	-	-
		6	<2	<10	311	27	79	46	134	<20	-	-	-	-	-	-
		14	542	<5	<1	<2	<10	<10	229	<10	-	-	-	-	-	-
		13	448	<5	<1	<2	<10	<10	661	<10	-	-	-	-	-	-
		12	368	<5	<1	<2	<10	<10	281	<10	-	-	-	-	-	-
	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	19	<2	-	83	25.3	48	76	94	-	-	25.8	35	2.5	-	-
مقطع	نمونه دگرسان	1	1.7	-	28.7	13.6	8	53.8	73.6	2.4	16.8	7	133	9.6	1.9	9.5
یوزباشی‌چای	نمونه سالم (تراکی اندزیت)	3	0.9	-	37.5	5.3	1.7	25.7	13.6	10.6	13.3	0.5	197	9	<1	7.5

دگرسانی‌های آرژیلی متوسط و پیشرفته تهی‌شدگی Zn دیده می‌شود. عنصر Co در مراحل دگرسانی حدواسط غنی‌شدگی نسبت به میزبان دارد، اما در مراحل پیشرفته دگرسانی تهی‌شدگی

در شکل ۷ در همه مراحل دگرسانی غنی‌شدگی عنصر Cr مشاهده می‌شود. Cu و Ni در بیشتر نمونه‌ها تهی‌شدگی دارند. در دگرسانی‌های حدواسط غنی‌شدگی عنصر Zn و در

تهی شدگی و غنی شدگی نسبی عناصر متحرک (طی دگرسانی) بر اساس موقعیت نسبی آن‌ها از خط ایزوکون مشخص می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\Delta C_i / C_i^O = (C_i^A - C_i^A) / C_i^{A*}$$

$$(C_i^{A*} = \text{غلظت عنصر مورد نظر در سنگ دگرسان بر روی خط ایزوکون است}).$$

شکل ۹ نمودار ایزوکون رسم شده برای نمونه کائولینیتی - شماره ۴ مقطع آبترش در برابر سنگ مادر غیر دگرسان این مقطع (نمونه شماره ۱۹) را نشان می‌دهد.

با توجه به جدول ۲ و مقایسه مقادیر عناصر در سنگ سالم و دگرسان و نیز با توجه به نمودار شکل ۷ سازنده  $Al_2O_3$  در این سنگ به عنوان سازنده غیر متحرک (عنصر با کمترین تحرک) در نظر گرفته شده و خط ایزوکون رسم شده است. عناصری که بالای خط ایزوکون قرار گرفته‌اند، در سنگ دگرسان نسبت به سنگ اولیه غنی شدگی دارند و عناصری که زیر خط ایزوکون هستند تهی شدگی داشته‌اند. درصد تهی شدگی و غنی شدگی عناصر در جدول ۴ محاسبه شده است.

شکل ۱۰ نمودار ایزوکون مربوط به مقطع یوزباشی‌چای است و در جدول ۵ درصد تهی شدگی و غنی شدگی عناصر محاسبه شده است.

این عنصر را شاهد هستیم. Sr در تمام نمونه‌ها و Ba در بعضی نمونه‌ها غنی شدگی دارند. عناصر Sn و W همواره تهی شدگی نشان می‌دهند، اما عنصر Mo در تمام نمونه‌ها غنی شدگی دارد.

در مورد زون یوزباشی‌چای، همان‌گونه که در شکل ۸ نشان داده شده است، در نمونه دگرسان همه عناصر حتی Yb (که از عناصر HREE است) از سنگ خارج شده‌اند و آنچه باقی مانده، تنها Sn، Cr و V است. غنی شدگی As در همه نمونه‌ها دیده می‌شود.

همچنین یک روش مفید برای نمایش تهی شدگی و غنی شدگی عناصر استفاده از نمودارهای ایزوکون Grant (۱۹۸۶) است. در این نمودارها غلظت عناصر در سنگ دگرسان در برابر غلظت آن‌ها در سنگ مادر (غیر دگرسان) نمایش داده می‌شود. ایزوکون خطی است که نقاط با غلظت ژئوشیمیایی مشابهی قبل و پس از دگرسانی (سازنده‌های غیرمتحرک) را به هم وصل می‌کند و در واقع، بهترین خطی است که از این نقاط می‌گذرد. معادله این خط عبارت است از:

