



نقش بازالت‌های زیر دریایی سیلورین در کانی‌سازی ماسیو سولفاید در ارتفاعات شمال شرق شاهرود

عبدالرضا جعفریان

گروه زمین شناسی دانشگاه آزاد اسلامی واحد شاهرود a_r_jafarian@iau-shahrood.ac.ir

چکیده

هدف این تحقیق، بررسی بازالت‌های سلطان‌میدان به‌عنوان یک مجموعه‌ی وسیع از سنگ‌های ولکانیک مافیک زیر دریایی به سن پالئوزوئیک تحتانی (سیلورین)، بررسی موقعیت تکتونوماگمایی و وجود کانی‌سازی مس از نوع سولفید و کربنات در مناطق مختلف آن و ارتباط این نوع کانی‌سازی با ولکانیک‌های مافیک می‌باشد. بیش از ۱۵۰ نمونه سنگ از سه پیمایش عرضی این سازند مورد مطالعه‌ی میکروسکوپی و ۱۴ نمونه جهت آنالیزهای ژئوشیمیایی عناصر اصلی، کمیاب و نادر خاکی انتخاب شدند. مقاطع نازک، آلتراسیون هیدروترمال به ویژه کلریتی زاسیون وسیع را آشکار می‌نمایند. موقعیت تکتونوماگمایی این مجموعه‌ی ولکانیک، فوران شده در یک رژیم کششی، از نوع بازالت‌های درون ورقه‌ای است. تمرکز مس در بعضی از نمونه‌های سنگ کل، سولفیدهای مس، بیش از ۱ درصد می‌باشد. در اغلب نمونه‌ها، عناصر سرب و روی نسبتاً تمرکز بالایی دارند. همراهی سولفیدهای مس، کربنات‌های آبدار مس، اکسیدهای آهن و ژاسپ در اغلب نقاط این مجموعه‌ی ولکانیک مافیک با دو نوع تجمعات آلتراسیون هیدروترمال حرارت بالا و حرارت پایین، وجود بدنه‌های کانی‌سازی ماسیو سولفاید ولکانیک را امکان‌پذیر می‌سازد. **واژه‌های کلیدی:** سازند سلطان‌میدان، شاهرود، کانی‌سازی، نهشته‌های ماسیو سولفاید، نهشته‌های ولکانیک.

Silurian undersea basalts in VMS mineralization in the North-East of Shahrood A. R. Jafarian

Department of Geology, Islamic Azad University, Shahrood Branch, Shahrood, I.R. Iran

Abstract

The Soltan-Meydan basaltic suite contains a range of undersea mafic volcanic rocks whose stratigraphic position indicates lower Paleozoic (Silurian). In geology of Iran it has been named Soltan-Meydan Formation. However, Tectono-magmatic aspects of this suite and their relationship with copper mineralization have not been studied yet. The aim of this study is to clarify these relationships. Out of three traverses of this suite more than 150 rock samples were collected and their thin sections were studied. 14 relatively fresh samples were selected for the purpose of geochemical analysis of major and trace plus REE elements. Thin section studies indicate a wide range of hydrothermal alterations, in which Chloritization is the most altered mineral. The Soltan-Meydan volcanic suite represents within-plate magmatism which seems to have erupted in the extensional regime. Some samples with more than 1% copper concentration contain copper sulfide mineralization. In addition, samples with high concentration of Zn and Pb are common figures in most whole rock analyses.

Copper sulfides, hydrated copper carbonates, iron oxides and jasper are accompanied by two types of associations of hydrothermal alteration: a) high temperature associations and b) low temperature associations. Consequently, they may have generated volcanic massive sulfide (VMS) deposits in the mentioned suite.

Key words: Mineralization, Shahrood, Soltan-Meydan Formation, VMS, Volcanic host.

۱- مقدمه

قابل قبول بود. جهت تعیین پایایی (Reliability) دستگاه نمونه‌ی X16 برای عناصر اصلی و نمونه‌ی X15 برای عناصر کمیاب دوباره مورد آنالیز قرار گرفتند و انحراف معیار عناصر اصلی بین صفر برای اکسید پتاسیم (K_2O) و ۰/۰۷ برای دی اکسید سیلیسیم (SiO_2) و عناصر کمیاب بین ۰/۰۳ برای لوتسیم (Lu) و ۲۹ برای روی (Zn) می‌باشد.

۳- زمین‌شناسی عمومی‌نامه

برای اولین بار جنی (Jenny 1977) و اشتامفلی (Stampfli 1978) زمین‌شناسی منطقه‌ی شاهرود - علی‌آباد گرگان را مورد مطالعه قرار دادند و بازالت‌های پالئوژئیک تحتانی را در این ناحیه به جهت گسترش وسیع (۸۰ کیلومتر طول) تحت عنوان بازالت‌های سلطان میدان (تصویر ۱ و ۲) نام‌گذاری کردند. از نظر موقعیت استراتیگرافی این بازالت‌ها بر روی سازند شیرگشت به سن اردوئین که شامل ماسه‌سنگ‌های آركوزی زیتونی رنگ مسکویت‌دار است قرار می‌گیرد و خود توسط سازند پادها به سن دونین زیرین که شامل ماسه‌سنگ‌های صورتی کوارتز آرنایت می‌باشد به شکل ناپیوستگی آذرین پی هم‌شیب پوشیده می‌شود. جنی (Jenny 1977) بیشترین ضخامت را برای سازند سلطان میدان در ۹ کیلومتری غرب دهکده‌ی ابر در ناحیه‌ی سلطان میدان در کوه بیدر ۷۰۰ متر اندازه‌گیری کرد. وی با روش Ar-K اقدام به سن‌سنجی بازالت‌های سلطان میدان کرد (جدول ۱).

جدول ۱- سن رادیومیتریک بازالت‌های سلطان میدان با روش K-Ar (Jenny 1977)

شماره‌ی نمونه	۴۱۹ JJ	۳۶۲ JJ	۵۰۱ JJ	۵۲۱ JJ	۵۷۲ JJ	۶۴۵ JJ
تعیین سن به روش $^{40}Ar/^{39}K$	۵۰۱ Ma	۱۹۳ Ma	۲۲۵ Ma	۱۷۷ Ma	۴۷۷ Ma	۳۰۵ Ma

سن‌های حاصل از این روش به جز دو نمونه‌ی JJ ۴۱۹ (۵۰۱ Ma) و JJ ۵۷۲ (۴۷۷ Ma)، جوان‌تر از سن نسبی بازالت‌های سلطان میدان می‌باشند. به طوری که سن نمونه‌ی JJ ۳۶۲ (۱۹۳ Ma) منطبق بر ژوراسیک تحتانی و سن نمونه‌ی JJ ۵۰۱ (۲۲۵ Ma) منطبق بر تریاس میانی، نمونه‌ی JJ ۵۲۱ (۱۷۷ Ma) منطبق بر ژوراسیک میانی و سن نمونه‌ی JJ ۶۴۵ (۳۰۵ Ma) منطبق بر کربونیفر بالایی می‌باشد.

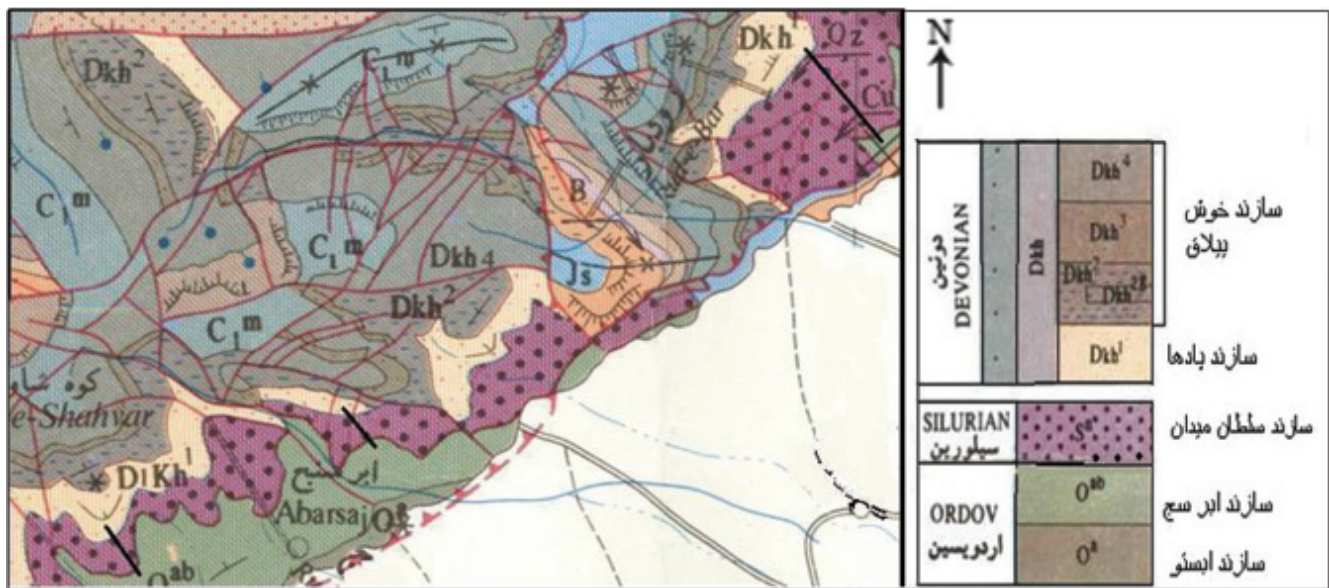
علت این اختلاف به جهت آلتراسیون شدید در نمونه‌ها و تأثیر فرایندهای تکتونیکی بعد ماگماتیسیم و سن زیاد این بازالت‌ها می‌باشد. هر چند عوامل ذکر شده سبب ایجاد سیستم باز در روش پتاسیم-آرگون (K-Ar) می‌گردد. از آنجایی که پتاسیم (K) بیشتر در ساختارهای سیلیکات‌های ورقه‌ای موجود است و این کانی‌ها ساختارهای نسبتاً بازی دارند، لذا آرگون گازی (Ar) تولید شده در اثر تلاشی پتاسیم از سیستم خارج شده و سن‌زمان تشکیل بازالت‌ها دچار اشکال می‌گردد. سن‌های مذکور در جدول ۱ غالباً جوان‌تر از سن فوران این بازالت‌ها می‌باشند. بهترین روش جهت تعیین سن

