

کانی‌سازی و زمین‌شیمی آرسنیک در سامانه دگرسانی محدوده قزل‌بلاغ، هشتگرد، جنوب خاور تبریز

شیرین فتاحی^{۱*}، احمد جهانگیری^۲، فرهاد ملک قاسمی^۲ و سید حسن طباطبایی^۴

^۱دکتر، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۲استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۳دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران
^۴دانشیار، دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۰۷/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۱۰/۱۸

چکیده

ذخیره آرسنیک قزل‌بلاغ در هشتگرد در فاصله ۱۲۰ کیلومتری جنوب خاور تبریز قرار دارد. در محدوده مورد مطالعه، تأثیر گنبد‌های داسیتی سهند بر روی آهک‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ‌های سازند قم به سن الیگومیوسن و واحدهای پیروکلاستیک به سن میوسن، منجر به تشکیل انواع دگرسانی‌های سیلیسی، فیلیک، آرژیلیک حدواسط، آرژیلیک پیشرفته و دولومیتی شدن به همراه کانی‌سازی آرسنیک شده است. به نظر می‌رسد کانی‌سازی آرسنیک در دو مرحله اصلی رخ داده است: (۱) کانی‌سازی پیریت \pm کالکوپیریت \pm آرسنوپیریت که منطبق با هاله دگرسانی فیلیک بوده است. می‌توان گفت که سیال مسئول کانه‌زایی در این مرحله دارای حرارت بالاتر (حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و S_2 بین 10^{-15} تا 10^{-10} بوده است؛ (۲) کانی‌سازی پیریت \pm آرسنیک خالص \pm آلگار \pm اورپیمنت \pm گالن \pm استینیت که منطبق با هاله دگرسانی رسی حدواسط و پیشرفته هستند. سیال گرمایی در این مرحله دارای حرارت پایین‌تر (تقریباً بین ۱۸۰ تا ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد) و S_2 بین $10^{-7/8}$ تا 10^{-12} بوده است. این مجموعه توسط هماتیت، دیاسپور، کائولینیت، آلونیت و آرسنولیت همراهی می‌شود. همچنین میانگین عیار آرسنیک در زون فیلیک ۶۵۵ ppm و در انواع زون‌های آرژیلیک ۱۱۹۳۰ ppm است. محاسبات تغییرات جرم نمایانگر غنی‌شدگی بسیاری از عناصر فلزی همچون Ag، Hg، Sb، As و Au در محدوده مطالعاتی بوده است. با توجه به مطالعات ژئوشیمیایی، می‌توان گفت عناصر As، Hg و Sb می‌توانند به عنوان ردیاب کانی‌سازی احتمالی مس پورفیری و طلا در محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شوند.

کلیدواژه‌ها: آرسنیک، کانی‌سازی، محاسبات تغییرات جرم، هشتگرد، جنوب خاور تبریز.

*نویسنده مسئول: شیرین فتاحی

E-mail: shfatahi1982@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

منطقه قزل‌بلاغ در شمال باختر ایران و در هشتگرد واقع شده است. تأثیر گنبد‌های داسیتی سهند بر روی واحدهای آذرآواری، سنگ‌های آذرین و رسوبی موجود در محدوده مطالعاتی منجر به تشکیل انواع ذخایر رسی و فلزی به ویژه کائولینیت و سولفیدهای آرسنیک شده است. وجود تنوع در ترکیب سنگ‌شناسی سنگ‌های درونگیر همراه با وجود گسل‌های متعدد در این ناحیه از ایران، موجب ایجاد تغییرات زمین‌شیمیایی شدید در محیط تشکیل این ذخایر شده است. از جمله کارهای صورت گرفته در منطقه می‌توان به فتاحی و همکاران (۱۳۸۶) اشاره کرد. علیرغم بررسی‌های تفصیلی بر روی بی‌هنجاری‌هایی از عنصر آرسنیک مرتبط با ذخایر اپی‌ترمال در نقاط مختلف دنیا (Boran et al., 2016) و به ویژه در ایران (قلیچ‌خانی و همکاران، ۱۳۹۲)، تاکنون هیچ مطالعه جامعی بر روی ذخیره سولفیدهای آرسنیک قزل‌بلاغ از نظر کانی‌شناسی و زمین‌شیمی عنصری صورت نگرفته است. در این پژوهش سعی شده است تا اطلاعات کاملی از کانه‌نگاری، نوع دگرسانی‌های موجود در منطقه، سازوکار کانی‌سازی و زمین‌شیمی عناصر اصلی، فرعی و جزئی کانسنگ‌های آرسنیکی و سنگ درونگیر آنها ارائه شود.

۲- روش پژوهش

در این پژوهش، نخست پیمایش‌هایی جهت شناسایی انواع تشکیلات سنگی و روابط صحرائی در منطقه قزل‌بلاغ انجام شد. بر این اساس، ۴۰ نمونه سنگی از ماسه‌سنگ‌ها، آهک‌های ماسه‌ای، توف‌ها (با ترکیب ویتریک لیتیک کریستال توف) و داسیت‌ها از منطقه برداشت شد. برای مطالعات سنگ‌نگاری از سنگ‌های نام برده ۳۰ مقطع نازک و ۲۰ مقطع صیقلی تهیه و با استفاده از میکروسکوپ مطالعه شد. ترکیب کانی‌شناسی ۵ نمونه از نمونه‌های برداشت شده با استفاده از دستگاه پراش پرتو X (XRD) مدل D4 در شرایط تشعشع CuK α ، کرماتورهای گرافیتی، ولتاژ ۴۰

کیلولت، جریان ۴۰ میلی‌آمپر، سرعت اسکن ۲ درجه در هر دقیقه و بازه اسکن ۲ تا ۷۰ درجه در آزمایشگاه تجزیه مواد معدنی دانشگاه تهران تعیین شد. مطالعات تکمیلی بر روی کانی‌شناسی ذخیره توسط SEM-EDS در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه تهران انجام گرفت. همچنین، ترکیب عناصر فرعی در ۴ نقطه اندازه‌گیری شد. برای مطالعات زمین‌شیمیایی سنگ کل، ۱۲ نمونه از ماسه‌سنگ‌ها (با ترکیب لیتیک‌آرنایت) و آهک‌های ماسه‌ای کانی‌سازی شده از منطقه انتخاب و در آزمایشگاه Amdel کشور استرالیا تجزیه شدند. در این آزمایشگاه، مقادیر اکسیدهای اصلی و فرعی به روش ICP-ES، مقادیر عناصر جزئی به روش ICP-MS و مقادیر عنصر طلا به روش عیارسنجی آتشی (Fire Assay) تعیین شدند. مقادیر LOI نمونه‌ها به وسیله اشغال نمونه‌ها در C° ۱۰۰۰ به مدت بیست و چهار ساعت اندازه‌گیری شد. نتایج آنالیزهای شیمیایی به همراه محدوده آشکارسازی عناصر در جدول ۱ ارائه شده‌اند. حد قابل ثبت برای اکثر اکسیدهای اصلی ۰/۰۱ (به جز Cr با حد قابل ثبت ۰/۰۰۲) (%wt) بوده است. همچنین به غیر از عناصر Au (ppb) و As (ppm) با حد قابل ثبت ۰/۵۰، کلیه اکسیدهای فرعی و جزئی دارای حد قابل ثبت ۰/۱۰ (ppm) هستند.

۳- بحث و بررسی

۳-۱. زمین‌شناسی

منطقه قزل‌بلاغ، به مختصات جغرافیایی $37^{\circ} 58' 58''$ تا $37^{\circ} 58' 58''$ عرض شمالی، در فاصله ۱۲۰ کیلومتری جنوب خاور تبریز واقع شده است (شکل ۱-الف). عملکرد فرایندهای زمین‌ساختی (گسل‌ها) در این منطقه منجر به ایجاد پهنه‌های برشی، کانی‌سازی سولفیدهای آرسنیک و انواع دگرسانی‌های گرمایی (سرسیستی شدن، سیلیسی شدن، آرژیلیکی

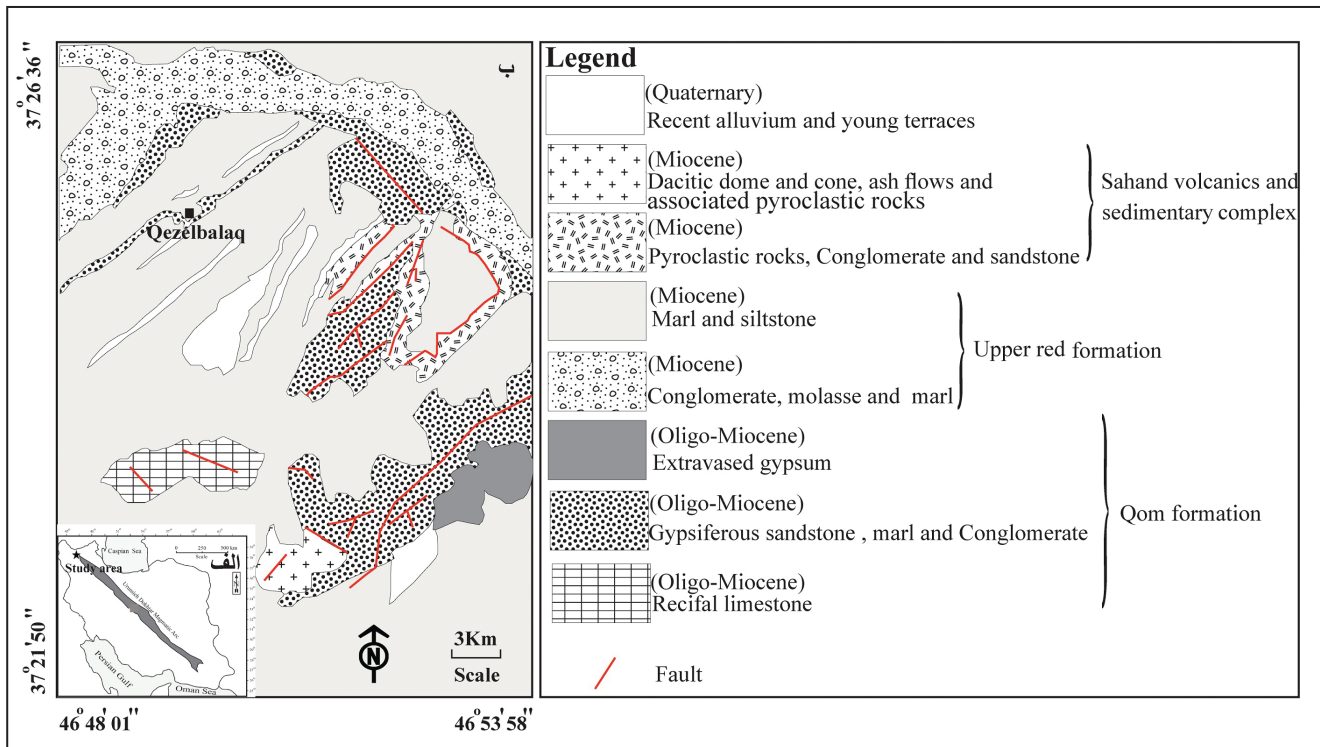
سازند قرمز بالایی (میوسن)، سنگ‌های آذر آواری کائولینیتی شده (میزبان سولفیدهای آرسنیک) به همراه کنگلومرا و ماسه‌سنگ (میوسن)، گنبد‌های آندزیتی و داسیتی سه‌سند، جریان‌ات خاکستر و سنگ‌های آذر آواری مرتبط (میوسن) و رسوبات آبرفتی عهد حاضر (به سن کواترنری) هستند (سبزه‌ای و بهروزی، ۱۳۶۶) (شکل ۱-ب).