$$C_i^A = (M_O/M_A) (C_i^O + \Delta C_i)$$

$$(M_O/M_A) = C_i^O / \Delta C_i$$

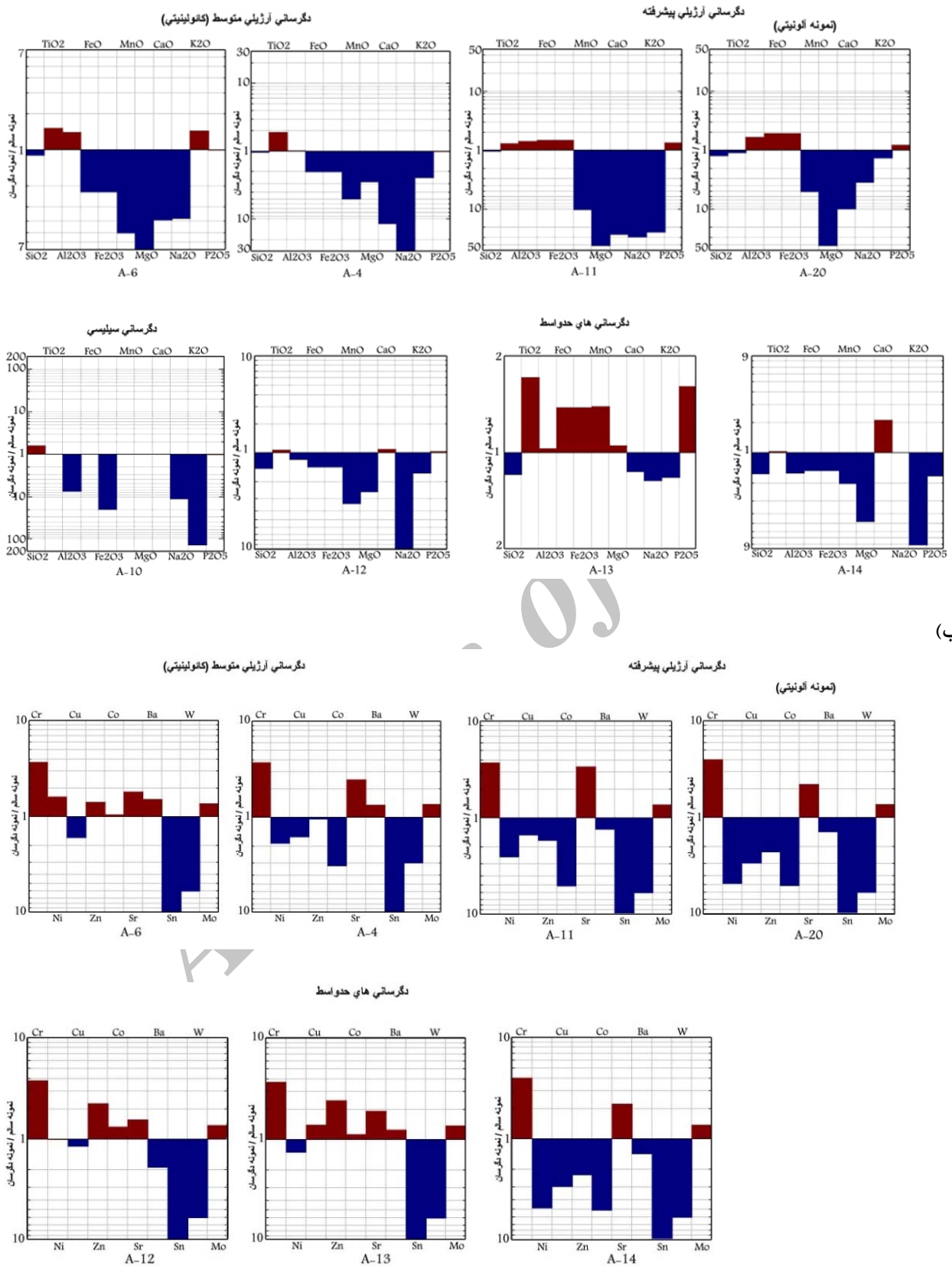
$$C = \text{غلظت؛ } i = \text{سازنده (عنصر) مورد نظر؛ } M = \text{جرم؛ } A = \text{سنگ دگرسان؛ } O = \text{سنگ مادر (غیر دگرسان)؛ برای سازنده‌های غیرمتحرک } (\Delta C_i = 0).$$

$$C^A = (M_O/M_A) C_i^O$$

$$C^A = (C_i^A + \Delta C_i) C^O$$

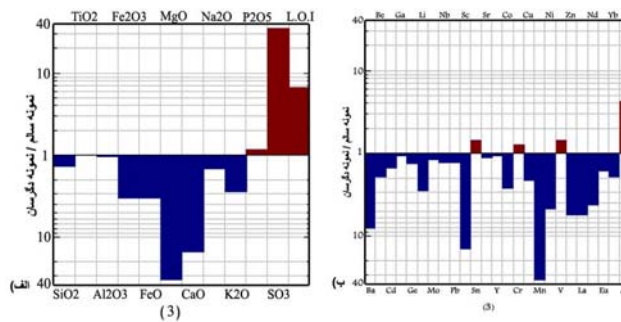
(الف)





(ب)

شکل ۷- نمودارهای الف) تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر اصلی، ب) کمیاب، مربوط به نمونه‌های دگرسان و نیمه‌دگرسان برش ۱ (آبرش)



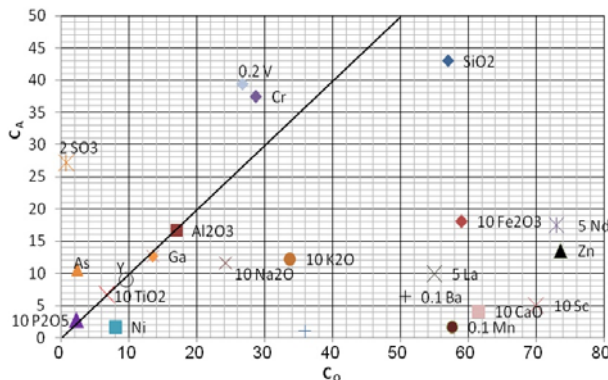
شکل ۸- نمودارهای: تهی‌شدگی و غنی‌شدگی: الف) عناصر اصلی، ب) عناصر کمیاب، مربوط به نمونه‌های دگرسان و نیمه‌دگرسان برش ۲ (یوزباشی‌چای)

جدول ۵- تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در نمونه دگرسان مقطع یوزباشی‌چای