بازالت‌های سلطان میدان از نظر زمین‌شناسی ایران دارای اهمیت بسزایی می‌باشند. این مجموعه‌ی ولکانیک به صورت یک سازند در زمین‌شناسی ایران معرفی شده است. به دلیل موقعیت استراتیگرافی آن، قرار گرفته بر روی سازند محلی ابرسج (به سن اردوئین) و در زیر سازند پادها (به سن دونین زیرین)، سن نسبی آن، سیلورین تداعی می‌شود. سن مطلق آن، تعیین شده با روش پتاسیم-آرگون (K-Ar) (Jenny 1977)، کامبرین بالایی (۵۰۱ Ma) تا ژوراسیک میانی (۱۷۷ Ma) می‌باشد، که مغایر با موقعیت چینه‌شناسی آن است. وجود آثار کانی‌زایی مس به صورت سولفیدی و اکسیدی در نقاط مختلف این مجموعه و آلتراسیون وسیع هیدروترمال، قابل مشاهده در کلیه‌ی مقاطع میکروسکوپی به صورت کلریتی زاسیون، رابطه‌ی ژنتیک آن آثار با سنگ‌های ولکانیک مافیک بارز می‌باشد. به علت کمبود اطلاعات در باره‌ی مجموعه‌ی ولکانیک مافیک، نیاز به مطالعه و بررسی بازالت‌های سلطان میدان مشهود است. هدف این تحقیق جواب به این پرسش است که چه ارتباطی بین کانی‌زایی مس و بازالت‌های سلطان میدان وجود دارد؟

۲- روش‌های آنالیز

جهت بررسی عناصر اصلی و کمیاب مجموعه‌ی ولکانیک مافیک سلطان میدان از میان بیش از ۱۵۰ نمونه‌ی سنگ و مقاطع میکروسکوپی مطالعه شده، تعداد ۱۴ نمونه که حداقل آلتراسیون را دارا بودند برای آنالیزهای ژئوشیمیایی انتخاب شدند. نمونه‌ها توسط سنگ‌شکن فکی در دانشگاه صنعتی شاهرود به اندازه‌ی دو میلی‌متر خرد شدند. نمونه‌های خرد شده جهت اجتناب از هرگونه آلودگی با آب دی‌یونیزه شسته و در اتوکلاو به مدت ۲۴ ساعت خشک گردیدند. سپس ۱۰۰ گرم از هر نمونه در آسیاب گلوله‌ای با دیواره‌ی آلومینا، پودر شد. پودر حاصل را از الک ۲۰۰ مش ($75 \mu m$) عبور داده و جهت واقعی بودن ترکیب پودر با سنگ اولیه، از هر ۱۰۰ گرم نمونه‌ی خرد شده ۹۵ درصد پودر زیر مش ۲۰۰ تهیه گردید. پس از هر دفعه آسیاب، الک ۲۰۰ مش و گلوله‌ها و بدنه‌ی آسیاب آلومینا توسط آب مقطر و الکل شستشو داده شد تا سرایت آلودگی به دیگر نمونه‌ها به حداقل ممکن برسد. سپس از هر نمونه پودر زیر مش ۲۰۰، هشت گرم به آزمایشگاه Chemex ALS واقع در ونکوور کانادا ارسال گردید. اکسیدهای عناصر اصلی توسط دستگاه ICP-AES و ۲۸ عنصر کمیاب توسط دستگاه ICP-MS آنالیز شدند.

آستانه‌ی دقت برای عناصر اصلی ۰/۰۱ درصد و برای عناصر کمیاب بسته به نوع عنصر بین ۰/۰۱ ppm (عنصر Tb) تا ۱۰ ppm (عنصر Cr) می‌باشد. مقدار LOI توسط روش گراویمتری پس از $1000^\circ C$ به مدت یک ساعت، اندازه‌گیری شد. جهت تعیین اعتبار (Validity) دستگاه نمونه‌ی استاندارد OREAS-45P مورد استفاده قرار گرفت و خطای دستگاه در محدوده‌ی



تصویر ۱- نقشه‌ی زمین‌شناسی ناحیه‌ی مورد مطالعه، سازند سلطان‌میدان با فلش‌های قرمز مشخص است. (برگرفته از چهارگوش ۱/۲۵۰۰۰۰/۱۳۶۹ (شهرایی)). خطوط ضخیم سیاه از پایین به بالا نشانگر پیمایش‌های سه‌گانه‌ی کلودر، ابرسج و چشمه سید می‌باشند.

می‌شود. بافت‌های واریولیتیک و آمیگدال‌های پر شده از کانی‌های ثانوی نظیر کوارتز، زئولیت، پره‌نیت، کلریت، کلسیت، اپیدوت و همچنین کلریتیزه‌شدن شیشه‌ی زمینه‌ی سنگ‌های مافیک و کانی‌های فرومینزین نظیر پیروکسن‌ها و الیون موجود در این سنگ‌ها نشان از وسعت این دگرگونی هیدروترمال دارد (تصویر ۵ و ۶).

در پیمایش‌های مختلف بازلت‌های سلطان‌میدان به یک افق آگلومرای برخورد کرده که دارای قطعاتی از آلکالی‌گرانیت در ابعاد ۵ تا ۵۰ سانتی‌متر می‌باشند، که در مقاطع میکروسکوپی شامل ارتوز پرتیتی، کوارتز و آل‌بیت می‌باشند که فلدسپات‌های آلکالن آن کاملاً کائولینیزه شده‌اند (تصویر ۷). با این‌که کلریتیزاسیون فرایند غالب آلتراسیون در اغلب مقاطع میکروسکوپی

بازالت‌های سلطان‌میدان روش ساماریم-نئودیمیم (Sm-Nd) می‌باشد. زیرا اولاً نسبت ساماریم به نئودیمیم گوشته بزرگتر از پوسته است. لذا نسبت $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ گوشته بالاتر از پوسته می‌باشد. ثانیاً نسبت Sm/Nd سنگ‌های مافیک و اولترامافیک متغیر است، در حالی‌که این نسبت برای سنگ‌های فلسیک تقریباً مشابه می‌باشد. ثالثاً ساماریم و نئودیمیم عناصری غیر متحرک هستند و در فرایندهای آلتراسیون و متامورفیسم حرکت نمی‌کنند. رابعاً نئودیمیم زمان اقامت کوتاهی در آب دریا دارد و نسبت Sm/Nd در آب دریا یکسان نمی‌باشد (White 2005).

۴- یافته‌ها

۴-۱- چینه‌شناسی و پتروگرافی سازند سلطان‌میدان

جهت بررسی تغییرات سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و استراتیگرافی مجموعه‌ی ولکانیک مافیک سلطان‌میدان سه پیمایش از شرق به غرب در این مجموعه انجام گرفت که به ترتیب عبارتند از پیمایش چشمه سید، پیمایش ابرسج و پیمایش دره‌ی کلودر (تصویر ۱ و ۲). مشخصات مکانی و ماکروسکوپی نمونه‌های این پیمایش‌ها در جداول ۲، ۳ و ۴ مشاهده می‌گردد.

در این پیمایش‌ها حدّ زیرین و بالایی سازند سلطان‌میدان رخمون دارد و این سازند به‌طور هم‌شیب بر روی سازند معادل شیرگشت (سازند ابرسج) قرار گرفته و خود توسط سازند پادها به‌طور هم‌شیب پوشیده شده است. ستون استراتیگرافی این سه پیمایش در تصویر ۳ دیده می‌شود. وجود گدازه‌های بالشی در این بازالتهای (تصویر ۴) حاکی از فوران‌های زیردریایی می‌باشد. در مطالعات میکروسکوپی مقاطع نازک سنگ‌های ولکانیک این سازند وجود آلتراسون هیدروترمال و متاسوماتیسم زیردریایی به‌طور وسیع مشاهده



تصویر ۲- تصویر چند طیفی ماهواره‌ی لندست از بازالتهای سلطان‌میدان (ترکیب باندها: R:3, G:5, B:6) فلش‌های قرمز موقعیت بازالتهای سلطان‌میدان را مشخص می‌کنند و خطوط زرد از پایین به بالا نشانگر پیمایش‌های سه‌گانه‌ی کلودر، ابرسج و چشمه سید می‌باشند (مقیاس ۱/۲۵۰۰۰۰).

است، اما گاهی فنوکریست‌های الیوین و کلینوپیروکسن سالم و فاقد آثار آلتراسیون مشاهده می‌شوند (تصویر ۸).

جدول ۳- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ماکروسکوپی سنگ‌شناسی سازند سلطان میدان در پیمایش دره کلودر

نمونه	ارتفاع (m)	طول و عرض جغرافیایی	نوع سنگ	بافت سنگ
Sp.	۲۳۷۹	N۲۶ ۳۳ ۱۵.۹ E۵۴ ۵۰ ۰۱.۴	بازالت کانی‌سازی شده	--
Mal.	۲۵۰۰	N۲۶ ۳۳ ۲۷.۸ E۵۴ ۴۹ ۴۱.۶	بازالت کانی‌سازی شده	--
Pr	۲۵۳۹	N۲۶ ۳۳ ۲۹.۱ E۵۴ ۴۹ ۳۸.۲	الیوین بازالت	پروکسن فیریک
KL۱۳	۲۵۸۲	N۲۶ ۳۳ ۲۱.۲ E۵۴ ۴۹ ۳۵.۷	بازالت	پلازیوکلاز فیریک
KL۱۱	۲۷۸۰	N۲۶ ۳۳ ۲۸.۹ E۵۴ ۴۹ ۳۱.۶	بازالت	پروکسن فیریک
KL۱۰	۲۷۸۲	N۲۶ ۳۳ ۲۹.۵ E۵۴ ۴۹ ۳۲.۲	دیاباز	پلازیوکلاز فیریک
KL۹	۲۷۸۲	N۲۶ ۳۳ ۴۰.۱ E۵۴ ۴۹ ۳۲.۱	بازالت	پلازیوکلاز فیریک
KL۸	۲۷۸۶	N۲۶ ۳۳ ۴۱.۲ E۵۴ ۴۹ ۳۲.۹	الیوین بازالت	پروکسن فیریک
KL۷	۲۷۸۶	N۲۶ ۳۳ ۴۱.۵ E۵۴ ۴۹ ۳۶.۰	ایدوزیت	--
KL۶	۲۷۹۵	N۲۶ ۳۳ ۴۰.۹ E۵۴ ۴۹ ۳۸.۱	بازالت	فیریک-امیکال
KL۵	۲۸۴۳	N۲۶ ۳۳ ۴۰.۵ E۵۴ ۴۹ ۳۸.۸	تراکی آندزیت	فیریک-امیکال
KL۴	۲۸۹۰	N۲۶ ۳۳ ۴۱.۰ E۵۴ ۴۹ ۳۲.۲	تراکی آندزیت	فیریک-وزیکولار
KL۳	۲۸۸۹	N۲۶ ۳۳ ۴۲.۲ E۵۴ ۴۹ ۳۵.۰	الیوین بازالت	پروکسن فیریک
KL۲	۲۸۹۱	N۲۶ ۳۳ ۴۲.۶ E۵۴ ۴۹ ۳۵.۵	تراکی آندزیت	پروکسن فیریک امیکال
KL۱	۲۹۰۵	N۲۶ ۳۳ ۴۲.۷ E۵۴ ۴۹ ۵۲.۱	دیاباز	پلازیوکلاز فیریک

جدول ۴- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ماکروسکوپی سنگ‌شناسی سازند سلطان میدان در پیمایش ابرسج