شدن و دولومیتی شدن) و متعاقب آن تشکیل ذخایر کائولینیتی متعدد شده است. بارزترین واحدهای سنگی منطقه‌ی قزل‌بلاغ به ترتیب قدیم به جدید شامل آهک‌های ماسه‌ای، ماسه‌سنگ‌های ژپیس‌دار، مارن و کنگلومرا (میزبان کانی‌سازی آرسنیک) و ژپیس‌های سازند قم (الیگومیوسن)، کنگلومرا، مولاس، مارن و سیلت‌استون‌های

جدول ۱- مقادیر عناصر اصلی، فرعی و LOI بر حسب درصد وزنی (wt%) و مقادیر جزیی ppm (به جز طلا که بر حسب ppb است) در نمونه‌های ماسه‌سنگی دگرسان شده مورد مطالعه (خطوط تیره نشان‌دهنده عدم آنالیز آن عنصر برای نمونه مربوطه است و (nd: Not detected).

Sample No	Detection limit(wt%)	S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10	S11	S12
SiO ₂ (wt%)	۰/۰۱	۲۱/۸۳	۲۱/۵۷	۶۰/۶۸	۵۳/۵۲	۱۲/۶۳	۶۰/۷۰	۶۰/۰۰	۶۰/۲۳	۵۷/۰۰	۵۶/۰۰	۵۳/۰۰	۵۳/۳۲
Al ₂ O ₃	۰/۰۱	۵/۴۷	۱۲/۲۰	۱۳/۲۴	۱۳/۴۱	۳/۵۵	۸/۴۲	۷/۰۶	۶/۵۲	۰/۹۶	۰/۴۸	۰/۸۵	۰/۸۶
Fe ₂ O ₃	۰/۰۱	۱۶/۰۰	۱۲/۹۰	۱۰/۹۶	۱۷/۱۳	۴/۰۵	۵/۳۳	۱۱/۴۰	۱۲/۰۰	۴/۶۳	۴/۳۹	۳/۳۲	۳/۳۰
CaO	۰/۰۱	۱۰/۳۷	۳/۴۸	۳/۲۳	۳/۳۸	۲۴/۰۱	۲/۳۳	۵/۱۶	۶/۳۴	۱۷/۹۰	۱۹/۷۰	۱۷/۴۰	۱۷/۸۰
Na ₂ O	۰/۰۱	۰/۶۷	۲/۵۲	۲/۸۰	۳/۰۰	۰/۳۲	۲/۰۷	۱/۶۴	۰/۳۷	۰/۲۰	۰/۱۸	۰/۱۹	۰/۱۹
MgO	۰/۰۱	۳/۸۶	۰/۶۴	۰/۶۳	۰/۷۴	۱۳/۱۲	۰/۲۹	۰/۶۲	۰/۷۱	۹/۳۰	۱۰/۰۰	۹/۱۶	۹/۱۷
K ₂ O	۰/۰۱	۱/۱۳	۱/۸۳	۲/۰۵	۱/۷۷	۰/۶۴	۲/۶۴	۱/۶۵	۱/۷۷	۰/۳۶	۰/۱۷	۰/۳۲	۰/۳۲
TiO ₂	۰/۰۱	۰/۲۴	۰/۲۹	۰/۳۳	۰/۲۶	۰/۱۰	۱/۰۱	۰/۲۲	۰/۲۳	۰/۰۴	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۳۶
MnO	۰/۰۱	۰/۱۲	۱/۲۲	۰/۴۱	۰/۶۷	۰/۱۶	۰/۰۳۵	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۱۳	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
P ₂ O ₅	۰/۰۱	۰/۰۸	۰/۲۹	۰/۲۷	۰/۳۵	۰/۰۶	۰/۰۹	۰/۱۳	۰/۱۴	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
Cr ₂ O ₃	۰/۰۰۰۲	۰/۰۰۲	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۴	۰/۰۰۴	۰/۰۰۳	۰/۰۰۳	۰/۰۰۵	۰/۰۰۰۸	۰/۰۰۰۵	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷
L.O.I	۰/۰۱	۱۴/۶۶	۵/۶۶	۴/۶۶	۵/۰۰	۳۹/۰۰	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۱۲/۰۰	۸/۰۰	۸/۳۲	۱۵/۵۴	۱۵/۳۰
SO ₃	۰/۰۱	۲۴/۳۵	۳۷/۲۲	۰/۳۶	۰/۱۷	۱/۳۲	-	-	-	-	-	-	-
Sum	-	۹۸/۷۸	۹۹/۸۲	۹۹/۶۱	۹۹/۴۰	۹۸/۹۶	۹۸/۹۱	۹۹/۹۱	۱۰۰/۳۲	۹۸/۵۵	۹۹/۳۹	۹۹/۹۴	۱۰۰/۸۵

Au(ppb)	۰/۵۰	-	-	-	-	-	۱۶/۰۰	۱۲/۰۰	۱۴/۰۰	۰/۰۰	۳/۰۰	nd	nd
Ni(ppm)	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۴۱/۰۰	۴۹/۰۰	۴۷/۰۰	۹/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰	۰/۰۰
Pb	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۴۳/۹۰	۲۵/۲۰	۱۷/۱۶	۱۸/۷۰	۱۴/۳۰	۲۵/۳۰	۲۴/۶۰
Sr	۰/۱۰	۱۲۴	۴۹۰	۴۵۲	۴۶۹	۱۱۱	۳۴۴	۲۵۲	۱۲۲	۱۰۵	۸۵/۳۰	۱۱۰	۱۰۷
Ba	۰/۱۰	۲۵۰	۲۱۰۰	۱۲۰۰	۷۰۰	۲۶۰	۱۲۶۰	۲۳۳	۱۷۱	۴۰/۲۰	۲۷/۹۰	۳۷/۹۰	۳۶/۵۰
Be	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۲/۳۰	۵/۶۰	۶/۹۰	۰/۴۰	nd	۰/۲۰	۰/۲۰
Sc	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۱۲/۰۰	۱۷/۰۰	۳۵/۰۰	nd	nd	nd	nd
Li	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۲/۹۰	۲۰/۲۰	۲۷/۴۰	۱۹/۶۰	۱۴/۵۰	۱۷/۲۰	۱۷/۰۰
V	۰/۱۰	-	۲۱۰	۲۱۰	۲۶۲	-	۱۸۳	۱۷۴	۱۶۵	۳۶/۰۰	۱۶/۰۰	۲۵/۰۰	۲۵/۰۰
Zr	۰/۱۰	۸۵	۱۱۶	۱۱۹	۱۶۰	۶۸۶	۱۳۰	۹۱/۰۰	۷۵/۰۰	۶۵/۰۰	۶۱/۰۰	۵۶/۰۰	۵۸/۰۰
Hg	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۴/۰۰	۸/۰۰	۱۰/۰۰	۱۰/۰۰	۱۵/۰۰	۱۹/۰۰	۲۵/۰۰
Ag	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۰/۲۲	۰/۱۶	۰/۱۴	۰/۱۵	۰/۱۴	۰/۱۴	۰/۱۳
As	۰/۵۰	۸۱۰	۶۵۵	۴۸۲	۶۷۲	۷۳۵۰	۲۰۷۰	۴۵۷۰	۲۶۶۰	۱/۱۰	۵۸۹۰	۲۹۲۰۰	۲۹۷۰۰
Co	۰/۱۰	۲۴۰	۲۳۴	۱۸۲	۲۵۰	-	۱۷/۱۰	۹/۲۰	۹/۵۰	۵/۳۰	۴/۰۰	۳/۸	۳/۹۰
Cu	۰/۱۰	۴۳	۶۸	۸۰	۹۱	۴۱	۳۰/۷۰	۴۵/۴۰	۵۳/۶۰	۱۵/۲۰	۹/۳۰	۹/۶۰	۹/۴۰
Mo	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۳/۸۰	۵/۵۰	۲/۲۰	۸/۲۰	۵/۸۰	۴/۵۰	۴/۶۰
Sb	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۳/۰۰	۱/۰۰	۰/۶۰	۱/۰۰	۰/۶۰	۱/۹۰	۱/۹۰
Zn	۰/۱۰	۱۲۰	۸۱	۷۴	۱۳۸	۹۲	۱۹۷	۴۹۰	۴۲۸	۱۰۸	۱۶۰	۱۰۶	۱۱۰
Sn	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۲/۲۰	۰/۹۰	۱/۱۰	۰/۳۰	nd	nd	nd
W	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۲/۳۰	۱/۸۰	۰/۹۰	۰/۲۰	۰/۰۰	۰/۲۰	۰/۲۰
Cs	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۲۸/۱۰	۱۰/۴۰	۱۹/۷۰	۴/۹۰	۲/۵۰	۴/۵۰	۴/۸۰
Nb	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۱۹/۳۰	۷/۴۰	۵/۸۰	۱/۲۰	۰/۶۰	۱/۸۰	۱/۱۰
U	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۳/۰۰	۲۴/۲۰	۴۸/۷۰	۲/۸۹	۲/۰۳	۳/۰۷	۳/۰۸
Tl	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۳/۴۰	۱/۰۰	۱/۴۰	۰/۴۰	۰/۳۰	۰/۵۰	۰/۵۰
Cd	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۱/۲۰	۹/۰۰	۶/۸۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۳۰	۰/۳۰
Rb	۰/۱۰	۳۶	۵۰	۴۷	۴۲	-	۱۰۴	۵۸/۵۰	۷۶/۰۰	۱۶/۶۰	۷/۵۰	۱۴/۶۰	۱۵/۱۰
Th	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۱۱/۲۰	۱۳/۶۰	۲۰/۳۰	۱/۱۱	۰/۵۴	۰/۴۴	۰/۹۹
Y	۰/۱۰	۲۶	۲۱	۲۲	۲۵	-	۱۳/۶۰	۲۵/۳۰	۱۹/۴۰	۲/۹۰	۱/۴۰	۲/۴۴	۲/۴۲
S	۰/۱۰	-	-	-	-	-	۸۱۰	۳۰۴۰۰	۵۳۷۰۰	۷۷۲۰	۴۱۵۰	۲۰۴۰۰	۲۱۰۰۰



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مطالعاتی روی نقشه ایران؛ ب) نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه، برگرفته از سبزه‌ای و بهروزی (۱۳۶۶) با اندکی تغییرات.