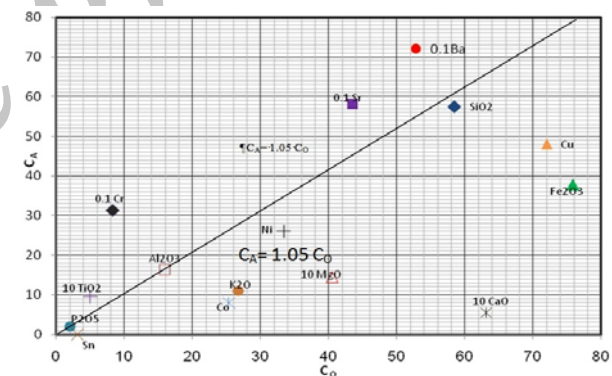
سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$	سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$	سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$	سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$
SiO <sub>2</sub>	-0.24	K <sub>2</sub> O	-0.92	Cr	0.33	Sc	-0.92
MgO	-0.96	CaO	-0.93	V	0.51	Nd	-0.75
Na <sub>2</sub> O	-0.9	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.69	Ni	-0.78	Zn	-0.81
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		Ba	-0.86	As	3.24		
SO <sub>3</sub>	26.16	La	-0.8	Mn	-0.97		

جدول ۴- تهی‌شدگی و غنی‌شدگی عناصر در نمونه کائولینیتی (شماره ۴) مقطع آبرش

سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$	سازنده	$\Delta C_i / C_i^0$
SiO <sub>2</sub>	-0.07	Ni	-0.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-0.46	Sr	+2.6
MgO	-0.67	Cr	+2.5
CaO	-0.91	Co	-0.70
K <sub>2</sub> O	-0.6	Cu	-0.94
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0	Ba	+0.31
TiO <sub>2</sub>	+0.9		



شکل ۱۰- نمودار ایزوکون Grant (۱۹۸۶) برای دگرسان مقطع یوزباشی‌چای در برابر سنگ مادر غیر دگرسان این مقطع



شکل ۹- نمودار ایزوکون Grant (۱۹۸۶) برای نمونه کائولینیتی- شماره ۴ مقطع آبرش در برابر سنگ مادر غیر دگرسان این مقطع

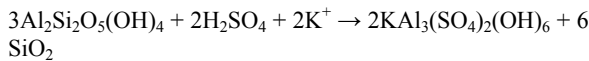
محلول از سنگ خارج شده یا به آن وارد شده‌اند، مشخص نمود. همچنین، با مطالعه شرایط دما و فشار انجام هر واکنش می‌توان شرایط فیزیکی‌شیمیایی سیالات گرمایی را حدس زد. در جدول ۶ ترکیب کانی‌شناسی سنگ مادر، سنگ‌های با دگرسانی حدواسط و نمونه‌های دگرسان و همچنین نوع دگرسانی در زون‌های دگرسانی آبرش و یوزباشی‌چای نشان داده شده است.

### بحث

واکنش‌های دگرسانی: در نمودارهای شکل ۷ و ۸ مشاهده کردیم که دگرسانی باعث افزایش بعضی عناصر در سنگ و کاهش بعضی دیگر شده است. مطالعه واکنش‌های دگرسانی و بررسی رفتار عناصر طی این واکنش‌ها می‌تواند راهنمای مناسبی در توجیه غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر باشد. به عبارت دیگر، با توجه به این واکنش‌ها می‌توان عناصری را که توسط



منجر خواهد شد (Heald *et al*, 1987):



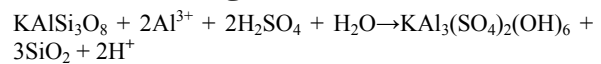
(آلونیت) → (کائولینیت)

به عقیده Hemley و همکاران (۱۹۶۹) برای تشکیل آلونیت از کائولینیت حجم زیادی  $\text{H}_2\text{SO}_4$  مورد نیاز است. تخریب پیریت در شرایط اکسیدان و آزاد شدن یون آهن باعث بالا رفتن غلظت آهن در محلول می‌شود. در این حالت  $\text{Fe}^{3+}$  جانشین  $\text{K}^+$  شده و به جای آلونیت، ژاروسیت تشکیل می‌شود.

۵- سیلیسی شدن: محلول‌های گرمایی، ماگمایی و دگرگونی غنی از سیلیس در شرایط مناسب سیلیسی خود را به جا می‌گذارند. عوامل مهم در ته‌نشینی سیلیس عبارت از کاهش فشار، حرارت و pH محلول است. همچنین بالا رفتن مقدار سیلیس در سنگ ممکن است نتیجه انحلال دیگر مواد سنگ باشد.

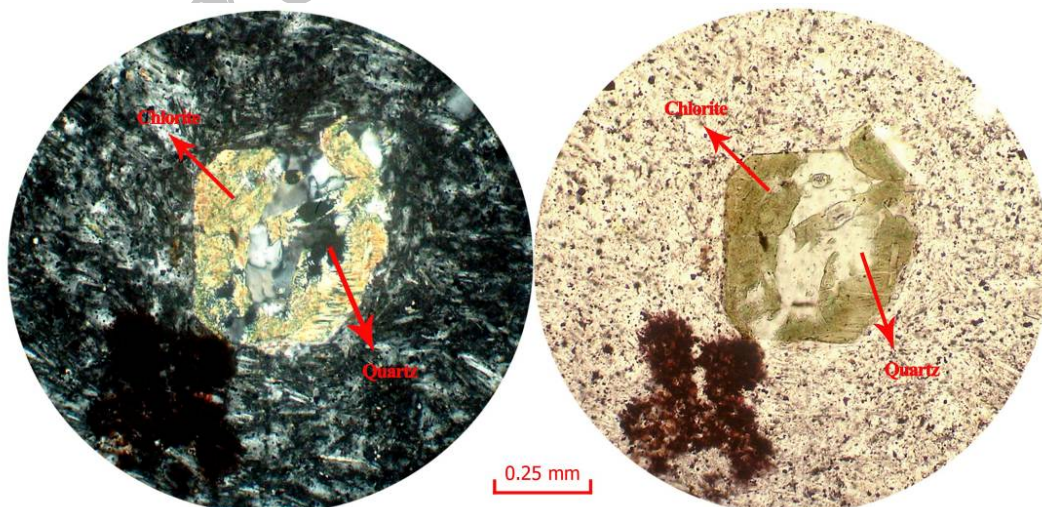
در واقع، اگر طی دگرسانی آرژیلی پیشرفته شرایط فیزیکوشیمیایی، به‌ویژه pH محیط به گونه‌ای باشد که علاوه بر کاتیون‌های قلیایی Al نیز متحرک و از محیط خارج شود، دگرسانی آرژیلی پیشرفته به دگرسانی سیلیسی ختم خواهد شد (Beane and Titley, 1981).