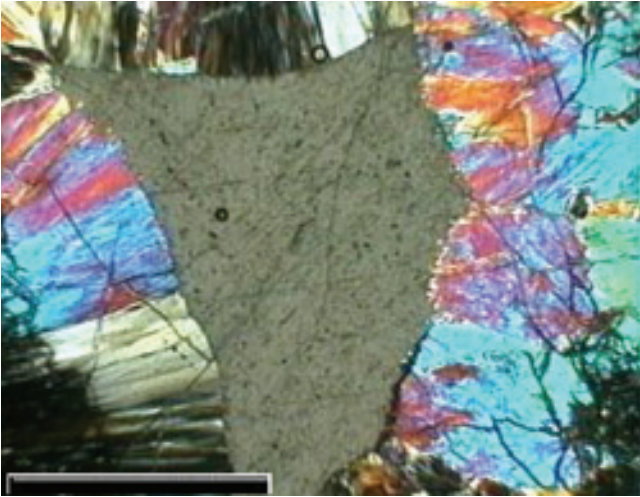
نمونه	ارتفاع (m)	طول و عرض جغرافیایی	نوع سنگ	بافت سنگ
A۱۷	۱۸۳۳	N۲۶ ۳۵ ۱۱.۹ E۵۴ ۵۵ ۲۲.۲	بازالتیک آندزیت	امیکال
S	۱۸۵۱	N۲۶ ۳۵ ۱۶.۶ E۵۴ ۵۵ ۲۸.۲	بازالتیک آندزیت	امیکال
A۱۶	۲۰۰۹	N۲۶ ۳۵ ۲۲.۹ E۵۴ ۵۵ ۲۲.۲	بازالت	فیریک
A۱۴	۲۰۹۶	N۲۶ ۳۵ ۲۲.۹ E۵۴ ۵۵ ۱۶.۱	دیاباز	پروکسن فیریک
A۱۵	۲۰۸۲	N۲۶ ۳۵ ۲۵.۹ E۵۴ ۵۵ ۱۷.۸	بازالت	فیریک
A۱۲	۲۱۲۸	N۲۶ ۳۵ ۲۵.۸ E۵۴ ۵۵ ۱۳.۸	بازالت	فیریک
A۱۱	۲۱۹۱	N۲۶ ۳۵ ۲۶.۹ E۵۴ ۵۵ ۰۹.۴	تراکی آندزیت	فیریک
A۱۰	۲۲۱۱	N۲۶ ۳۵ ۲۶.۷ E۵۴ ۵۵ ۰۷.۵	بازالتیک آندزیت	پلازیوکلاز فیریک
A۹	۲۲۴۸	N۲۶ ۳۵ ۲۷.۰ E۵۴ ۵۵ ۰۴.۸	بازالتیک آندزیت	پلازیوکلاز فیریک
A۸	۲۲۵۸	N۲۶ ۳۵ ۲۷.۱ E۵۴ ۵۵ ۰۳.۵	بازالت	پروکسن فیریک
A۷	۲۲۸۸	N۲۶ ۳۵ ۲۸.۱ E۵۴ ۵۴ ۵۹.۲	الیوین بازالت	پلازیوکلاز فیریک
A۶	۲۲۹۹	N۲۶ ۳۵ ۲۱.۲ E۵۴ ۵۴ ۵۷.۵	بازالت	پلازیوکلاز فیریک
A۵	۲۲۸۸	N۲۶ ۳۵ ۲۲.۷ E۵۴ ۵۴ ۵۷.۷	بازالتیک آندزیت	امیکال
A۴	۲۲۹۱	N۲۶ ۳۵ ۲۴.۹ E۵۴ ۵۴ ۵۷.۱	بازالت	پروکسن- پلازیوکلاز فیریک
A۳	۲۳۰۶	N۲۶ ۳۵ ۲۷.۱ E۵۴ ۵۴ ۵۵.۹	تراکی آندزیت	پلازیوکلاز فیریک
A۱	۲۳۱۰	N۲۶ ۳۵ ۵۹.۲ E۵۴ ۵۴ ۵۵.۳	ماسه سنگ	تخریبی

جدول ۲- موقعیت جغرافیایی و مشخصات ماکروسکوپی سنگ‌شناسی سازند سلطان میدان در پیمایش چشمه سید

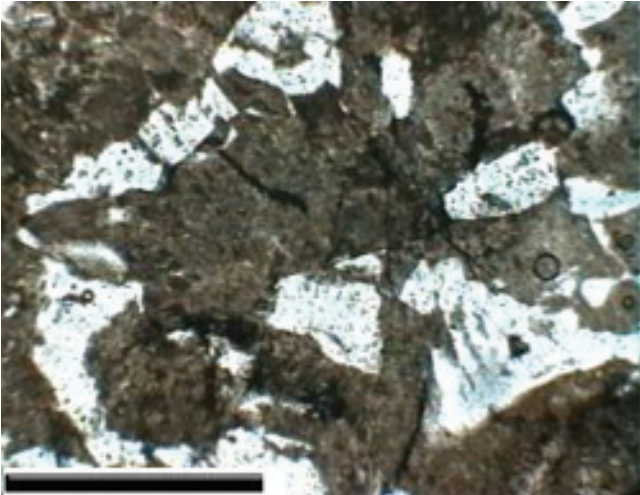
نمونه	ارتفاع (m)	طول و عرض جغرافیایی	نوع سنگ	بافت سنگ
X۷	۱۹۶۲	N۲۶ ۳۹ ۱۹.۶ E۵۵ ۰۰ ۴۵.۶	الیوین بازالت	پروکسن فیریک
X۸	۱۹۷۱	N۲۶ ۳۹ ۱۹.۷ E۵۵ ۰۰ ۴۵.۰	دیاباز	پروکسن فیریک
X۹	۱۹۹۹	N۲۶ ۳۹ ۱۸.۵ E۵۵ ۰۰ ۴۲.۹	ایدوزیت	گرانولار
X۱۰	۲۰۱۳	N۲۶ ۳۹ ۱۸.۰ E۵۵ ۰۰ ۴۲.۷	دیاباز	پروکسن فیریک
X۱۱	۲۰۸۲	N۲۶ ۳۹ ۱۷.۰ E۵۵ ۰۰ ۴۲.۷	توف	فیریک
X۱۲	۲۲۶۰	N۲۶ ۳۹ ۱۶.۵ E۵۵ ۰۰ ۴۲.۲	الیوین بازالت	پروکسن فیریک
X۱۴	۲۳۵۹	N۲۶ ۳۹ ۱۹.۵ E۵۵ ۰۰ ۴۲.۸	الیوین بازالت	پلازیوکلاز فیریک
X۱۵	۲۳۷۹	N۲۶ ۳۹ ۲۱.۰ E۵۵ ۰۰ ۰۱.۸	بازالت	پلازیوکلاز فیریک
X۱۶	۲۵۵۵	N۲۶ ۳۹ ۳۲.۹ E۵۴ ۵۹ ۲۶.۸	بازالت	پروکسن فیریک
X۱۷	۲۵۴۴	N۲۶ ۳۹ ۲۸.۲ E۵۴ ۵۹ ۴۰.۸	بازالت	پلازیوکلاز فیریک
X۱۸	۲۵۶۰	N۲۶ ۳۹ ۳۲.۷ E۵۴ ۵۹ ۴۱.۰	تراکی آندزیت	فیریک
X۱۹	۲۵۲۳	N۲۶ ۳۹ ۵۲.۶ E۵۴ ۵۹ ۳۰.۷	آکالی بازالت	آکالی فلزیات فیریک
X۲۰	۲۵۲۵	N۲۶ ۳۹ ۵۲.۱ E۵۴ ۵۹ ۳۱.۷	بازالت	پروکسن فیریک
X۲۱	۲۴۷۶	N۲۶ ۳۹ ۴۰.۴ E۵۴ ۵۹ ۴۷.۵	آکالی گرانیت	گرانولار
X۲۲	۲۴۳۰	N۲۶ ۳۹ ۳۹.۷ E۵۴ ۵۹ ۵۱.۳	دیاباز	پروکسن فیریک

جدول ۵- آنالیز عناصر اصلی (بر حسب درصد) و عناصر کمیاب (بر حسب ppm) مجموعه‌ی ولکانیک مافیک سلطان‌میدان