سنگ دیده می‌شوند. در مقاطع مطالعاتی، پلاژیوکلازها با بلورهای شکل دار تا نیمه شکل دار به صورت فنوکریست‌های درشت و میکروفنوکریست‌های کوچک در زمینه دیده می‌شوند. در اکثر مقاطع مورد مطالعه پلاژیوکلازها در امتداد رخ‌ها و شکستگی‌ها به سرسیت، کانی‌های رسی و کلسیت تبدیل شده‌اند. شیشه موجود در زمینه نیز وسیعاً به کانی‌های رسی و کلسیت تجزیه‌شده نشان می‌دهد (شکل ۳- الف). بافت عمده این گونه سنگ‌ها هیالوپورفیریک و میکروولیت پورفیری است. در برخی از مقاطع مورد مطالعه، کانی دیاسپور در زمینه سرسیتی دیده می‌شود (شکل ۳- ب). مرز کانیایی دیاسپور-سرسیت به صورت عدم تعادلی بوده و با خورده‌شدگی و تحلیل‌رفتگی سرسیت‌ها (resorbed margins) همراه بوده است، این امر می‌تواند نمایانگر تبدیل سرسیت‌ها به دیاسپور باشد (شکل ۳- ب). همچنین در مقاطع صیقلی مشاهده شده از داسیت‌ها، رگچه‌هایی از کالکوپیریت، پیریت (شکل ۳- پ) و آرسنوپیریت (شکل ۳- ت) دیده می‌شود. کالکوپیریت‌ها و پیریت‌ها غالباً به اکسیدهای آهن تبدیل شده‌اند و تنها بقایایی از پیریت‌های اولیه به صورت دانه‌ریز و پراکنده در زمینه اکسیدهای آهن قابل رؤیت است.

در مقاطع مطالعاتی، توف‌ها دارای ترکیبی در حد ویتریک‌لینیک کریستال توف و حاوی درشت‌بلورهایی از پلاژیوکلاز و کوارتز (به ترتیب فراوانی)، خرده‌سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیتی و شیشه‌های آتشفشانی هستند (شکل ۳- ث). کوارتز در مقاطع، به صورت شکل دار تا نیمه‌شکل دار و با خاموشی موجی قابل رؤیت است. پلاژیوکلاز، به صورت قطعات سالم و شکسته در متن سنگ پراکنده است (شکل ۳- ث). شیشه‌های آتشفشانی نیز (با فراوانی کمتر نسبت به کانی‌هایی نظیر کوارتز و پلاژیوکلاز) در مقاطع مشاهده می‌شوند که خود توسط کلسیت و کانی‌های رسی جانشین شده‌اند (شکل ۳- ث). خرده‌سنگ‌ها با فراوانی کمتر نسبت به درشت‌بلورها و زمینه شیشه‌ای به ترتیب فراوانی از کانی‌های پلاژیوکلاز، کوارتز و شیشه تشکیل شده‌اند (شکل ۳- ث). زمینه خرده‌سنگ‌ها از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز و شیشه آتشفشانی تشکیل شده است که به طور قابل ملاحظه‌ای توسط کلسیت و رس‌ها جانشین شده‌اند (شکل ۳- ث).

همچنین در مقاطع مورد مطالعه از آهک‌های ماسه‌ای، رگچه‌های متقاطع از رآلگار قابل مشاهده است. به نظر می‌رسد سولفیدهای آرسنیک در امتداد درز و

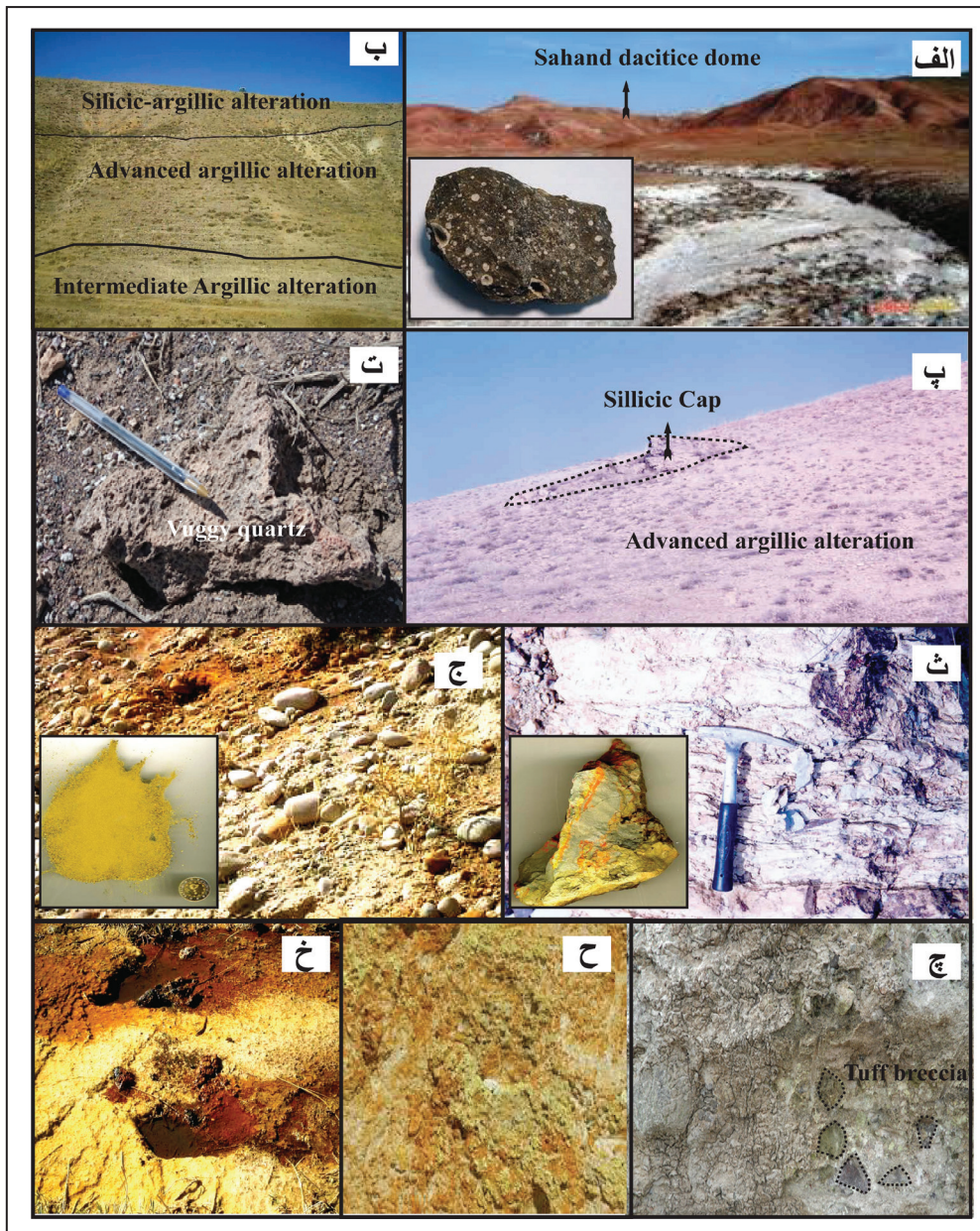
در جنوب محدوده مطالعاتی، گنبد‌های داسیتی سه‌دند قرار دارند که در نمونه‌های دستی دارای بافت پورفیری هستند (شکل ۲- الف). از ویژگی‌های مهم این گنبد‌ها می‌توان به دگرسانی فیلیک و کانی‌سازی رگه‌ای-رگچه‌ای پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت در مقادیر بسیار اندک اشاره کرد. همچنین تأثیر سیالات گرمابی بر توف‌ها سبب ایجاد هاله دگرسانی آرژیلیک حدواسط، آرژیلیک پیشرفته و آرژیلیک-سیلیسی به ترتیب از عمق به سطح شده است (شکل ۲- ب). کلاهک‌های سیلیسی متعدد بخشی از مرتفع‌ترین قسمت‌های زون آرژیلیک پیشرفته را تشکیل می‌دهند که به علت سختی بالا به صورت برجسته به نظر می‌رسند (شکل ۲- پ) و شامل سیلیس‌های حفره‌دار هستند (شکل ۲- ت). همچنین کانی‌سازی آرسنیک به صورت لایه‌ای و پراکنده تخلخل اولیه واحدهای آذرآواری (شکل ۲- ب)، فضای بین ورقه‌های آهک‌های ماسه‌ای (شکل ۲- ث)، خلل و فرج ماسه‌سنگ‌ها و آغشتگی سطحی دانه‌ها (شکل ۲- ج) و نیز رگه‌ای در مناطق گسل رخ داده است. در نواحی گسلی ساخت‌های کاتاکلاستیک و شکستگی‌های شدید به چشم می‌خورد. به طوری که در سنگ‌های رسوبی و آذرآواری مورد مطالعه، ضخامت بعضی از زون‌های برشی مجاور گسل‌ها به سه متر می‌رسد. اغلب برش‌های مذکور زاویه‌دار هستند و بین ۱۰ تا ۲۰ سانتی متر اندازه دارند. قطعات این برش‌ها توسط کانی‌های رسی ناشی از دگرسانی‌های آرژیلیک به همدیگر متصل شده‌اند (شکل ۲- ج). دولومیتی شدن قابل ملاحظه‌ای نیز در آهک‌های ماسه‌ای قابل مشاهده است. گوگرد خالص نیز به صورت شکافه‌پرن، فضاهای خالی موجود در شکستگی‌ها، حفرات و یا تخلخل اولیه ماسه‌سنگ‌ها را پر کرده است (شکل ۲- ح). چشمه‌های آبگرم نیز در محدوده مطالعاتی دیده می‌شوند (شکل ۲- خ).

۲-۳. مطالعات کانی‌شناسی

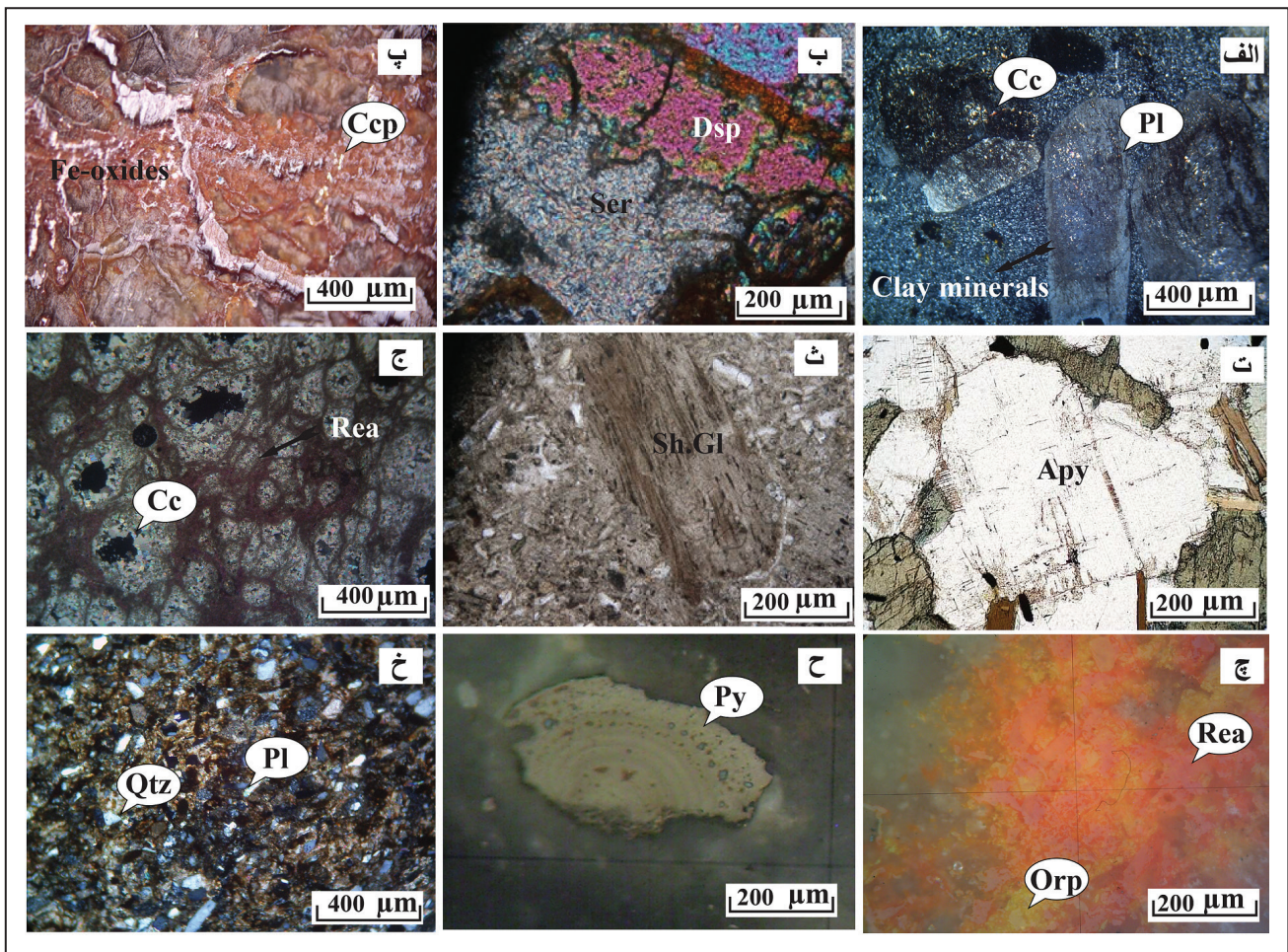
مطالعات میکروسکوپی نشان می‌دهند که داسیت‌های مورد مطالعه، اغلب شامل بلورهای پلاژیوکلاز (با فراوانی حدود ۳۵ درصد)، کوارتز (با فراوانی حدود ۳۰ درصد)، آمفیبول و بیوتیت (با فراوانی کمتر از ۵ درصد) هستند که در زمینه‌ای (حدود ۳۰ درصد) متشکل از میکروولیت‌های پلاژیوکلاز (با فراوانی حدود ۱۵ درصد)، شیشه (با فراوانی حدود ۱۰ درصد) و کوارتز (با فراوانی حدود ۵ درصد) قرار دارند. پلاژیوکلازها به صورت سالم و قطعات خرد شده به طور پراکنده در