درجه سانتی‌گراد است. این کانی معمولاً شاخص دگرسانی آرژیلی پیشرفته است و شرایط بسیار اسیدی و اکتیویته بالای سولفات را نشان می‌دهد، اما آلونیت با مسکوویت و کائولینیت نیز مرز مشترک دارد و لذا در زون آرژیلی و سریسیتی نیز ممکن است یافت شود. کاهش حرارت محدوده پایداری آلونیت را افزایش می‌دهد. این دگرسانی هنگامی توسعه می‌یابد که شرایط محیط، به‌ویژه pH برای تحرک Al چندان مناسب نباشد. همراه با آلونیت، کانی‌های سولفوری نظیر پیریت و انارژیت تشکیل می‌شود که در آن‌ها نسبت گوگرد به کل فلز بالاست. با توجه به این‌که در زون آلونیتی سیستم مربوطه اشباع از سیلیس است، معمولاً همراه با آلونیت سیلیس کریپتوکریستالین وجود دارد. شکل ۱۲ نمای میکروسکوپی سنگ آلونیتی منطقه را نشان می‌دهد که در آن همراهی کوارتز با آلونیت دیده می‌شود. تحت شرایط شدیداً اسیدی فلدسپات پتاسیم طبق رابطه زیر به آلونیت تبدیل می‌شود:

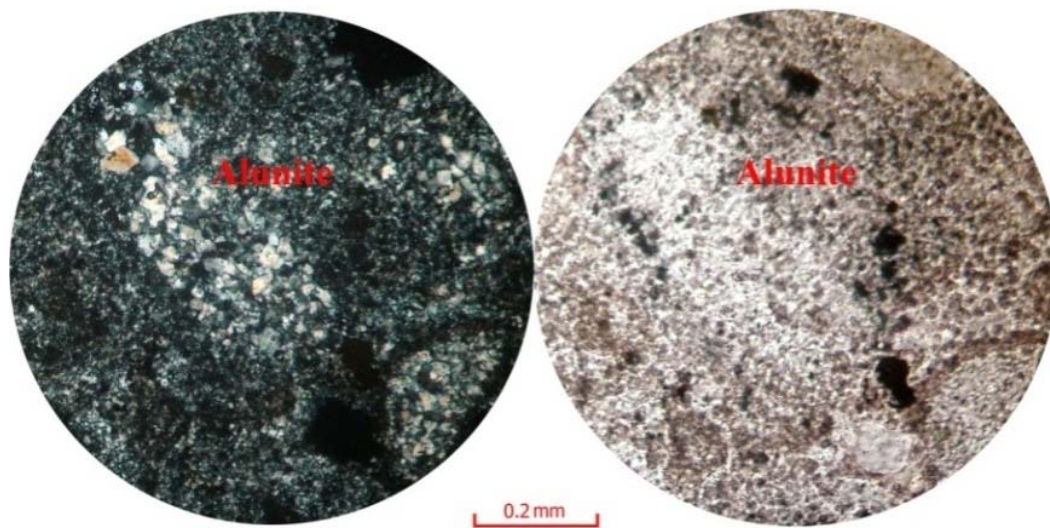


(آلونیت) → (فلدسپات پتاسیم)

کائولینیتی شدن شیشه ولکانیکی و سپس متلاشی شدن آن توسط اسیدسولفوریک نیز به تولید آلونیت



شکل ۱۱- تبدیل بلور کلینوپیروکسن به مجموعه کلریت + کوارتز



شکل ۱۲- نمای میکروسکوپی سنگ آلونیتی منطقه، همراهی کوارتز با آلونیت در این نمونه دیده

آناز (TiO<sub>2</sub>) است. در دگرسانی سیلیسی TiO<sub>2</sub> به طور کامل از سنگ شسته شده است.

عنصر Al جزء عناصر کم تحرک است که پس از شسته شدن کاتیون‌های قلیایی در سنگ باقی می‌ماند (تثبیت می‌شود) و لذا در نمونه‌های آرژیلی متوسط و پیشرفته غنی‌شدگی Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> وجود دارد. Al<sup>3+</sup> در ساختمان کانی‌هایی چون کائولینیت و آلونیت وارد می‌شود. در زون سیلیسی حضور محلول شدیداً اسیدی باعث تحرک Al و خروج آن از محیط شده است.