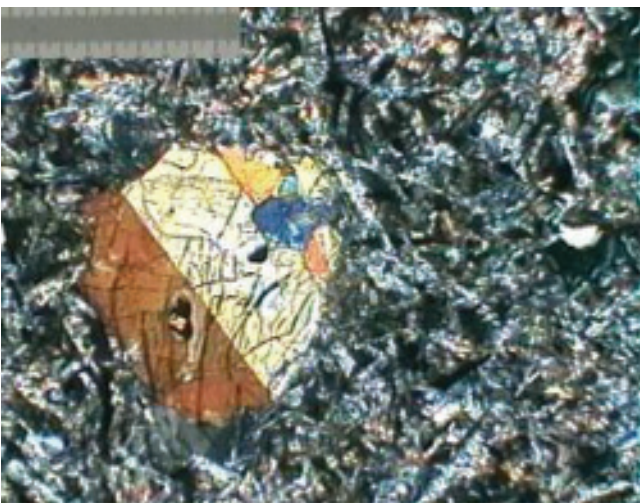
S	X ₈	X ₇	X ₂₂	X ₂₀	X ₁₉	X ₁₈	X ₁₇	X ₁₆	X ₁₅	X ₁₄	X ₁₃	X ₁₁	X ₁₀	شماره نمونه
1851	1971	1963	2430	2525	2523	2379	2544	2555	2379	2359	2430	2038	2013	ارتفاع
52/4	48/6	46/9	49/5	48	54/6	54	49/3	51/2	47/6	49	51/6	52	48/3	SiO ₂
1/85	2/02	2/24	1/86	2/62	2/27	2/18	2/25	3/25	2/57	2/1	1/44	2/91	2/63	TiO ₂
14/5	16/58	16/47	17/33	17/76	17/03	12/83	18/18	14/19	15/41	19/27	17/32	15/26	14/79	Al ₂ O ₃
1/96	1/57	1/48	1/5	1/8	1/48	2/05	1/43	1/89	2/6	1/49	1/31	1/72	1/91	Fe ₂ O ₃
13/04	10/46	9/9	10/02	12/03	9/84	13/68	9/55	12/61	17/32	9/92	8/74	11/46	12/72	FeO
0/17	0/3	0/43	0/27	0/18	0/04	0/11	0/13	0/35	0/09	0/18	0/19	0/72	0/32	MnO
9/45	6/54	7/51	7/03	5/21	1/33	4/51	5/41	5/05	2/74	4/73	6/55	4/94	5/86	MgO
1/72	8/88	11/18	7/65	5/87	1/48	4/27	7/26	6/51	4/66	7/46	7/31	5/01	8/24	CaO
4/48	3/9	2/76	2/94	3/89	2/31	1/29	3/64	3/07	6/46	4/18	3/38	1/66	4/15	Na ₂ O
0/08	0/74	0/83	1/75	2/19	9/2	4/7	2/24	1/32	0/17	1/12	1/76	3/63	0/59	K ₂ O
0/32	0/36	0/26	0/26	0/36	0/42	0/33	0/24	0/45	0/4	0/35	0/26	0/4	0/44	Pr ₂ O ₅
5/27	3/2	6/63	2/77	3/29	2/05	4/46	2/61	2/69	2/15	2/93	3/01	3/65	2/3	LOI
97/7	100	90/7	100	98/7	97/5	97/6	99/1	99/6	99/5	99/7	99/7	100	99/7	Total
56/37	52/71	57/49	55/57	43/57	19/42	37/02	50/25	41/66	22	45/95	57/19	43/46	45/1	Mg#
54/5	165	125	291	388	521	320	274	487	73/9	799	449	1885	190	Ba
31	12/1	20/3	38/2	32/1	90/8	35/1	45	17/8	1/8	14/1	41/4	59	7/8	Rb
44/2	205	183	276	190	75/2	43/1	436	330	82/1	575	331	355	381	Sr
20/2	21/3	23/7	23/1	24/9	29/2	18/3	18/1	36/2	27/9	23/2	21/9	29/5	26/4	Y
141	147	168	131	174	184	124	128	253	210	150	131	195	178	Zr
11/2	17/7	21/6	12/8	18/8	21/9	12/5	12/7	29/2	21/9	19/7	12	19/8	20/1	Nb
1/63	2/92	2/35	1/95	1/48	2/87	1/18	1/11	3/72	2/71	1/99	2/74	2/32	2/34	Th
31	142	72	12	1520	7	7	12	11	15	29	238	35	25	Pb
22/4	19/9	21	20/5	25	13/8	13/4	20/4	25/6	22/4	23	22/2	22/4	22/1	Ga
204	408	224	222	586	91	167	161	283	271	187	387	169	417	Zn
10000<	88	133	552	54	18	46	64	14	13	18	13	70	21	Cu
93	47	48	50	30	4	27	31	18	23	23	59	43	24	Ni
213	250	290	255	271	219	132	228	394	268	293	227	301	339	V
230	150	150	130	50	40	60	50	20	50	30	220	120	50	Cr
3/7	4/2	4/5	3/7	4/7	5/1	3/5	3/5	7/3	5/6	4/2	3/6	5/3	5	Hf
0/12	0/44	0/99	0/46	3/73	0/17	0/09	0/21	0/31	0/02	0/82	0/44	2/06	0/3	Cs
0/8	1/2	1/5	0/9	1/4	1/5	0/9	0/9	2	1/5	1/4	0/8	1/4	1/4	Ta
39/3	39/1	41/2	44/9	36/2	15/2	36	39/1	50/3	22/8	39/9	42/6	44/3	50/9	Co
1/06	0/58	0/46	0/41	0/34	0/73	0/17	0/21	0/91	0/45	0/29	0/59	0/51	0/53	U
1	1	1	2	1	6	1	2	2	1	3	2	1	1	W
1	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	2	2	Sn
12835	14076	15661	12964	18385	16121	15777	15732	23243	18169	14658	10011	20925	18520	Ti
13/1	20/5	20/8	15/2	19/8	65/1	14/9	13/7	31/9	29/8	18/7	16/5	21/4	21	La
25/6	42/9	42/3	32/8	42/5	109/5	31/1	29/2	64/8	59/7	38/9	32/7	45/7	44/7	Ce
2/96	5/45	5/29	4/37	5/89	13/7	4/13	4/03	8/29	7/79	5/16	4/23	5/98	5/91	Pr
11/6	21	21/3	17/7	24/1	53/8	17/2	17/2	33	29/7	20/7	16/9	25/4	24/2	Nd
2/53	4/64	4/97	4/6	5/82	11/4	4/28	4/39	7/78	6/43	4/89	4/08	6/52	5/59	Sm
0/64	1/61	1/45	1/57	2/19	3/35	1/5	1/53	2/61	2/07	1/84	1/5	2/22	1/6	Eu
3/11	4/98	5/66	4/94	6/08	10/8	4/69	4/54	8/61	6/99	5/4	4/66	7/12	6/39	Gd
0/52	0/81	0/91	0/86	1/01	1/55	0/73	0/76	1/38	1/11	0/89	0/79	1/16	1/04	Th
2/9	4/33	5/1	4/62	5/17	6/92	3/93	3/95	7/37	5/94	4/68	4/3	6/12	5/66	Dy
0/69	0/86	0/94	0/92	1/01	1/26	0/75	0/74	1/41	1/13	0/96	0/87	1/16	1/04	Ho
2/14	2/37	2/59	2/38	2/64	3/24	1/99	1/83	3/86	2/93	2/54	2/33	3/13	2/85	Er
0/32	0/32	0/35	0/33	0/35	0/43	0/27	0/25	0/51	0/41	0/36	0/33	0/41	0/38	Tm
2/07	1/97	2/19	1/96	2/04	2/67	1/72	1/52	3/07	2/58	2/15	2/07	2/55	2/37	Yb
0/31	0/29	0/31	0/27	0/27	0/35	0/23	0/22	0/43	0/36	0/3	0/29	0/37	0/32	Lu



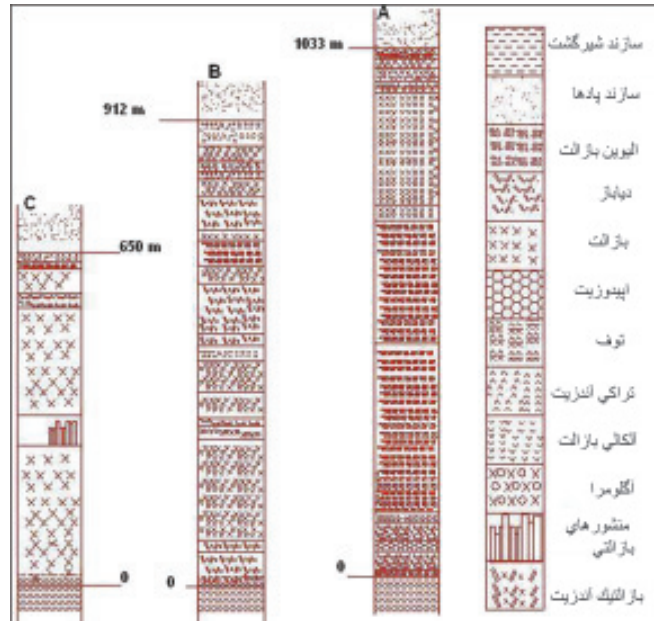
تصویر ۶- حفره‌ی پر شده از پره‌نیت در XPL با فرم شعاعی و بادبزی شکل و رنگ‌های تداخلی اواسط سری دوم، بلور وسط تصویر، کوارتز در حالت خاموشی می‌باشد (مقیاس خطی 1mm).



تصویر ۷- مقطع نازک آلکالی‌گرانیت در XPL، شامل کوارتز (کانی‌های روشن) و آلکالی فلدسپات‌های تجزیه شده به کائولن (مقیاس خطی 1mm).



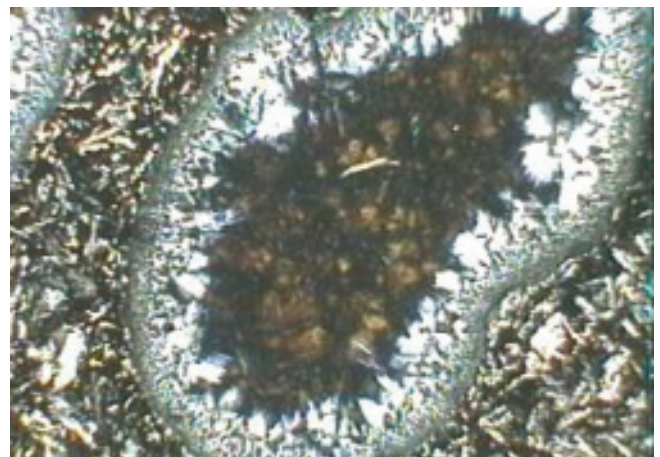
تصویر ۸- فنوکریست یوهدرال کلینوپیروکسن با دوقلوئی ساده به همراه پلاژیوکلاز میکرولیتیک در یک بازالت پرفیریک، (مقیاس خطی 1mm)، XPL.



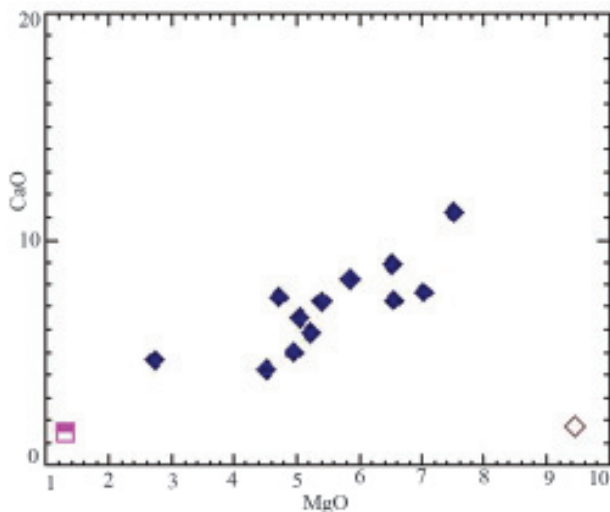
تصویر ۳- ستون سنگ‌شناسی و موقعیت استراتیگرافی سازند سلطان میدان در سه پیمایش از شرق به غرب، A: مقطع چشمه سید (۱۰۳۳ متر)، B: مقطع ابرسج (۹۱۲ متر)، C: مقطع دره کلودر (۶۵۰ متر)، ضخامت بازالت‌های سلطان میدان از شرق به غرب کاهش یافته است.