در مقاطع مطالعاتی از ماسه‌سنگ‌ها مشخص می‌شود که کوارتز (۳ درصد)، فلدسپار (۸ درصد) و قطعات لیتیک (۴۹ درصد) از اجزای اصلی تشکیل‌دهنده آنها هستند که در سیمانی (۲۵ درصد) از کلسیت، هماتیت و سولفیدهای آرسنیک قرار دارند (شکل ۳-خ). در این گونه سنگ‌ها، بیوتیت (۱ درصد) به عنوان کانی فرعی بوده و همچنین ماتریکس کمتر از ۱۵ درصد بوده و از کانی‌های رسی تشکیل شده است. در کلیه مقاطع مطالعاتی، اجزای واکنش‌پذیر همچون فلدسپارها و پلاژیوکلازهای موجود در خرده‌سنگ‌های ولکانیکی تحت تأثیر فرایندهای گرمایی به کانی‌های رسی تبدیل شده‌اند (شکل ۳-خ).

شکاف و شکستگی‌ها ترسیب شده باشند. قسمت‌های آهکی موجود در زمینه سنگ نیز دچار انحلال شده و سپس کلسیت‌های گرمایی در بین حفرات انحلالی ترسیب شده‌اند. در برخی نواحی، دولومیت‌های گرمایی نیز تشکیل شده‌اند. این گونه دولومیت‌ها نسبت به کربنات‌های اولیه دانه‌درشت‌تر هستند و اشکال رومیوهدرال در آنها یافت می‌شود (شکل ۳-ج). در مقاطع صیقلی، بلورهای اورپیمنت با رنگ زرد قناری مشاهده می‌شوند که بلورهای نارنجی رنگ رآلگار را از اطراف احاطه کرده‌اند (شکل ۳-چ). کانی پیریت نیز به فرم کلو فورم (Colloform) و حفره‌دار در درز و شکستگی‌های موجود تبلور یافته است (شکل ۳-ح).



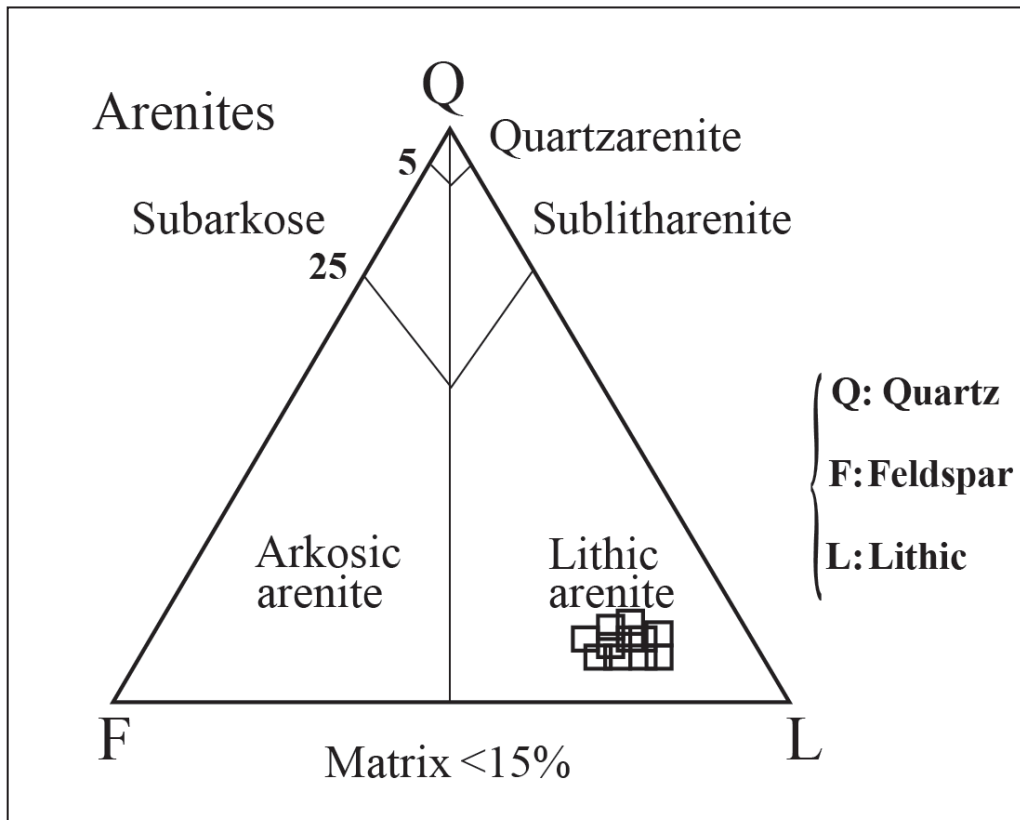
شکل ۲- الف) نمایی از گنبد‌های داسیتی سهند در جنوب محدوده مطالعاتی که در نمونه‌های دستی دارای بافت پورفیری هستند؛ ب) موقعیت هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط، آرژیلیک پیشرفته و سیلیسی- آرژیلیک در محدوده مطالعاتی؛ پ) قرارگیری کلاهک سیلیسی در قسمت بالایی هاله دگرسانی آرژیلیک پیشرفته؛ ت) سیلیس‌های حفره‌دار موجود در قسمت کلاهک سیلیسی؛ ث) نمایی از آهک‌های ماسه‌ای کانی‌سازی شده به همراه نمونه دستی؛ ج) ماسه‌سنگ‌های حاوی سولفیدهای آرسنیک به همراه نمونه دستی در منطقه قزل‌بلاغ؛ چ) برش‌های توفی (در هاله دگرسانی آرژیلیک) که توسط کانی‌های رسی به هم متصل شده‌اند؛ ح) گوگرد خالص به صورت پرکننده تخلخل اولیه بین ماسه‌سنگ‌ها؛ خ) نمایی از چشمه‌های آبگرم موجود در منطقه مطالعاتی.



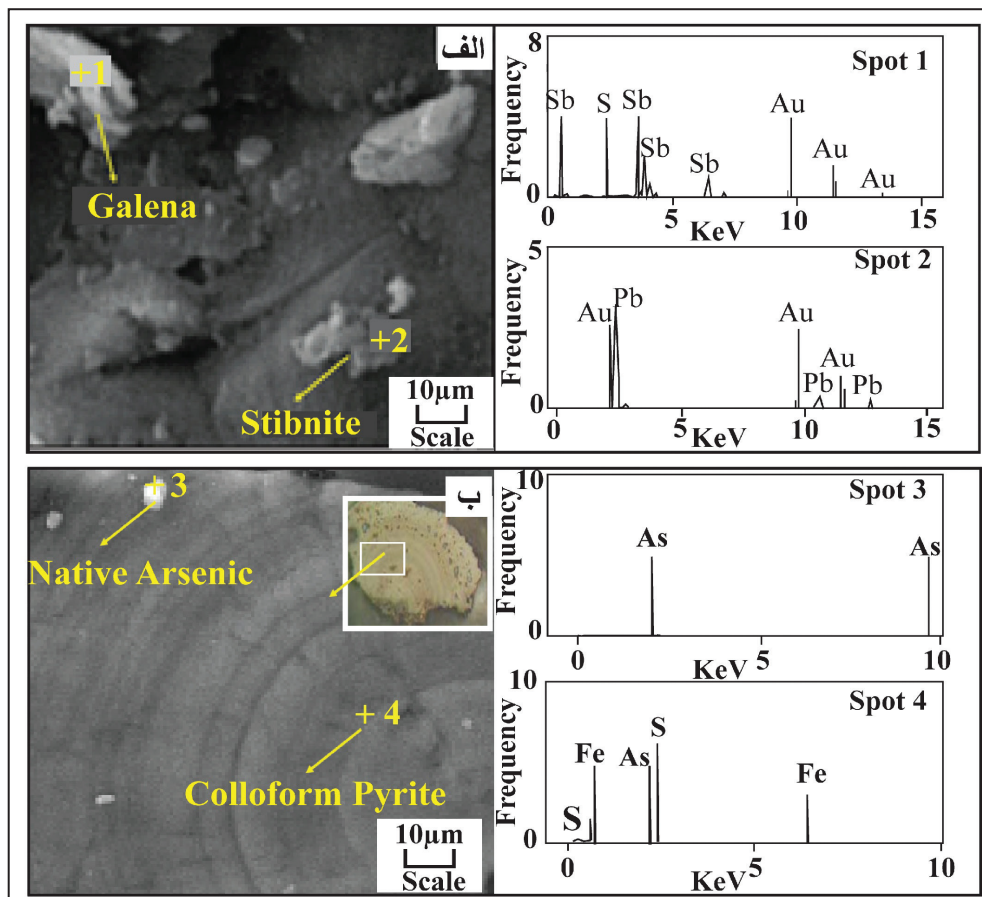
شکل ۳- الف) فنو کریست های پلاژیو کلاز در زمینه ای از کوارتز، میکرولیت های پلاژیو کلاز و شیشه. همان گونه که ملاحظه می شود قسمت عمده فنو کریست ها و میکرولیت های پلاژیو کلاز به همراه شیشه به کانی های رسی و کلسیت تبدیل شده اند (XPL؛ ب) دیاسپور جانشین شده به جای سریسیت موجود در زمینه سنگ (XPL؛ پ) رگچه هایی از کالکوپیریت در زمینه اکسیدهای آهن (آثاری از پیریت های اولیه به صورت دانه ریز و پراکنده در زمینه اکسیدهای آهن دیده می شوند) (XPL؛ ت) آرسنوپیریت موجود در زون فیلیک (XPL؛ ث) شیشه های آتشفشانی به همراه قطعات خرده سنگی و بلورهای کوارتز و پلاژیو کلاز در توف ها (XPL؛ ج) رگچه های رآلگاز درون ماسه سنگ های آهکی به همراه ترسیب کلسیت های گرمابی درون حفرات انحلالی و دولومیتی شدن فاز کرنانه رسوبی (XPL؛ ح) بلورهای نارنجی رنگ از رآلگاز که توسط اورپیمنت دربر گرفته شده اند (XPL؛ خ) پیریت های کلو فورم (Colloform) و حفره دار تشکیل شده درون شکستگی ها (XPL؛ خ) بلورهای سالم و خرد شده پلاژیو کلاز به همراه کوارتز و خرده سنگ های ولکانیکی در سیمانی از هماتیت، کلسیت و سولفیدهای آرسنیک (XPL). علائم اختصاری به کار رفته عبارتند از: Py= آرسنوپیریت، Plg= پلاژیو کلاز، Qtz= کوارتز، Ca= کلسیت، Py= پیریت، Sh.GI= شیشه های آتشفشانی، Rea= رآلگاز، Orp= اورپیمنت، Ccp= کالکوپیریت، Dsp= دیاسپور و Ser= سریسیت، علائم اختصاری کانی ها برگرفته از (Kretz, 1983) است.