دگرسانی اکسیدی و تشکیل کانی‌های اکسید آهن مانند هماتیت باعث افزایش میزان Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> در بعضی نمونه‌های دگرسان شده است. در بعضی موارد نیز کاهش Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> دیده می‌شود. آهن موجود در کانی‌های مافیک طی دگرسانی شسته می‌شود. این آهن در جای دیگر ممکن است رسوب کند و وارد ساختمان کانی‌های آهن دار دگرسانی شود. بخشی نیز ممکن است به صورت سولفید آهن (پیریت) رسوب کند. به‌طور کلی، تغییرات FeO و Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> روند افزایش یا کاهش منظمی را نشان نمی‌دهد. Mn<sup>2+</sup>، Mg<sup>2+</sup> و Ca<sup>2+</sup> که در ساختمان کانی‌های مافیک سنگ حضور دارند، جزء عناصر

### تحلیل رفتار ژئوشیمیایی عناصر اصلی و کمیاب در سیستم هیدروترمال

۱- عناصر اصلی: با توجه به واکنش‌های ذکر شده در مورد تهی‌شدگی‌ها و غنی‌شدگی‌های مشاهده شده در شکل‌های ۵ و ۶ می‌توان چنین گفت:

کاهش SiO<sub>2</sub> در سنگ‌های با دگرسانی حدواسط و نمونه‌های آرژیلی متوسط و پیشرفته نتیجه تجزیه کانی‌های پلاژیوکلاز، الیون و پیروکسن سنگ طی واکنش‌هایی چون واکنش‌های تشکیل کلریت و مونت‌موریلونیت است. این واکنش‌ها همراه با آزاد شدن SiO<sub>2</sub> هستند. بخشی از سیلیس آزاد شده ممکن است توسط محلول حمل شده و از محیط خارج شود. در دگرسانی سیلیسی میزان SiO<sub>2</sub> نسبت به سنگ اولیه افزایش یافته است. افزایش سیلیس نتیجه تثبیت SiO<sub>2</sub> پس از شسته شدن کامل کاتیون‌های قلیایی و Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> است. همچنین - چنانکه قبلاً اشاره شد - بخشی از SiO<sub>2</sub> نتیجه متاسوماتیسم سیلیس توسط محلول‌های غنی از SiO<sub>2</sub> است. غنی‌شدگی TiO<sub>2</sub> در نمونه‌های حدواسط و آرژیلی نتیجه دگرسانی‌های اکسیدی و تشکیل اکسیدهای Fe، Ti و کانی‌هایی چون

به زون دگرسانی یوزباشی جای همه عناصر اصلی طی دگرسانی‌های مختلف کائولینیتی، آلونیتی، سیلیسی و غیره از سنگ شسته شده‌اند و تهی‌شدگی دارند. در این نمونه تنها L.O.I،  $SO_3$  و  $P_2O_5$  غنی‌شدگی دارند و این بالا بودن مواد فرار در محلول را نشان می‌دهد. بالا بودن  $SO_3$ ، طبیعت سولفور محلول هیدروترمال را بازگو می‌کند. این سولفور تبدیل به سولفات شده و لذا محلول خاصیت اسیدی یافته و کانی‌هایی چون آلونیت، کائولینیت و سیلیس را به‌وجود آورده است.

**۲- عناصر کمیاب:** در تمام نمونه‌های دگرسان شاهد غنی‌شدگی Cr هستیم که البته این غنی‌شدگی صرفاً بدین معناست که Cr موجود در سنگ میزبان (که عمدتاً در ساختمان کلینوپیروکسن حضور داشته است) در مراحل مختلف دگرسانی حتی در حضور محلول‌های اسیدی قوی و با وجود خروج سایر عناصر، از سنگ خارج نشده است، به عبارت دیگر، محلول‌های اسیدی و سولفات‌ها عامل این دگرسانی‌ها قادر به جابه‌جایی کروم نبوده‌اند. همچنین غنی‌شدگی Cr ممکن است با فراوانی اولیه آن در سنگ میزبان نیز در ارتباط باشد (اسدی، ۱۳۸۵).  $Ni^{2+}$  از لحاظ بار و شعاع یونی شبیه  $Mg^{2+}$  و  $Fe^{2+}$  است و در سنگ میزبان در ساختمان کانی‌های مافیک حضور داشته است. شستشوی اسیدی سبب خروج Ni از سنگ می‌شود و لذا در اکثر نمونه‌ها تهی‌شدگی Ni را مشاهده می‌کنیم. از طرفی  $Ni^{2+}$  می‌تواند جانشین  $Mg^{2+}$  و  $Fe^{2+}$  در ساختمان کلریت یا مونت‌موریلونیت شده و در سنگ تثبیت شود. بنابراین، نمونه آرژیلی حاوی مونت‌موریلونیت و نمونه حدواسط کلریتی - سرپانتینی غنی‌شدگی از Ni نشان می‌دهند. همچنین، در این نمونه‌ها MgO تهی‌شدگی دارد. این تهی‌شدگی ممکن است تأییدی بر این جانشینی باشد. نمونه‌های دگرسان تهی‌شدگی از مس را نشان می‌دهند. با توجه به این‌که در منطقه آثاری از کانی‌زایی مس نیز

متحرک در محیط‌های هیدروترمال هستند. در مراحل اولیه دگرسانی این عناصر از ساختمان کانی‌های مافیک آزاد شده، وارد ساختمان کانی‌هایی چون کلریت، سرپانتین، مونت‌موریلونیت و غیره می‌شوند. با پیشرفت دگرسانی تهی‌شدگی این عناصر بیشتر می‌شود. در دگرسانی سیلیسی این عناصر به طور کامل از سنگ خارج شده‌اند.