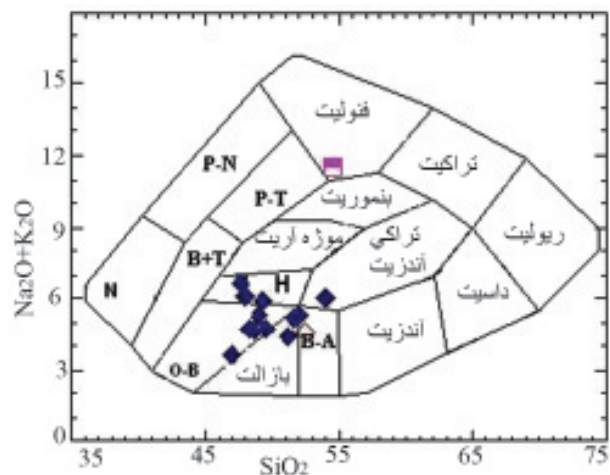
تصویر ۴- گدازه‌های بالشی در بازالت‌های سلطان میدان در ناحیه‌ی خوش بیلاق



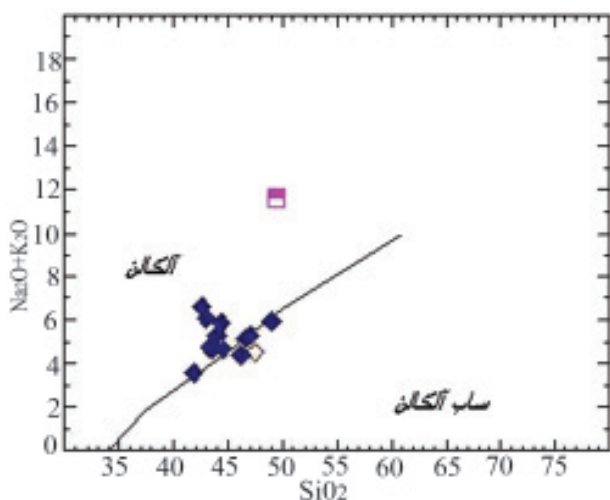
تصویر ۵- حفره‌ی وزیکول پر شده از کوارتز و کلریت (رنگ قهوه‌ای غیر عادی) در یک خمیره از پلاژیوکلازهای میکرولیتیک در بازالت با آلتراسیون هیروترمال، (مقیاس خطی 1mm)، XPL.



تصویر ۹- همبستگی مثبت اکسید منیزیم (MgO) و اکسید کلسیم (CaO) در روند تفریق بازالت‌های سلطان‌میدان، مربع توخالی نمونه S می‌باشد.



تصویر ۱۰- طبقه‌بندی ولکانیک‌های مافیک مجموعه‌ی سلطان‌میدان در نمودار کل آلکالی‌ها در برابر سیلیس، O-B: الیون - بازالت، B-A: بازالتیک - آندزیت، P-T: فنولیتیک - تفریق، P-N: فنولیتیک - نفلینیت، B-T: بازالت و تفریق (Cox et al. 1979).



تصویر ۱۱- مرز جدایش سری‌های آلکان از ساب آلکان (Irvine & Baragar 1971)، نمونه‌های ولکانیک مافیک سلطان‌میدان.

۱۰) نمونه‌ها در محدوده‌های بازالت، الیون بازالت، هاوائیت، تراکی آندزیت و گاهی فنولیت (نمونه‌ی X19) قرار می‌گیرند. در تصویر ۱۱ نمونه‌ها گرایش آلکان دارند، اما با این حال تعدادی در محدوده‌ی ساب آلکان و تولیتی قرار می‌گیرند.

۳-۴ - ژئوشیمی عناصر کمیاب

عناصر کمیاب ولکانیک‌های سلطان‌میدان الگوهای متنوعی از غنی‌شدگی را نشان می‌دهند. عناصر ناسازگار محلول در آب نظیر باریوم، روبیدیم، سزیم، توریم، اورانیم، پتاسیم، سرب و استرانسیم (Th, U, K, Pb, Sr) غنی‌شدگی نشان می‌دهند، در حالی که عناصر ناسازگار نامحلول در آب نظیر نیوبیم، تانتالیم، زیرکنیم، هافنیوم و تیتانیوم (Ba, Rb, Cs, Hf, Ti) نسبت به عناصر محلول در آب تهی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند. این الگو با توجه به آلتراسیون هیدروترمال کف دریا و جابه‌جایی عناصر محلول قابل توجیه می‌باشد (تصویر ۱۲).

در الگوی عناصر نادر خاکی (Rare Earth Element) تفریق شدیدی بین عناصر نادر خاکی سبک (Light Rare Earth Element) و عناصر نادر خاکی سنگین (High Rare Earth Element) مشاهده می‌شود (تصویر ۱۳)، به طوری که نسبت لانتانیم به ایتربیم $(La/Yb)_n$ بین ۵/۲۷ و ۱۶/۵۵ قرار می‌گیرد و نشانه‌ی غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی سبک (LREE) نسبت به کندریت می‌باشد. نسبت (Eu/Eu^*) بین ۰/۸۲ و ۱/۱۲ است که این آنومالی مثبت یوروپیم (Eu) نشانگر عدم تفریق وسیع پلاژیوکلاز است و این موضوع با بالا بودن مقدار اکسید آلومینیم (Al_2O_3) حاکی از پرآلومینا بودن ماگمای والد است. همچنین فراوانی فنوکریست‌های پلاژیوکلاز در سنگ‌ها تأییدی بر این آنومالی مثبت است. تمرکز کم نیکل (Ni) و کروم (Cr) به ترتیب با میانگین ۳۳ ppm و ۸۶ ppm همراه با عدد منیزیمی (Mg#) پایین‌تر در این نمونه‌ها می‌باشد. نمونه‌های با عدد منیزیمی (Mg#) بالاتر نظیر نمونه‌ی X12 ($Mg\# = 57.19$) دارای مقادیر زیادتری نیکل (Ni) (۵۹ ppm) و کروم (Cr) (۲۲۰ ppm) می‌باشند که مشابه ترکیب ماگمای اولیه‌ی سنگ‌های سلطان‌میدان می‌باشند. تمرکز مس (Cu) در نمونه‌ی S به بیش از ۱۰۰۰۰ ppm می‌رسد که در این نمونه سولفیدهای مس نظیر کالکوپیریت مشهود است. سرب (Pb) در دامنه‌ای از ۷ ppm تا ۱۵۲۰ ppm با میانگین ۱۶۳ ppm غنی‌شدگی نشان می‌دهد. روی (Zn) با میانگین ۲۷۵ ppm در دامنه‌ای از ۹۱ ppm تا ۵۸۶ ppm غنی‌شدگی نشان می‌دهد. باریوم (Ba) با میانگین ۴۵۹ ppm در دامنه‌ای از ۷۴ ppm تا ۱۸۸۵ ppm غنی‌شدگی قابل توجهی نشان می‌دهد.

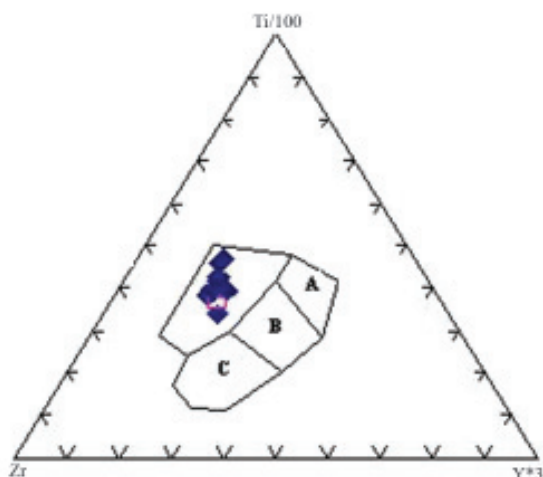
۴-۴ - محیط تکتون ماگمایی ولکانیک‌های مافیک

سازند سلطان‌میدان

در پالئوژئوتیک پیشین قاره‌ی عظیم نیم‌کره‌ی جنوبی موسوم به گندوانا

می‌کند که در این زمان ایران جز حاشیه خشکی گندوانا بوده است (1978 Wensink et al.). از نظر پالئوژئوگرافی فعالیت‌های ماگمایی در پالئوزوئیک با توجه به ردیف‌های چینه‌نگاری ایران به دو محیط تعلق دارند. محیط‌های نیمه قاره‌ای - دریایی کم عمق و به‌طور کلی پلاتفرمی و محیط‌های رسوبی ژرف تا نیمه ژرف (امامی ۱۳۷۹). ممکن است اثر فاز کوهزایی کالدونین که در جاهای دیگر به صورت فشاری عمل کرده در البرز مرکزی به صورت کششی عمل کرده باشد.

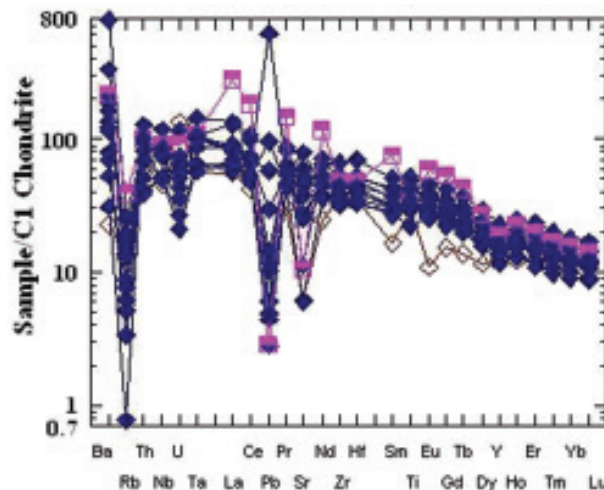
بازالت‌های سلطان میدان در دیاگرام Y-Ti-Zr در محدوده‌ی بازالت‌های داخل ورقه‌ای قرار می‌گیرند (تصویر ۱۴). با توجه به غنی‌شدگی عناصر ناسازگار در این بازالت‌ها (تصویرهای ۱۲ و ۱۳) احتمالاً صعود زبانه‌های ماگمایی (Plume) و بالا آمدن آستنوسفر در این ناحیه سبب بالا رفتن گرادیان حرارتی و ذوب بخشی گوشته‌ی فوقانی جهت تولید ماگمای بازالتی در این ناحیه شده است. از طرفی بالا آمدن پوسته و گنبدی شدن زمین در اثر این بالا آمدگی سبب تولید نیروهای کششی در پوسته و ایجاد کافت (Rifting) و فوران ولکانیک‌های ماگمای سلطان میدان شده است.



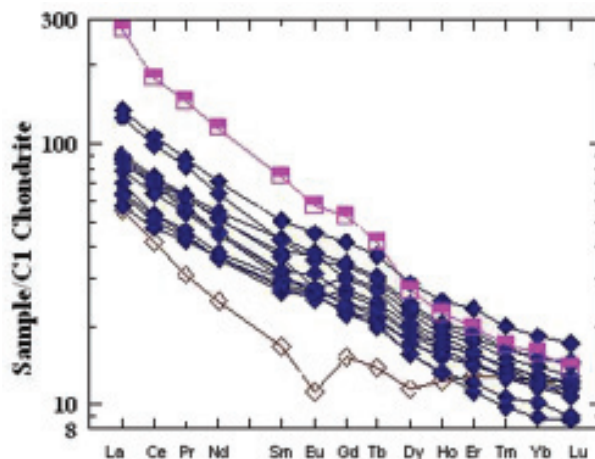
تصویر ۱۴- دیاگرام Y-Ti-Zr (Pearce & Cann 1973) برای ولکانیک‌های ماگمای سلطان میدان که همگی در محدوده بازالت‌های درون ورقه‌ای قرار گرفته‌اند. A: تولیت‌های جزایر قوسی، B: بازالت‌های پشته‌های میان اقیانوسی / تولیت‌های جزایر قوسی، C: بازالت‌های کالک آلکالن، D: بازالت‌های درون ورقه‌ای.