(پیریت های آرسنیک دار) و یا به شکل پرکننده حفرات خالی موجود در محدوده مطالعاتی (عنصر آرسنیک خالص) تشکیل شده است. آنالیزهای پراش پرتو X (XRD) نشان می دهند که در داسیت های دگرسان شده، کانی های سریسیت، آلونیت، کلریت، مونت موریلونیت، منیزیت، کوارتز و کلسیت وجود دارند (شکل های ۶- الف و ب). این در حالی است که در ماسه سنگ های دگرسان شده، کانی های کائولینیت، پیریت، رآلگاز، اورپیمنت، مونت موریلونیت، هماتیت، کلسیت، ورمیکولیت، کوارتز و فلدسپار دیده می شوند (شکل های ۶- پ و ت). همچنین در یک نمونه از واحدهای آذرآواری کانی های مونت موریلونیت، کائولینیت، کوارتز، کلسیت و فلدسپار قابل مشاهده هستند (شکل ۶- ث). با توجه به مطالعات صورت گرفته می توان گفت در سامانه دگرسانی قزل بلاغ، مونت موریلونیت، کائولینیت، کوارتز، فلدسپار و کلسیت کانی های اصلی بوده اند که توسط کلریت، سریسیت، آرسنوپیریت، هماتیت، پیریت، منیزیت، ورمیکولیت، دیاسپور، ژپس، رآلگاز و اورپیمنت همراهی می شوند.

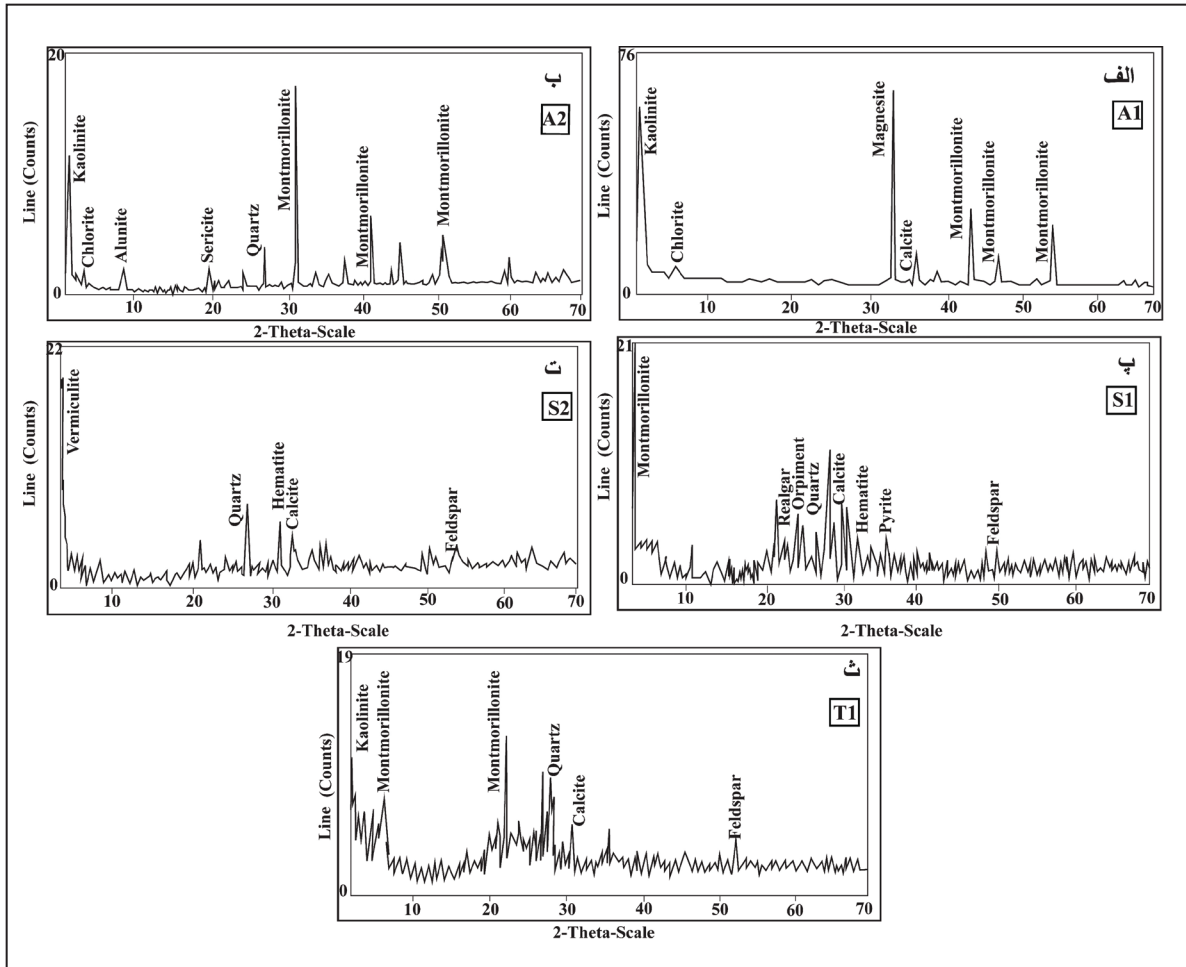
به علت حضور کانی های ناپایدار همچون بیوتیت و فلدسپار، ماسه سنگ های مورد مطالعه از لحاظ کانی شناسی، نارس (Immature) و از لحاظ بافتی به علت گردشگی و جورشدگی متوسط نیم رس (Submature) هستند. طبق تقسیم بندی Pettijohn et al. (1972) ماسه سنگ های مورد مطالعه ترکیبی در حد لیتیک آرنایت (Litharenite) دارند (شکل ۴). بررسی های کانی شناسی توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی دلالت بر حضور کانی های استیبنیت، گالن (شکل ۵- الف)، عنصر آرسنیک خالص (Native) و پیریت های کلو فورم (Colloform) حفره دار (شکل ۵- ب) در نمونه های مورد مطالعه دارند. همچنین آنالیز SEM-EDS از کانی های مذکور (به ترتیب نقاط ۱ تا ۴) صورت گرفته است (شکل ۵). همان گونه که مشاهده می شود، پیریت های کلو فورم (Colloform) حفره دار در ترکیب شیمیایی خود دارای مقداری آرسنیک هستند. چنین به نظر می رسد که در محدوده مطالعاتی، عنصر آرسنیک احتمالاً به صورت هم رسوبی با پیریت ها



شکل ۴- موقعیت نمونه‌های ماسه‌سنگی در نمودار سه‌متغیره کوآرتز (Q)، فلدسپار (F) و خرده‌سنگ (L) برگرفته از (Pettijohn et al., 1972).



شکل ۵- تصاویر تهیه شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی از: الف) گالن، استینیت؛ ب) آرسنیک خالص (طبیعی) و پیریت‌های کلوپورم (Colloform) حفره‌دار به همراه نتایج حاصل از آنالیزهای SEM-EDS از کانی‌های مذکور در ۴ نقطه.



شکل ۶- گراف‌های نمودار پراش پرتو X (XRD) در محدوده قزل‌بلاغ در: الف) نمونه A1؛ ب) نمونه A2 از داسیت‌های دگرسان شده؛ پ) نمونه S1؛ ت) نمونه S2 از ماسه‌سنگ‌های دگرسان شده؛ ث) نمونه T1 از توف‌های دگرسان شده.

۳-۳. دگرسانی

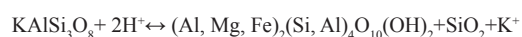
شواهد صحرایی و یافته‌های سنگ‌نگاری نشان می‌دهند که کلیه سنگ‌های رسوبی، آذرین و آذرآواری موجود در منطقه دستخوش دو نوع دگرسانی درون‌زاد (هیپوزن) و برون‌زاد (سوپوزن) شده‌اند.

– **دگرسانی درون‌زاد (هیپوزن):** این دگرسانی با حضور کانی‌هایی مانند کوارتز، کائولینیت، سریسیت، آلونیت، مونت‌موریلونیت، پیریت، کلسیت و ورمیکولیت، در سنگ میزبان به صورت عدسی و رگه‌ای مشاهده می‌شود. در این نوع دگرسانی سریسیت، جانشین پلاژیوکلزهای موجود در داسیت‌ها شده است. به نظر می‌رسد که سریسیت و کوارتز طی دگرسانی درون‌زاد از واکنش زیر حاصل شده‌اند (Beane, 1983):



Sericite Chalcedony

از آنجا که مهم‌ترین کانی رسی موجود در نمونه‌های رسی مونت‌موریلونیت است، احتمالاً تجزیه پلاژیوکلزهای اولیه در سنگ مادر بر اثر واکنش‌های آبکافت با مصرف H^+ و آزادسازی کاتیون‌های قلیایی و قلیایی خاکی اتفاق افتاده است. بر اثر این واکنش‌ها مقداری سیلیس همراه با مونت‌موریلونیت تشکیل می‌شود (Brown et al., 1988):



K-flt Montmorillonite

کانی کائولینیت نیز می‌تواند بر اثر واکنش‌های آبکافت، طی تخریب کانی‌های سیلیکاتی بدون آب به کانی‌های سیلیکاتی آب‌دار تشکیل شود:



K-flt Kaolinite

حضور پیریت در زون‌های دگرسانی می‌تواند حاکی از آن باشد که محلول‌های گرمابی حاوی H_2S بوده‌اند. آلونیت‌های موجود در گسل‌ها و شکستگی‌ها، می‌توانند ناشی از تأثیر محلول‌های گرمابی حاوی SO_4^{2-} با آلومینیم حاصل از تجزیه فلدسپارهای موجود در واحد سنگ میزبان باشند. ترسیب کلسیت نیز می‌تواند حاصل ترکیب CO_2 موجود در محلول‌های گرمابی با کلسیم حاصل از دگرسانی فلدسپارها در دماهای بالا باشد.