در سنگ مادر غیر دگرسان  $Na^+$  در ساختمان پلاژیوکلاز و فلدسپارهای موجود در خمیره اسیدی سنگ حضور دارد. تحرک زیاد این عنصر باعث خروج سریع آن از سنگ توسط محلول‌های هیدروترمال می‌شود و به‌طوری‌که در شکل مشاهده می‌شود، از دگرسانی‌های حدواسط به سمت دگرسانی آرژیلی و سیلیسی تهی‌شدگی آن شدت می‌یابد. در نمونه آلونیتی نسبت به سایر نمونه‌های دگرسان تهی‌شدگی کمتری از  $Na_2O$  مشاهده می‌شود که احتمالاً نتیجه حضور  $Na^+$  در ساختمان آلونیت است. عمده  $K_2O$  موجود در سنگ احتمالاً در خمیره اسیدی سنگ حضور داشته است.  $K_2O$  نیز طی دگرسانی به علت تحرک زیاد عنصر پتاسیم توسط محلول‌های هیدروترمال از محیط خارج می‌شود و در همه مراحل دگرسانی تهی‌شدگی  $K_2O$  را شاهد هستیم. طی دگرسانی پتاسیم آزاد شده در ساختار کانی‌هایی چون سرپسیت و آلونیت وارد می‌شود و لذا در نمونه‌هایی که این دگرسانی‌ها را دارند، تهی‌شدگی  $K_2O$  کمتر است. در یک نمونه نیز غنی‌شدگی  $K_2O$  وجود دارد که می‌تواند نتیجه متاسوماتیسم پتاسیک باشد. در دگرسانی آرژیلی پیشرفته و نمونه با دگرسانی کائولینیتی - اکسیدی،  $P_2O_5$  غنی‌شدگی نشان می‌دهد. بالا بودن  $P_2O_5$  حاکی از بالا بودن میزان مواد فرار در محلول هیدروترمال است. از طرفی، فراوانی  $SO_3$  و  $P_2O_5$  به حضور ژاروسیت در محیط نیز بستگی دارد. در شکل ۷ در نمونه مربوط

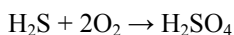
قوی است که تمام عناصر حتی Yb (که از عناصر HREE است) را از سنگ خارج کرده است. آنچه در سنگ باقی مانده تنها Sn، Cr و V است و این نشان‌دهنده تحرک فوق‌العاده کم این عناصر در حضور این محلول است. در تمام نمونه‌ها غنی‌شدگی As دیده می‌شود و به نظر می‌رسد محلول هیدروترمال محتوای آرسنیک بالایی داشته است. وجود آرسنیک در سیال می‌تواند به انتقال یون‌های فلزی کمک کند.

### ۳- تحلیل ویژگی‌های سیال گرمابی: با توجه به

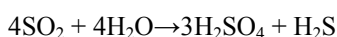
بررسی‌های کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی انجام شده و با در نظر گرفتن شرایط فیزیکی و شیمیایی واکنش‌های دگرسانی که در قسمت قبل به آن‌ها اشاره شد، وجود محلول هیدروترمال حرارت پایین با اسیدیته بالا و غنی از گوگرد را می‌توان استنباط نمود. تأثیر این محلول بر روی سنگ میزبان باعث شستشوی کامل عناصر مافیک و کاتیون‌های قلیایی از سنگ شده است. حضور گسترده کانی‌های سولفیدی نظیر آلونیت و ژاروزیت نشانه غنی بودن این محلول از گوگرد است. دگرسانی اسید-سولفات در فعالیت بالای اکسیژن و گوگرد و pH کمتر از ۳ دیده می‌شود. این مسأله در شکل ۱۳ نشان داده شده است (محدوده هاشور خورده). فوگاسیته بالای گوگرد با وجود کانی‌هایی چون آلونیت، پیریت، گالن، انارژیت و کولیت مشخص می‌شود. در مورد زون دگرسانی یوزباشی‌چای و آب‌ترش با توجه به فراوانی کانی‌های اسید-سولفات نظیر کائولینیت، آلونیت و سیلیس و فقدان آدولاریا و با توجه به آنچه در مورد شرایط تشکیل این کانی‌ها گفته شد، تیپ دگرسانی هیدروترمال از نوع اسید-سولفات (High Sulfidation) است. وجود آلونیت فوگاسیته بالای سولفور را در محلول عامل دگرسانی نشان می‌دهد و فوگاسیته بالای سولفور نزدیکی زمانی و مکانی رسوبات اسید-سولفات با منبع ماگمایی را می‌تواند منعکس سازد. در رابطه با منشأ

دیده می‌شود. این تهی‌شدگی می‌تواند نشان‌دهنده این باشد که منشأ این کانی‌زایی‌ها احتمالاً از واحدهای آندزیتی منطقه بوده است. به عبارت دیگر Cu شسته شده از سنگ توسط محلول حمل شده و کانی‌های مس در شرایط مناسب در جای دیگر از محلول رسوب کرده‌اند. در دگرسانی حدواسط غنی‌شدگی از Zn وجود دارد و در دگرسانی‌های آرژیلی متوسط و پیشرفته تهی‌شدگی Zn دیده می‌شود. ترکیب محلول به‌ویژه خاصیت سولفور آن در مراحل دگرسانی پیشرفته نقش مهمی در این تهی‌شدگی ایفا می‌نماید. وجود کمپلکس‌های سولفوری عامل مهمی در انتقال این عنصر است. در نمونه‌های آرژیلی حدواسط غنی‌شدگی و در نمونه‌های آرژیلی متوسط و پیشرفته تهی‌شدگی از کبالت وجود دارد. بخش اعظم کبالت در سنگ میزبان در ساختمان کانی‌های Mg دار مانند الیون و پیروکسن است که با تجزیه و دگرسانی این کانی‌ها، این عنصر نیز از سنگ خارج می‌شود. در نمونه‌های حدواسط  $CO_2^+$  احتمالاً وارد ساختمان کانی‌های کلریت و سرپانتین شده است. علی‌رغم تحرک بالای Sr در تمام نمونه‌ها غنی‌شدگی این عنصر دیده می‌شود.  $Sr^{2+}$  در کانی‌های دگرسانی جانشین  $K^+$  و  $Ca^{2+}$  شده و در شبکه کانی‌های رسی، سریسیت و غیره وارد می‌شود. عنصر باریم بیشترین جانشینی را با  $K^+$  دارد. در سنگ میزبان  $Ba^{2+}$  احتمالاً در ساختمان پلاژیوکلاز یا فلدسپار پتاسیم حضور دارد. طی دگرسانی باریم آزاد شده وارد شبکه کانی‌های پتاسیم‌دار مانند فلدسپارها یا آلونیت و ژاروسیت می‌شود و لذا در بعضی نمونه‌ها غنی‌شدگی نشان می‌دهد. Sn و W در تمام نمونه‌ها تهی‌شدگی دارند. با توجه به پایین بودن محتوای Sn و W سنگ اولیه این عناصر به سرعت در مراحل اولیه دگرسانی از سنگ تهی شده‌اند. نمودار عناصر کمیاب در شکل ۷ حاکی از وجود محلول هیدروترمال با اسیدیته بسیار