۴-۵- میزالی‌زاسیون در بازالت‌های سلطان میدان

با توجه به آنالیز شیمیایی نمونه‌ی S که بیش از ۱۰۰۰۰ ppm مس دارد و همچنین وجود کانی‌های پراکنده در ولکانیک‌های ماگمای سلطان میدان نظیر پیریت، کالکوپیریت، مالاکیت و اکسیدهای آهن (هماتیت و مانیتیت) (تصویرهای ۱۵، ۱۶، ۱۷) نشان‌دهنده میزبانی این ولکانیک‌ها می‌باشد که آلتراسیون وسیع کلریتیزاسیون (تصویر ۵) را تحمل کرده‌اند و امکان کانی‌سازی ماسیو سولفاید در این ناحیه را فراهم کرده‌اند.



تصویر ۱۲- نمودار عناصر کمیاب نرمال شده با کندریت CI (Sun 1995 & McDonough) برای نمونه‌های ماگمای سلطان میدان



تصویر ۱۳- نمودار عناصر نادر خاکی (REE) نرمال شده با کندریت CI (Sun 1995 & McDonough) برای نمونه‌های ماگمای سلطان میدان. آنومالی منفی یوربیم (Eu) در نمونه‌ی S نشانه‌ی جدایش پلاژیوکلاز می‌باشد.

به صورت یکپارچه شامل آمریکای جنوبی، آفریقا، استرالیا، قطب جنوب، هندوستان و چین بود. در زون ساختاری البرز در پرکامبرین بالایی - کامبرین زیرین نهشته‌های نمک و سنگ‌های تخریبی کم عمق دریایی در اغلب قسمت‌های ایران برجای گذاشته شد. پراکندگی وسیع این رسوبات تخریبی از ورقه‌ی عربستان تا شمال ایران دلالت بر پلاتفرم یکپارچه‌ی آن زمان دارد (Berberian 1983). به دلیل کمبود داده‌ها، بازسازی ایران در پالئوزوئیک پیشین تاکنون انجام نشده است و تأثیر فاز کوهزایی کالدونین در ایران ناشناخته است. نهشته‌های ضخیم رسوبات قاره‌ای در سیلورین - دونین تحتانی (سازند پادها) و فقدان سنگ‌های دونین تحتانی در ایران مرکزی ممکن است نتیجه‌ی حرکات خشکی‌زایی (Epeirogenic) و خروج ایران مرکزی از آب باشد (Berberian 1983). داده‌های پالئومانی‌تیک ناشی از بازالت‌های دونین - کربنیفر (سازند جیروود) کوه‌های البرز ثابت

۴- ۱۵- آلتراسیون هیدروترمال در ولکانیک‌های مافیک سلطان‌میدان

سنگ‌های داغ ماگمایی به شدت خرد شده (Fractured) در تماس با آب سرد دریا موقعیت استثنایی برای انتقال حرارت و جرم جهت ایجاد واکنش‌های دگرگونی هیدروترمال را فراهم می‌کنند. شکستگی‌های کششی در طی سرد شدن و انقباض گدازه‌های زیر دریایی (تصویر ۴) و دایک‌های تغذیه کننده، به همراه ریفتینگ فعال سبب شکستگی‌های عمیق در پوسته‌ی اقیانوسی می‌گردند. شکستگی‌ها اجازه می‌دهند که آب دریا به صورت چرخه‌ای در سنگ‌های داغ حرکت کند و این سازوکار سبب پیشرفت واکنش‌های آبدار شدن کانی‌های انیدر ماگمای اولیه به صورت بخشی یا کلی می‌گردد.

آب گرم منبسط شده به صورت شناور به طرف خارج از شکستگی‌ها حرکت می‌کند و یون‌های خارج شده (Leached) از سنگ‌ها را با خود حمل می‌کند. همچنان‌که این شوره‌ها در امتداد شکستگی‌ها از چشمه‌های داغ کف دریا خارج می‌شوند، دودکش‌های سیاه (Black Smokers) را تشکیل می‌دهند. سولفیدها و سایر مواد جامد در تماس با آب سرد دریا نهشته می‌گردند (تصویر ۱۸). سنگ‌های بازالتی با درجات متفاوتی از غنی‌شدگی سدیم و آب دچار آلتراسیون هیدروترمال می‌شوند. غلظت عناصر کم‌تحرك نظیر منیزیم، آلومینیم و تیتانیم ممکن است در پرتولیت افزایش یابد. این فرایند نتیجه‌ای از حذف قابل توجه کلسیم می‌باشد. لذا بقایای فابریک در این بازالت‌های اسپیلیتی حفظ شده است و ترکیب کانی‌های متاسوماتیک عموماً شامل پلاژیوکلاز سدیم‌دار + کلریت + کوارتز می‌باشد. چرخه‌ی این سیستم تأثیر مهمی در ترکیب شیمیایی آب دریا دارد. ته نشست و منشأ بسیاری از کانی‌ها تحت تأثیر واکنش‌های متقابل آب دریا و پوسته‌ی اقیانوسی (Crust-Sea water) قرار می‌گیرد. اجزاء اضافه شده به اقیانوس‌ها توسط رودخانه‌ها، تنها عامل نهشته‌های اقیانوسی نمی‌باشد. کانی‌هایی نظیر کالکوپیریت در اثر سرد شدن محلول‌های هیدروترمال منشاء گرفته از دودکش‌های سیاه در کف اقیانوس نهشته می‌گردند. عمومی‌ترین تجمعات آلتراسیون سنگ دیواره شامل کلریت، کوارتز، سریسیت، آلیت و اپیدوت می‌باشد (تصویر ۵ و ۱۹). سولفیدهای مس نظیر کالکوپیریت در اثر شرایط اکسیداسیون کف دریا بعداً تغییر فاز داده و به کربنات‌های آبدار مس مانند مالاکیت و آزوریت تبدیل می‌شوند (تصویر ۱۵). وجود آلتراسیون هیدروترمال در ولکانیک‌های مافیک سلطان‌میدان در نمونه‌های دستی با حضور وزیکول‌های پر شده از کوارتز، اپیدوت، کلسیت و گاهی زئولیت که به صورت بافت آمیگدال دیده می‌شوند، بسیار شایع است (تصویر ۲۰).

در مقاطع میکروسکوپی آلتراسیون هیدروترمال به صورت کانی‌سازی کلریت در زمینه‌ی سنگ و در فنوکریست‌های فرومنیزین نظیر پیروکسن و الیون بسیار فراوان مشاهده می‌شود (تصویر ۲۱). علاوه بر این حفرات پر



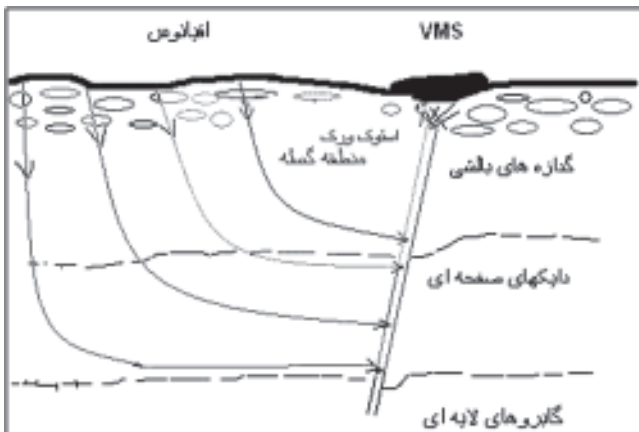
تصویر ۱۵ - کانی‌سازی مالاکیت به میزبانی بازالت سلطان‌میدان



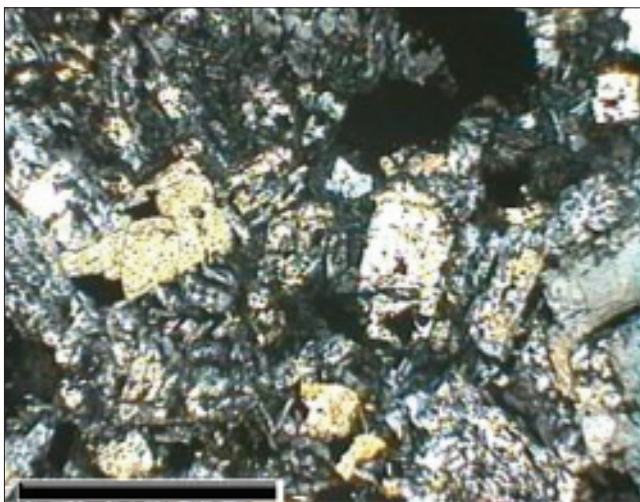
تصویر ۱۶ - کانی‌سازی پیریت، کالکوپیریت و پرنیت در نمونه‌ی S از ولکانیک‌های مافیک سلطان‌میدان



تصویر ۱۷ - کانی‌سازی هماتیت ورقه‌ای به میزبانی ولکانیک‌های مافیک آلتره سلطان‌میدان



تصویر ۱۸- تأثیر چرخه‌ی آب اقیانوس بر پوسته‌ی اقیانوسی و تشکیل نهشته‌های ماسیو سولفاید (Evans 1980).



تصویر ۱۹- آلپیتیزاسیون و سریتیزاسیون در فنوکریست‌های پلاژیوکلاز و ولکانیک‌های مافیک سلطان میدان، (مقیاس خطی ۱mm)، XPL.



تصویر ۲۰- نمونه‌ی دستی از بازالت سلطان میدان که دارای بافت آمیگدال می‌باشد.

شده از کانی‌های ثانوی غالباً شامل کلریت با رنگ تداخلی آبی یا قهوه‌ای غیر عادی (تصویر ۵)، امری شایع در اغلب مقاطع میکروسکوپی می‌باشد. نکته‌ی قابل توجه در ولکانیک‌های مافیک سلطان میدان وجود بدنه‌های اپیدوزیت (Epidosite) (تصویر ۲۲ و ۲۳) است که به صورت هم‌شیب (Concordant) با جریان‌های بازالتی در افق‌های تحتانی این مجموعه‌ی ولکانیک مافیک به طول چندصد متر و به ضخامت حدود ۱۰ متر مشاهده می‌شوند (ستون استراتیگرافی A در تصویر ۳).