– **دگرسانی برون‌زاد (سوپوزن):** حضور کانی‌های ژیس، دیاسپور، همتایت و آرسنولیت می‌تواند نشانه‌ای بر دگرسانی برون‌زاد در سنگ‌های میزبان باشد. به نظر می‌رسد که فرسایش فوقانی زون‌های شکسته شده و خرد شده که قبلاً دستخوش دگرسانی‌های درون‌زاد شده بودند، سبب قرارگیری آنها در سطح زمین شده است. در این مرحله کانی‌های تشکیل شده در طی دگرسانی درون‌زاد، تحت هجوم شیمیایی آب‌های اکسایشی زیرزمینی قرار گرفته‌اند. این پدیده سبب پیدایش یک رشته کانی‌های جدید در محدوده قزل‌بلاغ شده است. برخورد آب‌های اکسیژن‌دار با کانی پیریت موجود در زون درون‌زاد سبب ایجاد محلول‌های آبگون اسیدی فعالی شده که عامل اصلی رخداد دگرسانی برون‌زاد در منطقه قزل‌بلاغ هستند

در متن ماسه‌سنگ‌ها) به مونت-موریلونیت و کائولینیت تبدیل شده‌اند. همچنین سولفیدهای آرسنیک عمدتاً شامل رآلگار و اورپیمنت هستند که به صورت آغشتگی سطحی دانه‌ها، پرکننده فضای خالی (Open space filling)، رگه و رگچه‌ای ترسیب شده‌اند. از مشخصات شاخص این مرحله کانه‌زایی می‌توان به تشکیل پیریت‌ها با بافت کلو فورم و حفره‌دار اشاره کرد. پیریت‌ها با محتوای بالای As، اغلب حفره‌دار هستند و به راحتی پودر می‌شوند. این خصوصیت می‌تواند برای اکتشاف ذخایر طلا مفید باشد (Springer, 1983). آهک‌های ماسه‌ای نیز در این مرحله ضمن ترسیب فلزات در امتداد شکستگی‌ها و فضاهای بین ورقه‌ای، کم و بیش دولومیتی شده‌اند. سیلیسی شدن نیز در این مرحله به صورت جانشینی کربنات‌های اولیه، پرکننده خلل و فرج و شکستگی‌های موجود در ماسه‌سنگ‌ها و سنگ‌های آذرآواری و یا حفره‌دار دیده می‌شوند. می‌توان گفت سیال گرمایی در این مرحله دارای حرارت پایین‌تر (تقریباً بین ۱۸۰ تا ۲۱۰ درجه سانتی‌گراد) و $10^{-7/8}$ تا 10^{-13} S_2 بوده است (Rytuba, 1997). به طور کلی پایداری نسبی کانی‌های آرسنیک، تابعی از S_2 است. با کاهش S_2 به ترتیب اورپیمنت، رآلگار، آرسنیک خالص، آرسنوپیریت و نهایتاً لولینژیت ترسیب می‌شوند (Rytuba, 1997). در میدان پایداری پیریت، ۴ کانی اورپیمنت، رآلگار، آرسنیک خالص و آرسنوپیریت پایدار هستند. آرسنوپیریت ممکن است با پیروتیت نیز به صورت تعادلی تشکیل شود. این در حالی است که لولینژیت فقط با پیروتیت به صورت هم‌زیست یافت می‌شود (Rytuba, 1997). مجموعه کانی‌های تشکیل شده توسط محلول‌های آب‌گون برون‌زاد تحت هجوم آب‌های زیرزمینی قرار گرفته و بر اثر فرایندهای اکسایش هماتیت، آرسنولیت و ژپیس تشکیل شده‌اند. آرسنولیت به صورت گرد سفید رنگ سطح رآلگار و اورپیمنت را در برخی از نمونه‌های دستی پوشانده است. عملکرد آب‌گون‌های جوی با تشکیل بافت‌های جانشینی برجای مانده و حضور حفره‌های فراوان در سنگ‌ها همراه بوده است. همچنین دنباله پاراژنتیک برای کانی‌های حاصل از فرایندهای دگرسانی و کانه‌زایی در منطقه قزل‌بلاغ در شکل ۷ آورده شده است.

(Bigam and Nordstrom., 2000). هماتیت‌ها در این راستا از تجزیه پیریت‌ها حاصل شده‌اند. کانی ژپیس نیز ناشی از واکنش H_2SO_4 با Ca^{2+} ‌های از تجزیه کربنات‌های تشکیل شده در مرحله درون‌زادی و یا یون‌های بی‌کربناتی موجود در محیط ایجاد شده است. کانی آرسنولیت نیز طی دگرسانی سولفیدهای آرسنیک (رآلگار و اورپیمنت) حاصل شده است.

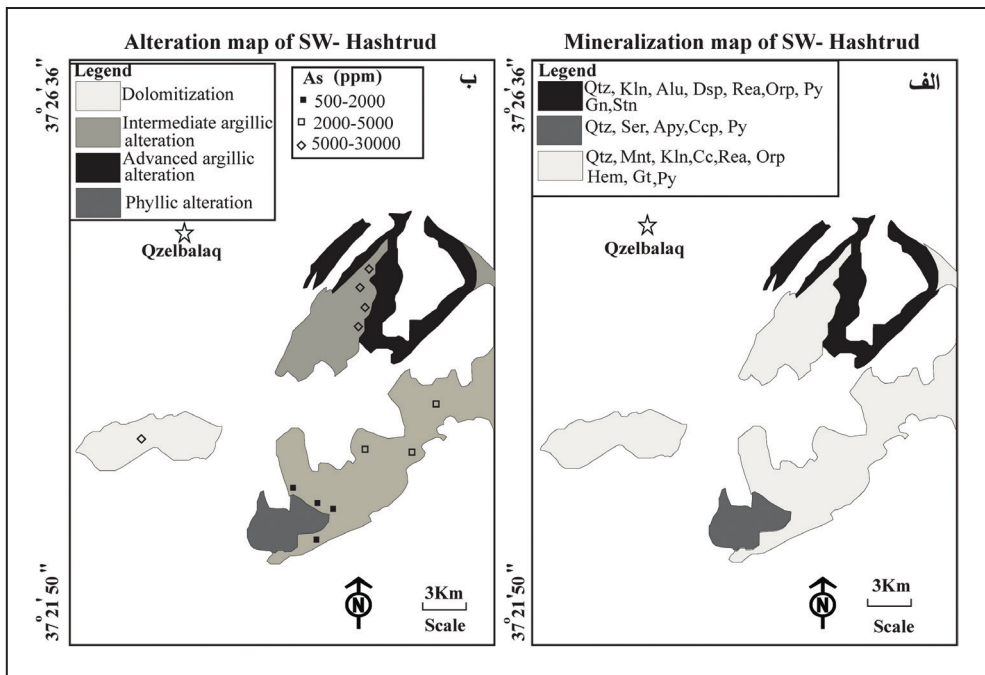
۴-۳. سازوکار کانی‌سازی آرسنیک

شواهد صحرایی و سنگ‌نگاری حاکی از آن است که کانه‌زایی آرسنیک در قزل‌بلاغ در طی دو مرحله توسط محلول‌های درون‌زاد و برون‌زاد صورت گرفته است. با توجه به شواهد صحرایی، خاستگاه درون‌زاد محلول‌های هیپوژن را می‌توان به فعالیت‌های آتشفشانی روی داده در یک کیلومتری جنوب منطقه مورد بررسی نسبت داد. سنگ‌های آتشفشانی یاد شده ترکیبی در حد داسیت با سرشت کالک‌آلکان دارند (پیرمحمدی و همکاران، ۱۳۹۱). با توجه به شواهد صحرایی و کانی‌شناسی می‌توان عنوان کرد که کانه‌زایی آرسنیک در محدوده مطالعاتی در دو مرحله توسط محلول‌های درون‌زاد رخ داده است: ۱) کانی‌سازی پیریت \pm کالکوپیریت \pm آرسنوپیریت که منطبق با هاله دگرسانی فلیک بوده است. در این مرحله محلول‌های درون‌زاد سبب تجزیه فلدسپارهای موجود در داسیت‌های مورد مطالعه و تبدیل آنها به سریسیت و کوارتز شده‌اند. این مرحله همگام با ترسیب پیریت، کالکوپیریت و آرسنوپیریت داخل شکستگی‌ها و زون‌های برشی بوده است. می‌توان گفت که سیال مسئول کانه‌زایی در این مرحله دارای حرارت بالا (حدود ۲۵۰ درجه سانتی‌گراد) و S_2 بین 10^{-15} تا 10^{-20} بوده است (Rytuba, 1997)؛ ۲) کانی‌سازی پیریت \pm آرسنیک خالص \pm رآلگار \pm اورپیمنت \pm گالن \pm استینیت که منطبق با هاله‌های دگرسانی آرژیلیک حدواسط و پیشرفته هستند. در این مرحله اجزای واکنش‌پذیر در سنگ‌های آذرآواری (همچون شیشه‌های آتشفشانی و پلاژیوکلازها) و ماسه‌سنگ‌های لیتیک‌آرنایتی (همچون پلاژیوکلازهای موجود در قطعات خرده سنگی و دانه‌های فلدسپار موجود

Minerals	Hydrothermal	Weathering
Pyrite	██████████	
Arsenopyrite	—	
Native Arsenic	—	
Chalcopyrite	—	
Realgar	██████████	
Orpiment	██████████	
Galena		—
Stibnite		—
Kaolinite	██████████	
Montmorillonite	██████████	
Chlorite		—
Sericite	—	
Magnesite		—
Vermiculite	██████████	
Quartz	██████████	
Alunite	██████████	
Calcite		—
Dolomite		—
Hematite		██████████
Gypsum		—
Diaspore		—
Arsenolite		—

شکل ۷- دنباله پاراژنتیکی حاصل از فرایندهای کانه‌زایی و دگرسانی در محدوده قزل‌بلاغ. ضخامت خطوط در ارتباط با میزان فراوانی کانی‌هاست.

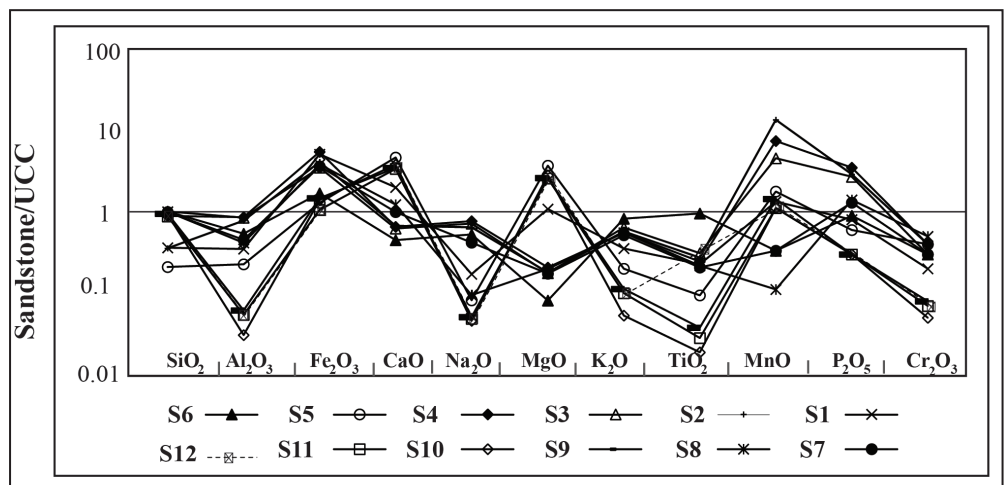
نقشه کانی شناسی (شکل ۸- الف) و دگرسانی محدوده به همراه موقعیت نمونه‌های برداشتی و غلظت آرسنیک (شکل ۸- ب) نیز ارائه شده است.