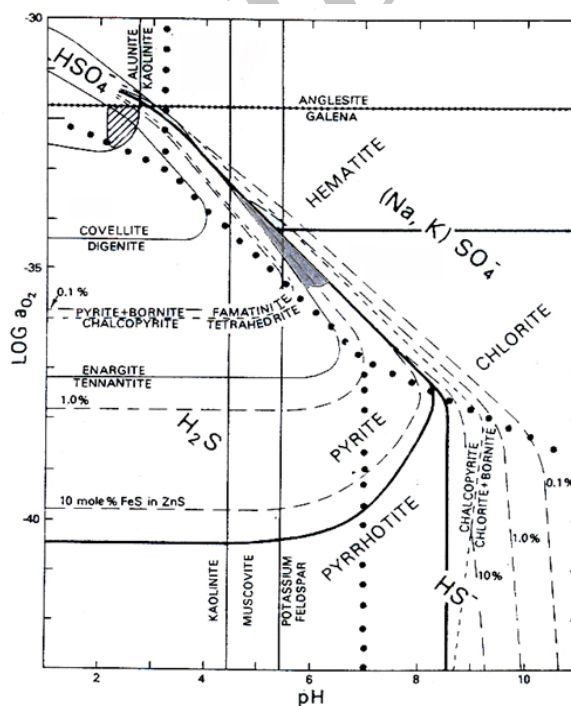
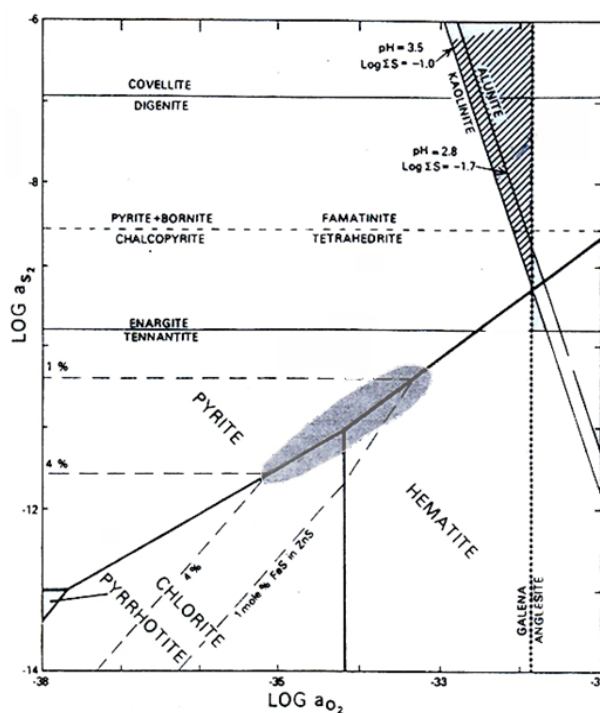
سیستم هیدروترمال است که تا نزدیکی سطح صعود کرده و در زون جوشش توسط اکسیژن اتمسفری اکسید شده است.



۳- محلول‌های هیدروترمال: در این حالت اسید سولفوریک بر اثر واکنش  $\text{H}_2\text{O}$  با  $\text{SO}_2$  ماگمایی به وجود می‌آید.



تشخیص منشأ  $\text{H}_2\text{SO}_4$  نیازمند بررسی داده‌های ایزوتوپی است.



شکل ۱۳- الف) دیاگرام  $\text{Log } a_{\text{S}_2}$ - $a_{\text{O}_2}$  برای نمایش محدوده پایداری کانی‌های شاخص سیستم‌های اپی‌ترمال در دمای  $250^\circ\text{C}$  (ب) دیاگرام  $\text{Log } a_{\text{O}_2}$ - $\text{pH}$  در دمای  $250^\circ\text{C}$ ، غلظت سولفور برابر  $0.2$  مول و درجه شوری  $1$  مول با نسبت  $\text{Na/K}=9$ . اقتباس از Barton و همکاران (۱۹۷۷). محدوده هاشور خورده محیط تشکیل رسوبات اسید-سولفات و محدوده سایه محیط تشکیل رسوبات آدولاریا-سرسیت را نشان می‌دهد.

## نتیجه‌گیری

با توجه به مطالعات کانی‌شناسی و ژئوشیمیایی انجام شده در این محدوده نتایج زیر حاصل شده است:

۱. دگرسانی هیدروترمال گسترده‌ترین نوع دگرسانی در محدوده مورد مطالعه است که بر سنگ میزبان

آندزیتی- تراکی آندزیتی اثر کرده است.

۲. براساس ترکیب کانی‌شناسی، دگرسانی هیدروترمال منطقه شامل انواع دگرسانی‌های پروپیلیتی، آرژیلی، آرژیلی پیشرفته، آلونیتی و سیلیسی است. رده‌بندی‌های شیمیایی و تصاویر ماهواره‌ای نیز به وجود دگرسانی‌های



آرژیلی (متوسط تا شدید) اشاره می‌کند.