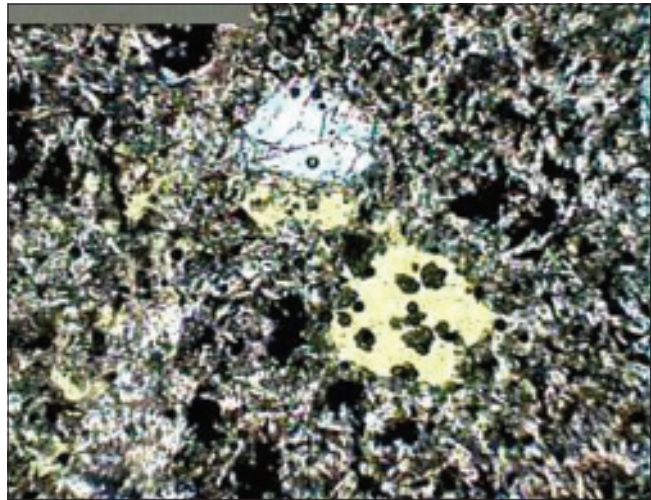
۵- بمث

در حدود ۸۰۰ نهشته‌ی ماسیو سولفاید (Volcanic Massive Sulfide) (VMS)، با ذخیره‌ای بالغ بر ۲۰۰۰۰۰ تن برای هرکدام در سراسر دنیا شناخته شده‌اند. آن‌ها در محیط‌های زیردریایی از سن ۳/۴ میلیارد سال در زمین‌های پرکامبرین استرالیا تا نهشته‌های عهد حاضر مراکز گسترش کف اقیانوسی و در محیط‌های مختلف تکتونیکی یافت می‌شوند (تصویر ۲۴) (2006 Galley et al.). امروزه نهشته‌های ماسیو سولفاید اپی‌ترمال در آتشفشان‌های فعال در نواحی کم عمق و حتی محیط‌های باتلاقی تشکیل می‌شوند. این نهشته‌ها در همه جای دنیا به جز قطب جنوب گزارش شده‌اند. تخمین زده می‌شود تا سال ۲۰۰۲ بیش از ۵ میلیارد تن از کانسارهای سولفیدی از نهشته‌های ماسیو سولفاید تأمین شوند (Franklin & Hannington 2002) که شامل حداقل ۲۲ درصد روی، ۶ درصد مس، ۷/۹ درصد سرب، ۸/۷ درصد نقره و ۲/۲ درصد تولید طلا دنیا می‌باشد (Franklin 1995). لذا وجود پتانسیل چنین نهشته‌هایی در هر نقطه‌ای از جهان بسیار با اهمیت است.

وجود ساخت‌های بالشی (تصویر ۴) در گدازه‌های سلطان میدان و فرایندهای اسپیلیتیزاسیون آن‌ها و آلتراسیون شدید هیدروترمال، بیانگر محیط زیردریایی برای این فوران‌ها می‌باشد. تقریباً ۸۰ درصد نهشته‌های ماسیو سولفاید در ریفت‌های پشت قوسی یا حاشیه‌ی حوضه‌ای یافت می‌شوند (Franklin et al. 1999). در اغلب محیط‌های تکتونیکی این نهشته‌ها در ولکانیک‌های مرتبط با ریفت در محیط کمان (arc) یا پشت کمان (back-arc) اقیانوسی یا نزدیک ورقه‌های همگرایی اقیانوسی با پوسته‌ی قاره‌ای تشکیل می‌شوند. نهشته‌های ماسیو سولفاید در مجموعه‌های ولکانیک مافیک زیردریایی یافت می‌شوند که از سیالات غنی از فلزات ناشی از فرآیند همرفت هیدروترمال کف دریا منشاء می‌گیرند. این نهشته‌ها در توالی‌های ولکانیک- آواری و فراوانی جریان‌های گدازه (Flow-dominated) به همراه یا بدون همراهی سنگ‌های رسوبی یافت می‌شوند. شواهد و مدارک زمین‌شناسی دلالت بر تشکیل این نهشته‌ها در اعماق زیاد (>1000m) و اعماق کم (<1000m) حوضه‌های دریایی می‌باشد (1999 Gibson et al.). این نهشته‌ها با گسل‌های هم‌زمان با ولکانیک (Synvolcanic) و مجاری ولکانیک و سایر ساختارهای هم‌زمان با

ولکانیک همراه می‌باشند. ویژگی خوشه‌ای نهشته‌های ماسیو سولفاید نشانگر توسعه‌ی ترجیحی آن‌ها در مراکز ولکانیک و در حداثه‌های مشخص استراتیگرافی می‌باشد. آن‌ها فقط بخش کوچکی از کل ستون استراتیگرافی کمپلکس ولکانیک میزبان را در برمی‌گیرند. الگوی عناصر کمیاب در این سنگ‌ها نشانگر غنی‌شدگی عناصر لیتوفیل با شعاع بزرگ (LIL) و عناصر سبک کمیاب خاکی می‌باشد. عناصر کمیاب در این بازالت‌ها بین ۱۰ تا بیش از ۱۰۰ برابر کندریت CI غنی‌شدگی دارند (تصویرهای ۱۲ و ۱۳). چنین ماگمای بازالتی در یک محیط زیرآبی (تصویر ۴) و در یک رژیم‌کششی تحت تأثیر آلتراسیون ناشی از چرخه‌ی آب دریا و در یک سیستم همرفت (Convection) قرار گرفته است. آب دریا در شکستگی‌ها و منافذ پوسته نفوذ کرده و گرم می‌شود. در اثر این گرما چگالی آن کمتر شده و به سطوح بالاتر حرکت می‌کند و همزمان آب‌های سرد به اعماق نفوذ می‌کنند. این چرخه‌ی آب دریا در سنگ‌های ولکانیک مافیک، سبب واکنش با سنگ‌های دیواره می‌شود. به دلیل حضور سیل‌های دیابازی و گرمای ناشی از آن‌ها ایزوترم‌های افقی در ترازهای مختلف آب دریا شکل می‌گیرند. هرکدام از این ایزوترم‌ها مسئول نوعی آلتراسیون هیدروترمال در سنگ‌های ولکانیک مافیک می‌باشند (تصویر ۲۵). فرآیند فوق سبب ایجاد افق‌های آلتراسیون در بالای توده‌ی نفوذی نیمه عمیق (سیل‌های دیابازی) و تجمعات مشابه رخساره‌ی آمفیبولیتی در سنگ‌های بلا فصل توده‌ی نفوذی عمیق می‌گردد. در افق‌های بالاتر رخساره‌ی گرین شیت را در سنگ‌های اسپیلیتی ایجاد می‌کند. تجمعات کانی‌شناسی آلبیت، کوارتز، کلریت، اپیدوت و کلسیت در بازالت‌های سلطان میدان معرف افق اخیر می‌باشند. حضور کانی‌های پیریت و کالکوپیریت در نمونه‌ی S و وجود بیش از ۱۰۰۰۰ ppm مس در آنالیز سنگ کل نمونه‌ی S دلالت بر وجود بدنه‌های سولفیدی در این بازالت‌ها توسط فرآیند مذکور دارد. در چنین محیط حرارت بالای که در کف دریا ایجاد می‌شود (حرارت بالای ۳۵۰ درجه‌ی سلسیوس) تجمعات روی-مس-سرب، روی-سرب و مس با مقادیر متغیری از نقره و طلا در نهشته‌های ماسیو سولفاید ممکن است تشکیل گردند. وجود افق‌های ولکانیک غنی از آهن در بازالت‌های سلطان میدان رذپای مناسبی برای یافتن نهشته‌های ماسیو سولفاید در ناحیه می‌باشند. این افق‌ها شامل مواد دانه‌ریز ولکانوکلاستیک، چرت و کربنات است که در طی مرحله‌ی نابالغ (Immature) سیستم هیدروترمال، در حرارت کمتر از ۲۵۰ درجه‌ی سلسیوس عامل ته‌نشست آهن و سیلیسیم (ژاسپ) (تصویر ۲۶) در کف دریا است (Peter 2003).

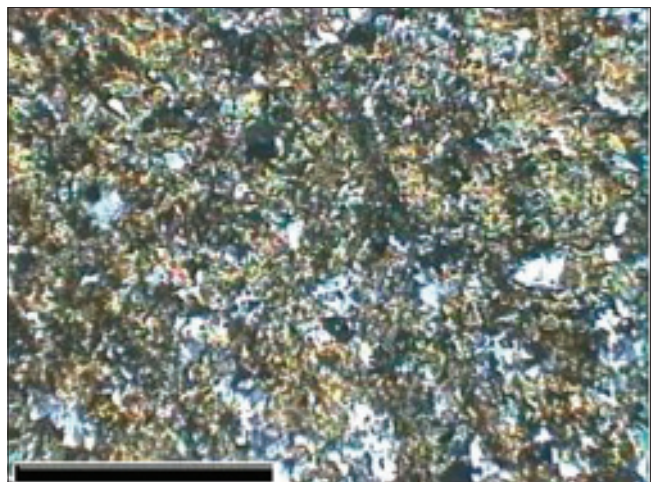
همان‌طور که مدل مذکور پیش‌بینی می‌نماید، تغییرات کانی‌شناسی در نواحی آهن‌دار از اکسید به سمت کربنات و سولفید تغییر می‌کند. این امر نشانه‌ی افزایش درجه‌ی حرارت محلول‌های هیدروترمال به سمت افق‌های تحتانی است. یکی دیگر از اندیس‌های آلتراسیون حرارت بالا در



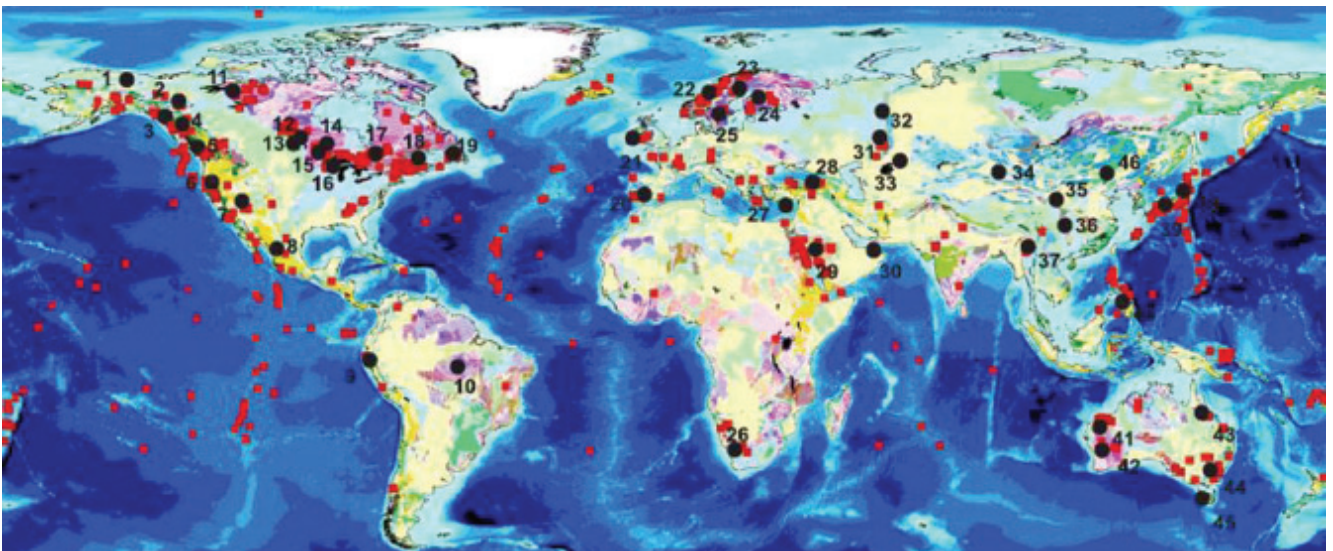
تصویر ۲۱- کلریتیزاسیون در فنوکریست‌های البوین وزمینه‌ی ولکانیک‌های مافیک سلطان میدان، (مقیاس خطی ۱mm)، PPL.