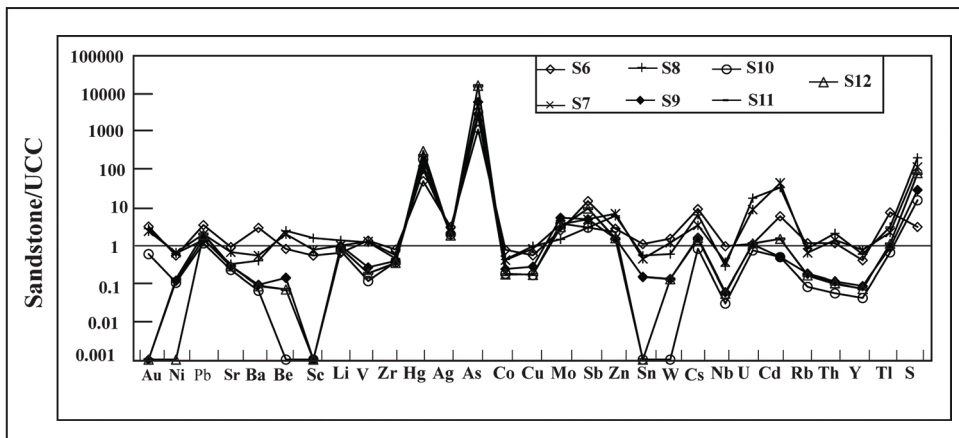
شکل ۸- نقشه‌های: الف) کانی شناسی؛ ب) دگرسانی به همراه موقعیت نمونه‌های برداشتی و غلظت آرسنیک از محدوده قزل‌بلاغ.

فرعی و جزئی موجود در ماسه‌سنگ‌ها با بهنجار کردن کلیه عناصر به پوسته بالایی UCC همراه بوده است (Taylor, 1964؛ شکل‌های ۹ و ۱۰).

۳-۵. فاکتورهای کنترل‌کننده رفتار عناصر در طی فرایند کانه‌زایی ماسه‌سنگ‌ها به منظور انجام مطالعات شیمیایی سنگ‌ها، محاسبات تغییرات جرم اکسیدهای اصلی،



شکل ۹- نمودار عنکبوتی عناصر اصلی و فرعی بهنجار شده به پوسته بالایی UCC در نمونه‌های ماسه‌سنگ دگرسان شده.



شکل ۱۰- نمودار عنکبوتی عناصر جزئی بهنجار شده به پوسته بالایی UCC در نمونه‌های ماسه‌سنگ دگرسان شده.

و یا جایگزینی آن به جای Ca^{2+} های حل شده صورت گرفته باشد (Muchangos., 2006). وجود دو روند کاهشی و افزایشی برای اورانیم در طی تکوین و توسعه ذخیره، اشاره ضمنی به تغییر در میزان پتانسیل اکسیداسیون-احیای محیط نهشت دارد. خروج عناصری نظیر Cs، Ba و Rb در برخی از نمونه‌های مورد مطالعه مبین دگرسانی فلدسپارها توسط سیالات دگرسان کننده و غنی‌شدگی آنها به فرایندهای جذب سطحی توسط کانی‌های رسی وابسته است. تهی‌شدگی Cu و Zn به ترتیب اشاره ضمنی به دگرسانی فلدسپارها و کانی‌های فرومنینز در طی توسعه و تکامل ذخیره دارد.

نتایج ضرایب همبستگی به روش پیرسون (Rollinson, 1993) در جدول ۲ آورده شده است. همبستگی مثبت بین عناصر As، Hg، Sb دیده می‌شود (۰/۲۴ تا ۰/۸۹/r). این امر می‌تواند با افزایش آرسنیک، آنتیموان و جیوه در نمونه‌های برداشت شده با فاصله گرفتن از گنبد‌های داسیتی کالک‌آلکان منطقه مرتبط باشد. همچنین همبستگی منفی بین As با سایر عناصر مانند Au، Ag، Zn، Pb، Sn، Cu و Co (۰/۱۰- تا ۰/۶۹-/r)، نیز وجود دارد. علت این امر احتمالاً می‌تواند در ارتباط با تفکیک حرارتی عناصر (و در نتیجه کانی‌های مرتبط) تشکیل شده از هاله دگرسانی فیلیک به آرژلیک (با فاصله گرفتن از گنبد‌های داسیتی) در محدوده مطالعاتی باشد. به طوری که ترسیب قسمت عمده‌ای از عنصر As (در ساختار کانی‌هایی مانند رآلگار، اورپیمت، آرسنیک خالص و پیریت‌های آرسنیک‌دار) در هاله دگرسانی آرژلیک کم‌حرارت بوده است. این در حالی است که تشکیل بخش اعظم عناصر Au، Ag، Zn، Pb، Sn، Cu و Co (در ساختار کانی‌های همچون کالکوپیریت میزان احتمالی طلا و نقره، گالن و...) در زون فیلیک با حرارت بالاتر بوده‌اند. همبستگی مثبت بین Cu با Au (۰/۷۶/r) و Ag (۰/۲۶/r) نیز می‌تواند نمایانگر این موضوع باشد که کالکوپیریت کانی احتمالی میزان طلا و نقره در محدوده مطالعاتی بوده است. (Hart et al., 2000) بر اساس فاصله گرفتن از توده‌های نفوذی، ۳ منطقه کانی‌سازی را معرفی کرده است: ۱) کانی‌سازی داخل توده نفوذی (Intrusion hosted) شامل: Au± Bi± Sn± Ti± As± Mo± W؛ ۲) کانی‌سازی در مجاورت توده نفوذی (Proximal) شامل: Au± Cu± W؛ و ۳) کانی‌سازی دور از توده نفوذی (Distal) شامل: Au± As± Sb± Hg.

۴- نتیجه‌گیری

مهم‌ترین نتایج حاصل از بررسی کانی‌شناسی و زمین‌شیمی ذخیره آرسنیک در سامانه دگرسانی قزل‌بلاغ (هشتگرد) عبارتند از:

۱) در محدوده قزل‌بلاغ، داسیت‌ها، واحدهای پیرو کلاستیکی، آهک‌های ماسه‌ای و ماسه‌سنگ‌های لیتیک‌آرنایتی سنگ میزبان آرسنیک بوده‌اند که تحت تأثیر فرایندهای گرمایی دستخوش دگرسانی‌های فیلیک، آرژلیک پیشرفته، آرژلیک حدواسط، سیلیسی شدن و دولومیتی شدن شده‌اند.

۲) عملکرد فرایندهای دگرسانی درون‌زاد در محدوده قزل‌بلاغ سبب تشکیل مونت‌موریلونیت، کائولینیت، کوارتز، فلدسپار، کلسیت، کلریت، سرسیت، آرسنوپیریت، پیریت، منیزیت، ورمیکولیت، آرسنیک خالص (Native)، رآلگار و اورپیمت شده که عملکرد فرایندهای برون‌زاد با تشکیل دیاسپور، ژپس، همتیت و آرسنولیت همراه بوده است.

۳) حضور پیریت‌های کلو فورم (Colloform) و حفره‌دار به مقدار فراوان، در ارتباط با محتوای بالای آرسنیک آنهاست و می‌تواند به عنوان کانی معرف طلا در محدوده مطالعاتی در نظر گرفته شوند.

۴) عواملی نظیر pH پایین سیالات مسئول دگرسانی، نسبت‌های بالای آب به سنگ، فراوانی یون‌های کمپلکس کننده در سیالات گرمایی و سیستم زهکشی مناسب، نقش مهم و ارزنده‌ای در شستشوی عناصر کم‌تحرکی نظیر Hf، Ti، Al و Nb، طی فرایند دگرسانی محدوده مطالعات قزل‌بلاغ ایفا کرده‌اند.

بر اساس نتایج به دست آمده، فرایند کانه‌زایی در ماسه‌سنگ‌ها و دگرسانی (تبدیل) آنها در منطقه قزل‌بلاغ با غنی‌شدگی Fe، Pb، Hg، Ag، As، Mo، Sb، Zn و S، شستشو- تثبیت عناصری نظیر P، Mn، Co، Ba، Cr، Mg، Ca، Si، Rb، Tl، Cd، U، Cs، W، V، Sc، Be، Ba، Au، Th و تهی‌شدگی عناصری چون Y همراه بوده است (شکل‌های ۹ و ۱۰).

– **عناصر غنی شده:** در منطقه قزل‌بلاغ، غنی‌شدگی Fe، Pb، Hg، Ag، As، Mo، Sb، Zn و S می‌تواند در ارتباط با اضافه شدن عناصر مذکور توسط سیالات گرمایی در سیستم باشد. آهن در ساختار پیریت، سرب در ساختار گالن، آرسنیک در ساختار آرسنوپیریت، رآلگار، اورپیمت و یا آرسنیک خالص (Native) و آنتیموان در ساختار استینیت و گوگرد در ساختار کلیه کانی‌های سولفیدی اولیه و همچنین به صورت گوگرد خالص وجود دارد.

– **عناصر تهی شده:** خروج عناصری نظیر Y، Zr، Ti، Al و Nb، یک فرایند غیرعادی در طی دگرسانی آرژلیک محسوب می‌شود. این عناصر به طور معمول در طی فرایندهای دگرسانی به صورت بی‌تحرک یا کم‌تحرک عمل می‌کنند (Jiang et al., 2003). به نظر می‌رسد که عواملی نظیر pH پایین سیالات مسئول دگرسانی، نسبت‌های بالای آب به سنگ، فراوانی لیگاند‌های کمپلکس کننده $(SO_4^{2-}$ و CO_3^{2-} ، F، Cl، PO_4^{3-}) در سیالات گرمایی و سیستم زهکشی مناسب نقش بسیار مهمی در شستشوی عناصر نامبرده در طی توسعه دگرسانی آرژلیک ایفا کرده‌اند (Fulignati et al., 1999). نتایج بررسی‌های زمین‌شیمیایی نشان داده است که دگرسانی‌های حرارت بالا سبب تحرک عناصر با قدرت میدان بالا می‌شود و شرایط لازم برای خروج عناصری نظیر Zr و Y از سیستم دگرسانی را فراهم می‌کند. دگرسانی‌های حرارت پایین نیز باعث غنی‌شدگی عناصر یاد شده می‌شود (Salvi and Williams-Jones, 1996). با توجه به شستشوی این دو عنصر در طی فرایند تبدیل ماسه‌سنگ‌ها به رس در منطقه قزل‌بلاغ می‌توان ادعا کرد که دمای بالای سیالات عامل دگرسانی یکی از فاکتورهای اصلی کنترل کننده توزیع این دو عنصر در ذخیره مورد مطالعه بوده است. تهی‌شدگی عناصری نظیر K و Sr مبین دگرسانی فلدسپارهای موجود در متن ماسه‌سنگ‌ها و آزاد شدن بخشی عناصر مذکور به درون محلول‌های دگرسان کننده است. مطالعات انجام شده نشان داده است که توزیع عناصری نظیر Co، Cr و Ni در محیط‌های دگرسانی با تغییرات pH محیط در ارتباط است. تمرکز این عناصر در سیستم‌های دگرسانی با افزایش pH روند افزایشی به خود می‌گیرند (Arsalan et al., 2006). با توجه به روندهای کاهشی عناصر نام برده، به نظر می‌رسد که شرایط pH پایین در تشکیل ذخیره آرسنیک قزل‌بلاغ محتمل باشد.