۳. با توجه به نمودارهای غنی‌شدگی و تهی‌شدگی عناصر اصلی و بررسی روند تهی‌شدگی و غنی‌شدگی این عناصر در مراحل مختلف دگرسانی می‌توان به وضوح مشاهده نمود که در یک محیط دگرسانی خروج عناصر از سنگ و ترتیب خروج آن‌ها بر اساس ترکیب محلول گرمایی به میزان تحرک عناصر در محیط هیدروترمال، نوع کانی‌های دگرسانی و ترکیب سنگ اولیه بستگی دارد؛ مثلاً باقی ماندن  $Al_2O_3$  و  $SiO_2$  در سنگ تا درجات بالای دگرسانی ناشی از کم تحرک بودن این عناصر است، اما عنصر متحرکی مانند پتاسیم به علت ورود در ساختمان کانی‌های دگرسان، از جمله سریسیت و آلونیت می‌تواند تا مراحل پیشرفته دگرسانی در سنگ باقی بماند. عنصر Cr تا آخرین مرحله دگرسانی و حتی در حضور محلول‌های اسیدی قوی در سنگ باقی مانده است. از اینجا می‌توان تحرک فوق العاده کم Cr و محتوای بالای آن در سنگ اولیه را استنباط کرد و نقش

ترکیب سنگ اولیه و تحرک عناصر را در تهی‌شدگی و غنی‌شدگی یک عنصر ملاحظه نمود.

۴. در نمودارهای تهی‌شدگی و غنی‌شدگی شاهد خروج عناصر Zn و Cu از سنگ در مراحل پیشرفته دگرسانی هستیم. با توجه به آثار کانی‌زایی که به خصوص در مورد عنصر Cu در منطقه دیده می‌شود، احتمالاً می‌توان کانی‌زایی را مرتبط با دگرسانی مزبور تصور نمود.

۵. با توجه به فراوانی کانی‌های اسیدی و سولفاتی، مانند: کائولینیت، آلونیت و سیلیس و فقدان آدولاریا و با در نظر گرفتن شرایط تشکیل این کانی‌ها، وجود دگرسانی هیدروترمال از نوع اسید-سولفات (High Sulfidation) را می‌توان نتیجه‌گیری کرد. فوگاسیته بالای سولفور نزدیکی زمانی و مکانی رسوبات اسید-سولفات با منبع ماگمایی را می‌تواند منعکس می‌سازد. وجود توده‌های نفوذی در منطقه، از جمله توده گرانودیوریتی زاجکان پایین که در جنوب غرب محدوده مورد مطالعه واقع شده است، شاهدی بر این ادعا است.

## منابع

اسدی، ن. (۱۳۸۵) بررسی پترولوژیکی سنگ‌های آتشفشانی ائوسن در منطقه شیرین سو (جنوب لوشان) با نگرشی ویژه بر زون‌های دگرسانی منطقه. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین، تهران. کریم‌پور، م. (۱۳۶۸) زمین‌شناسی اقتصادی کاربردی. نشر مشهد، مشهد.

- Aghanabati, A. (2004) Geology of Iran. Geological Survey of Iran Publisher, Tehran.
- Barton, P. B., Jr., Bethke, P. M. and Roedder, E. (1977) Environment of ore deposition in the Creede mining district, San Juan Mountains, Colorado. *Economic Geology* 72: 1-24.
- Beane, R. E. and Titley, S. R. (1981) Geological characteristics, environments and genesis of porphyry copper deposits. *Economic Geology*, 75<sup>th</sup> Anniversary.
- Burnham, C. W. (1962) Facies and types of hydrothermal alteration. *Economic Geology* 57: 768-784.
- Grant, J. A. (1986) The isocon diagram – A simple solution to Gresen's equation for metasomatic alteration. *Economic Geology* 81: 1976-1982.
- Heald, P., Foley, N. K. and Hayba, D. O. (1987) Comparative anatomy of volcanic-hosted epithermal deposits: acid-sulfate and adularia-sericite types. *Economic Geology* 82: 1-26.
- Hemley, J. J., Hostetler, P. B., Gude, A. and Montioy, J. (1969) Some Stability relations of alunite. *Economic Geology* 64: 599-612.

## **Alteration characteristics of the Abtorsh- Youzbashichai area and the analysis of geochemical behavior of elements (major and trace), in alteration environment**

**Nahid Asadi <sup>1</sup>, Mohammad Hashem Emami <sup>\*1,2</sup> and Monireh Kheirkhah <sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Department of Petrology, Earth Science Institute, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

<sup>2</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Islamic Azad University, Islamshahr Branch, Islamshahr, Iran

### **Abstract**

The Abtorsh- Youzbashichai alteration zone, located in Taron zone, is an obvious example of hydrothermal type alteration that found in trachyandesitic tuffs and lavas. Based on the field observations, mineralogical and geochemical investigations and satellite images there are argillic, advanced argillic, alunitic and silicic zones in this altered area. These zones exhibit a regular zonation from down to up. Some evidences such as following of alteration from rock fractures system and the patches of unaltered host rock in alteration body also confirm the hydrothermal type alteration in this area. Considering widespread existence of some minerals such as kaolinite, alunite, jarosite, and silica in alteration paragenesis and the trend of enrichment and depletion of elements (major & trace) observed in alteration stages, it seems that this area is influenced by acid- sulfate (high sulfidation) type alteration. The diagrams and alteration reactions confirm that enrichment or depletion of elements in alteration stages depends on their geochemical nature, their abundances in source rock, the type of altered minerals and their structures as well as physicochemical properties of alteration solutions.

**Key words:** Abtorsh, alunite, Acid- sulfate alteration, Kaolinite, Hydrothermal, Youzbashichai

---

\* hashememami@yahoo.com