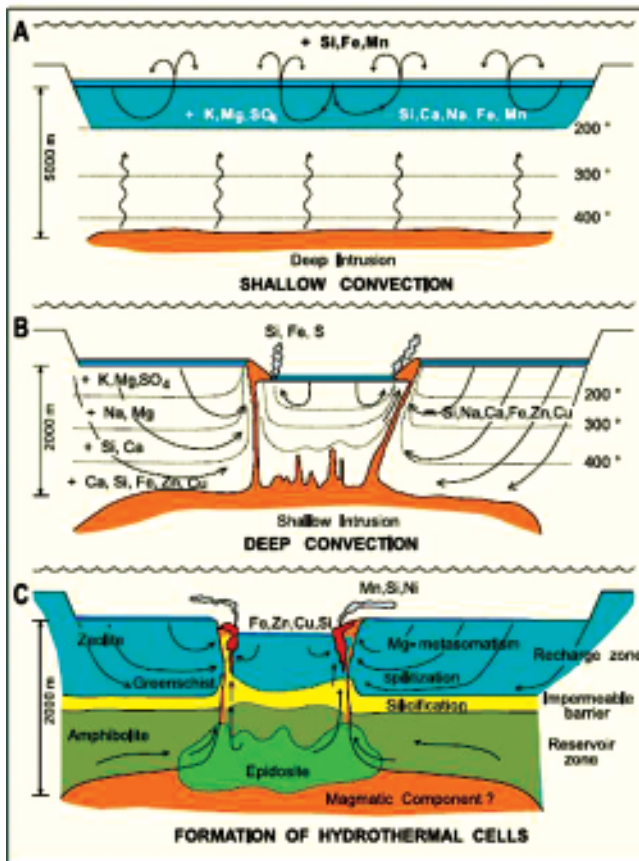
تصویر ۲۲- نمونه‌ای از اپیدوزیت از مقطع چشمه سید ولکانیک‌های مافیک سلطان میدان. بیش از ۹۰ درصد سنگ اپیدوت است و کمتر از ۱۰ درصد سنگ از کوارتز تشکیل شده است.



تصویر ۲۳- مقطع میکروسکوپی نمونه اپیدوزیت که شامل اپیدوت و کوارتز است (مقیاس خطی ۱mm)، XPL.



تصویر ۲۴ - توزیع نهشته‌های قدیم و جدید نهشته‌های ماسیو سولفاید در دنیا (نقاط قرمز رنگ)، تصویر از سایت سازمان زمین‌شناسی کانادا.



تصویر ۲۶ - تشکیل ژاسپ در اثر فعالیت سیستم هیدروترمال در حرارت کمتر از ۲۵۰ درجه‌ی سلسیوس در ولکانیک‌های مافیک سازند سلطان‌میدان.



تصویر ۲۵ - مدل توسعه و تکامل سیستم هیدروترمال در زیر یک ریف‌ت جهت تولید نهشته‌های ماسیو سولفاید در سه مرحله: ۱- تزریق عمیق توده‌ی نفوذی در زیر یک ریف‌ت و تشکیل چرخه‌ی کم عمق و کم حرارت سیستم همرفت (Convection) که سبب آلتراسیون زیر کف پوسته اقیانوسی (Sub-seafloor) می‌شود. ۲- صعود توده‌ی نفوذی به سطوح بالاتر و تولید ماگمای نیمه عمیق (Subvolcanic)، و ایجاد سیستم همرفت عمیق، به طوری که سبب جابه‌جایی عناصر در افق‌های موازی ایزوترم می‌گردد. ۳- توسعه‌ی سیستم بزرگ مقیاس آلتراسیون که کنترل‌کننده‌ی تجمعات آلتراسیون به موازات ایزوترم‌هاست. زون‌های حرارت بالا که در مجاورت توده‌ی نفوذی در حال سرد شدن است سبب جریان سیالات غنی از فلزات و تشکیل نهشته‌های ماسیو سولفاید در کف دریا می‌شود (Galley 1993).

مراجع

امامی، م. ه. م.، ۱۳۷۹، «ماگماتیسم در ایران»، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۶۰۸ص.

شهرابی، م. م.، ۱۳۶۹، «نقشه‌ی زمین‌شناسی چهارگوش ۱/۲۵۰۰۰۰ گرگان»، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

Berberian, M., 1983, "Continental deformation in the Iranian plateau", *Contribution to the seismotectonics of Iran, part 4, Geol. Surv. Iran, Rep. No. 52*, 626p.

Cox, K. G., Bell, J. D. & Pankhurst, R. J., 1979, "The interpretation of igneous rocks", *Allen and Unwin, London*, 450p.

Evans, A. M., 1980, "An introduction to ore geology", *Blackwell Science, Ltd*, 358p.

Franklin, J. M., Hannington, M. D., Barrie, C. T. & Joansson, I. R., 1999, "Tectonic classification of VMS deposits", *Cordilleran Round – Up, MDRU Short Course Notes, Vancouver, B.C.*, 185p.

Franklin, J. M. & Hannington, M. D., 2002, "Volcanogenic massive sulfides through time", *Geol. Soc. Am., 2002 Annual Meeting, Abstracts with Programs, Vol. 34(6)*: 283-287.

Galley, A. G., Hannington, M. D. & Joansson, I. R., 2006, "Volcanogenic massive sulphide deposits", *Geol. Surv. Can.*, 638p.

Galley, A. G., Bailes, A. H. & Kitsler, G., 1993, "Geological setting and hydrothermal evolution of the Chisel Lake and North Chisel Zn–Pb–Ag–Au Massive sulfide deposit, Snow Lake, Manitoba", *Explor. Min. Geol., Vol. 2*: 271-295.

Gibson, H. L., Morton, R. I. & Hudak, G., 1999, "Submarine Volcanic Processes, Deposits and Environments Favorable for the Location of Volcanic-associated Massive Sulfide Deposits", *In: Barrie C. T., & Hannington, M. D. (Eds.), Volcanic-associated massive sulfide deposits: Processes and examples in modern and ancient settings, Rev. Econ. Geol., Vol. 8*: 13-51.

Irvine, T. N. & Baragar, W. R. A. 1971, "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", *Can. J. Earth Sci., Vol. 8*: 523–548.

Jenny, J. G., 1977, "Geologie et stratigraphy de l' Elburz oriental entre Aliabad et Shahrood, Iran", *PhD. Thesis, Genève*, 320p.

McDonough, W. F. & Sun, S., 1995, "The composition of the earth", *Chem. Geol., Vol. 120*: 228-230.

Pearce, J. A. & Can, J. R., 1973, "Tectonic setting of basic volcanic-rocks determined using trace-element analyses", *Earth and planet. Sci. Lett., Vol. 19 (2)*: 290–300.

ولکانیک‌های سلطان‌میدان حضور بدنه‌های وسیع اپیدوزیت (Epidosite) است (تصویر ۲۲ و ۲۳) که به صورت لایه‌ای (Stratified) در اثر آلتراسیون تقریباً موازی با سنگ‌های دربرگیرنده (Conformable-Semi) می‌باشند (تصویر ۲۵) که احتمالاً در روی توده‌ی نفوذی عمیق تحتانی قرار گرفته‌اند (Spooner & Fyfe 1973).

۴- نتیجه‌گیری

بنا بر شواهد ذیل احتمال حضور نهشته‌های ماسیو سولفاید در ولکانیک‌های مافیک سازند سلطان‌میدان امکان‌پذیر است:

(۱) محیط تکتونیکی مرتبط با ریفت و فوران زیردریایی ولکانیک‌های مافیک به همراه اسپیلیتیزاسیون این ولکانیک‌ها.

(۲) وجود سولفیدهای مس (نظیر کالکوپیریت و برنیت) و پیریت در نمونه‌ی S (با بیش از ۱۰۰۰ ppm مس) در ولکانیک‌های مافیک سازند سلطان‌میدان در ناحیه‌ی ابرسج.

(۳) وجود دوسری از تجمعات کانی‌شناسی آلتراسیون هیدروترمال: الف) آلتراسیون هیدروترمال حرارت بالا (بیش از ۳۵۰ درجه‌ی سلسیوس) که اپیدوزیت‌های وسیع در ناحیه‌ی چشمه سید معرف این نوع آلتراسیون است. ب) آلتراسیون هیدروترمال حرارت پایین (کمتر از ۲۵۰ درجه‌ی سلسیوس) که مجموعه‌ی کانی‌شناسی کلریت، کوارتز، آلبیت و کلسیت معرف این نوع آلتراسیون هستند.

(۴) وجود افق‌های غنی از آهن و سیلیس (هماتیت و ژاسپ) که بر روی مراکز هیدروترمال حرارت بالا در مجاورت سیل‌های دیابازی ولکانیک‌های مافیک سازند سلطان‌میدان قرار گرفته‌اند.

(۵) حضور وسیع کانی‌های کربنات آبدار مس نظیر مالاکیت و آزوریت در مناطق کلودر، ابرسج و نگارمن، معرف پتانسیل بالای مس در این ولکانیک‌ها است که در اثر فرآیندهای بعدی در ترازهای بالاتر در اثر اکسیداسیون، سولفیدهای مس به کربنات تغییر فاز داده‌اند.

(۶) بالا بودن آنومالی روی و به‌ویژه سرب که در نمونه‌ی سنگ کل X20 تمرکز سرب به ۱۵۲۰ ppm می‌رسد (جدول ۵).

Peter, J. M., 2003, "Ancient iron-rich metalliferous sediments (iron formation their genesis and use in the exploration for stratiform base metal sulphide deposits, with examples from the Bathurst Mining Camp", *In: Lentz D. R., (Ed.), Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Secular Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments, GEO text 4: St. John's, Geological Association of Canada, Vol. 108: 145-173.*

Singer, D. A., 1995, "World-class base and precious metal deposits-a quantitative analysis", *Econ. Geol., Vol. 90: 88-104.*

Spooner, E. T. C. & Fyfe, W. S., 1973, "Sub-seafloor metamorphism, heat and mass transfer", *Cont. Min. Petro., Vol. 42: 287-304.*

Stampfli, G., 1978, "Etude geologique generale de l' Elborz oriental aus de Gonbad-e Qabus Iran N-E", *PhD. Thesis, Genève, 345p.*

Wensink, H., Zijderveld, J. D. A. & Varekamp, J. C., 1978, "Paleomagnetism and ore mineralogy of some basalts of the Jeyrud Formation of late Devonian-early Carboniferous age from the southern Elburz, Iran", *Earth Planet. Sci. Lett., Vol. 41 (4): 441-450.*

White, W. M., 2005, "Geochemistry", *E-Book, Cornell University, NY, USA, 701p.*