– **عناصر تهی شده - غنی شده:** شستشوی Na در ارتباط با دگرسانی کانی پلاژیوکلاز و غنی‌شدگی آن در ارتباط با تثبیت این عنصر توسط کانی اسمکتیت است. خروج وانادیم نیز می‌تواند به نوبه خود دلیلی بر پایین بودن pH سیالات مسئول دگرسانی باشد، چرا که این عنصر در pH اسیدی به شدت متحرک است (Kadir and Akbulut, 2011). تهی‌شدگی Si در برخی از نمونه‌های ماسه‌سنگی مبین دگرسانی و تخریب فلدسپارها و متعاقب آن آزاد شدن سیلیس به درون محلول‌های مسئول دگرسانی و غنی‌شدگی آن در برخی از نمونه‌ها دلیلی بر حضور ریزرگچه‌های سیلیسی در نمونه‌های مورد مطالعه است. تهی‌شدگی Ca در برخی از نمونه‌ها به علت حلالیت بالای آن در محیط‌های دگرسانی است و غنی‌شدگی آن ممکن است به دلیل قرارگیری آن در موقعیت‌های بین لایه‌ای رس‌ها و یا به واسطه تشکیل کانی کلسیت و دولومیت رخ داده باشد (Christidis, 1988). تهی‌شدگی Mn از سیستم در ارتباط با شکسته شدن کانی‌های فرومنینز است و غنی‌شدگی آن نیز می‌تواند به واسطه حضور این عنصر در موقعیت‌های بین لایه‌ای در شبکه کانی مونت‌موریلونیت

جدول ۲- مقادیر ضرایب همبستگی پیرسون (Rollinson, 1983) بین برخی از عناصر انتخابی در نمونه‌های ماسه‌سنگ کانه‌زایی شده منطقه قزل‌بلاغ.

	As	Au	Cu	Zn	Sn	Hg	Sb	Ag	Si	Pb	Co
As	۱/۰۰										
Au	-۰/۷۴	۱/۰۰									
Cu	-۰/۶۸	۰/۷۶	۱/۰۰								
Zn	-۰/۵۴	۰/۷۴	۰/۹۳	۱/۰۰							
Sn	-۰/۶۵	۰/۹۰	۰/۶۵	۰/۰۵	۱/۰۰						
Hg	۰/۸۹	-۰/۷۸	-۰/۸۹	-۰/۵۱	-۰/۸۱	۱/۰۰					
Sb	۰/۲۴	۰/۴۸	۰/۱۴	-۰/۳۹	۰/۴۷	۰/۰۳	۱/۰۰				
Ag	-۰/۱۷	۰/۶۶	۰/۲۶	۰/۰۸	۰/۸۸	-۰/۷۴	۰/۶۷	۱/۰۰			
Si	۰/۱۷	۰/۹۱	۰/۸۵	۰/۷۳	۰/۸۵	-۰/۹۲	-۰/۰۵	۰/۶۲	۱/۰۰		
Pb	-۰/۱۰	۰/۴۸	۰/۱۰	-۰/۰۵	۰/۷۳	-۰/۳۷	۰/۹۲	۰/۸۷	۰/۳۲	۱/۰۰	
Co	-۰/۶۹	۰/۸۸	۰/۶۱	۰/۴۰	۰/۹۹	-۰/۷۹	۰/۵۰	۰/۹۰	۰/۸۲	۰/۷۷	۱/۰۰

۵- سیاست‌گذاری

نگارندگان همچنین از نظرات و پیشنهادات ارزنده و سازنده داوران محترم مجله سیاست‌گذاری می‌کنند.

نگارندگان از حمایت‌های مالی معاونت پژوهشی و تحصیلات تکمیلی دانشگاه تبریز برخوردار بوده‌اند، لذا شایسته است نهایت سپاس و قدردانی خود را ابراز دارند.

کتابنگاری

- پیرمحمدی، ف.، عامری، ع.، جهانگیری، ا.، مجتهدی، م.، هاواچن، ج. و کسکین، م.، ۱۳۹۱- پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی جنوب تبریز (آتشفشان سهند). مجله پترولوژی، شماره ۹، صص. ۳۷ تا ۵۶.
- سبزه‌ای، م. و بهروزی، ا.، ۱۳۶۶- نقشه زمین‌شناسی ۱/۲۵۰۰۰۰ میانه. سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
- فتاحی، ش.، ملک قاسمی، ف.، جهانگیری، ا. و ذاکری، ل.، ۱۳۸۶- بررسی ژنز پتانسیل‌های فلزی در منطقه شوردرق- هشتگرد از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، ۱۴۳ص.
- قلیچ‌خانی، م.، ملک‌زاده شفارودی، آ. و حیدریان شهری، م. ح.، ۱۳۹۲- زمین‌شناسی، کانی‌سازی و ژئوشیمی منطقه اکتشافی فیروز کوه، شمال شرق تربت جام، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال بیست و یکم، شماره ۴، صص. ۶۸۵ تا ۷۰۲.

References

- Arslan, M., Kadir, S., Abdioglu, E. and Kolayli, H., 2006- Origin and formation of kaolin minerals in saprolite of Tertiary alkaline volcanic rocks, Eastern Pontides, NE Turkey. *Clay Minerals*, Vo. 41, 597-617.
- Beane, R. E., 1983- Hydrothermal alteration in silicate rocks, southwestern North American, in Tittley, S. R., ed., *Advanced in geology of the porphyry copper deposits, south wesrern North American*. The University of Arizona press. Tucson, Arizona, 1-500.
- Bigham, J. M. and Nordstrom D. K., 2000- Iron and aluminum hydroxy-sulfates front acid sulfate waters, In: Alpers, C. N., Jambor, J. L., Nordstrom, D. K. (Eds), *Sulfate minerals- Crystallography, Geochemistry and Enviromental Significance*, Rev. Mineral Geochemistry 40, Mineral Society American Washington, DC, 351-403.
- Boran, H., Özaydn, E., Incekaraoğlu, T., Sevimli, A., Büyüksolak, A., Smith, M. T., Barrios W. A., Raabe, K., Leroux, G. and Ross, K., 2016- High Sulfidation Epithermal Au and Porphyry Cu-Au Mineralization at the Karaayı Target, Bıga Peninsula, Northwestern Turkey. *Society of Economic Geologists, Inc*.
- Brown, T. H., Berman, R. G. and Perkins, S., 1988- Geocal II: Ptasystem: Software for the calculation and display of pressure- temperature- activity phase diagrams. Univercity of Columbia, Department of Geology Science, Vacouver, British Columbia.
- Christidis, G. E., 1988- 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*, Vo. 46, 379-399.
- Fulginiti, P., Gioncada, A. and Sbrana, A., 1999- 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*, Vo. 88, 325-342.
- Hart, C. J. R., Baker, T. and Burke, M., 2000- New exploration concepts for country-rockhosted, intrusion-related gold systems: Tintina gold belt in Yukon, In: Tucker TL, Smith MT (eds) *The Tintina gold belt: Concepts, exploration and discoveries*. British Columbia and Yukon Chamber of Mines Special, Vo. 2, 145- 172.
- Jiang, N., Sun, S., Chu, X., Mizuta, T. and Ishiyama, D., 2003- Mobilization and enrichment of high-field strength elements during late- and post-magmatic processes in the Shuiquangou syenitic complex, Northern China. *Chemical Geology*, Vo. 200, 117-128.
- Kadir, S. and Akbulut, A., 2011- Mineralogy, geochemistry and genesis of the Taşoluk kaolinite deposits in pre-Early Cambrian metamorphites and Neogene volcanites of Afyonkarahisar, Turkey. *Clay Minerals*, Vo. 44, 89-112.
- Kretz, R., 1983- Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogists*, Vo. 68, 277-279.
- Muchangos, A. C., 2006- 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*, Vo. 88, 300-303.
- Pettijohn, F. J., Potter, E. E. and Siever, R., 1972- *Sand and sandstone*. Springer, New York, 1- 618.
- Rollinson, H., 1993- *Using geochemical data: evalution, presentation, interpretation*. 352p.
- Rytuba, J., 1997- Mutual solobilites of pyrite, pyrotite, quartz and gold inaqueous NaCl solutions from 200 EC to 500Ec, and 500 to 1, 500 bars and genesis of the cortex gold deposite, Nevada. *Standford university. Ph. D. thesis*.
- Salvi, S. and Williams-Jones, A. E., 1996- The role of hydrothermal processes in concentrating high-field strength elements in the strange Lake peralkaline complex, northeastern Canada. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, Vo. 60, 1917-1932.
- Springer, J., 1983- Invisible gold, *Geo. Surv. Ontario*, in Colvine, A. C. (ed.) *The Geology of gold in Ontario*. 240- 250, *Geo. Surv. Ont., Misc. P. 110*.
- Taylor, S. R., 1964- Abundance of chemical elements in the continental crust: a new table. *Geochimicue t Cosmochimicn Acta* Vo. 28, 1273 - 1285.

Mineralization and geochemistry of arsenic in alteration system of Qezelbalaq district, Hashtrud, Southeast of Tabriz

Sh. Fatahi^{1*}, A. Jahangiri², F. Maleckqasemi³ and S. H. Tabatabaei⁴

¹Ph. D., Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

²Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

³Associate Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

⁴Associate Professor, Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

Received: 2017 September 23

Accepted: 2018 January 08

Abstract

Qezelbalaq Arsenic ore deposit is located in Hashtrud, 120 km from southeast of Tabriz. In this district effect of dacitic Sahand domes on sandy limestones and Qom formation sandstone with Oligomiocene age and pyroclastic units with Miocene age leads to formation of various types of alteration such as Silicic, phyllic, intermediate argillic, advanced argillic and dolomitization. It seems that Arsenic mineralization has occurred in two main step: 1) Pyrite ± Chalcopyrite ± Arsenopyrite that are consistent with phyllic zone. Fluids responsible for mineralization have high temperature (nearly 250 centigrade degree) and f_{s2} between 10^{-15} to 10^{-20} and 2) Pyrite ± Native arsenic ± Realgar ± Orpiment ± Galena ± Stibnite which are consistent with intermediate argillic and advanced argillic zones. Hydrothermal fluid in this stage has lower temperature (nearly between 180 to 210 centigrade degree) with f_{s2} between $10^{-7.8}$ to 10^{-13} . These assemblages are associated with hematite, diaspor, kaolinite, alunite and arsenolite. Average of arsenic grade in phyllic zone is 655 ppm and in argillic zone is 11930 ppm. Mass change calculation indicates enrichment in many metals such as As, Sb, Hg, Ag and Au. According to geochemical studies, As, Hg and Sb are pathfinder for probably porphyry copper mineralization and gold in study area.

Keywords: Arsenic, Mineralization, Mass change calculation, Hashtrud, Southeast of Tabriz

For Persian Version see 149 to 160

*Corresponding author: Sh. Fatahi; E-mail: shfatahi1982@yahoo.com