پتـــرولوژی، سال پنجم، شماره هفدهم، بهار ۱۳۹۳، صفحه ۶۹–۸۲ تاریخ دریافت: ۱۳۹۱/۰۷/۱۲ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۰۷/۲۱

پتروگرافی و پتروژنز اسکارنهای هشت کوه خضر آباد یزد

جواد قانعی اردکانی ^{۹۱}*، حسین مهدیزاده شهری ^۱، علی درویشزاده ^۳ و محمدعلی مکیزاده ^۴ ^۱ گروه پترولوژی و زمین شناسی اقتصادی، دانشگاه علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران ^۲ گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران ۱۹۳۹۵–۹۶۹۷، ایران ^۳ گروه زمین شناسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد لاهیجان، لاهیجان، ایران ^۴ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیدہ

توده نفوذی گرانیتوئیدی خضرآباد در شمال غرب استان یزد و در کمان ماگمایی ارومیه-دختر واقع شده است. نفوذ این توده در سنگ میزبان آهکی کرتاسه (سازند تفت) باعث اسکارنسازی در هشت کوه با مجموعه کانیایی زیر شده است: Garnet+Clinopyroxene+Epidote+Tremolite-Actinolite+Chlorite+Quartz

مطالعه همیافتی کانی ها نشان می دهد که همیافت گارنت-پیروکسن با بیشترین فراوانی پایه کانیایی اسکارن را شکل داده، گارنت و پیروکسن از دیدگاه بافتی ارتباط تنگاتنگی با هم دارد. مطالعه دقیق روابط پاراژنتیک کانیهای اسکارن به وضوح مراحل مختلف را در تکوین سامانه اسکارن نشان می دهد. به گونهای که دو مرحله بنیادی در زایش کانیها تشخیص داده شده است. بنابراین، می توان اسکارن هشت کوه را یک اسکارن چندزایی (polygenic) در نظر گرفت. شیمی کانیها، گارنت را متمایل به قطب گروسولار و پیروکسن را از نوع اوژیت نشان می دهد و اوج دگرگونی، شکل گیری پیروکسن در گامه پیشرونده اسکارن را باعث شده و به دنبال آن تشکیل گارنت اتفاق افتاده است. وجود منطقه بندی در گارنتها، جانشینی دوره ای Al-Fe⁺³ موجود در سیال را حین تشکیل این کانی نشان می دهد. حاکم شدن شرایط اکسیدان طی تبلور سیال، سبب ناپایداری پیروکسن (پایین بودن فوگاسیته اکسیژن) و رشد گارنت های آندرادیت در سامانه اسکارنی در 550 درجه

واژههای کلیدی: روابط پاراژنتیک، اسکارن چندزایی، گرانیتوئیدی خضرآباد، اسکارن هشت کوه

کمان واقع شده است (شکل ۱). توده نفوذی بزرگ خضر آباد از جنس آلکالی گرانیت تا گرانودیوریت تنها رخنمون توده آذرین در منطقه است که سازندهای رسوبی تخریبی-کربناته پالئوزوئیک و

کمان ماگمایی سنوزوئیک ایـران مرکـزی موسـوم بـه ارومیـه-دختـر بـا امتـداد NW-SE از اسـتانیـزد عبـور مـیکنـد و منطقـه بررسـی شـده نیـز در ایـن

* ghanei@shahroodut.ac.ir, ghaneijavad@pnu.ac.ir

مقدمه

(Ghanei and باقی آباد Mackizadeh, 2007) (Zahedi and و خوت Mackizadeh, 2011) (Zahedi and و خوت Mackizadeh, 2011) (2012 و البحام شده است، اما تاكنون منبعی راجع به گزارش یا مطالعه اسکارنها هشت كوه در اطراف توده خضر آباد مشاهده نشده است، بنابراین ضروری به نظر می رسد این رخداد اسکارن و كانی شناسی آن به ادبیات زمین شناسی ایران معرفی شود.

کرتاسه را قطع کرده و سبب توسعه اسکارن-هورنفلس شده است (شکل ۱). اسکارنها از دیرباز مرود توجه زمین شناسان برای بررسیهای Pirajno, 1991 بیوده است (Pirajno, 1991) کانسارهای گرمایی بوده است (Robb, 4 Lentz, 1998 Ray and Webster, 1997) Robb, 4 Lentz, 1998 Ray and Zaw, 2008 2005 که مطالعاتی در خصوص اسکارنهای استان یزد از جمله: مناطق شرق شیرکوه (Ghanei and





شکل ۱- موقعیت اسکارن هشت کوه در ارتباط با نوار ماگماتیسم ارومیه-دختر (Aghanabati, 1998). راههای دسترسی به توده گرانیتوئیدی خضرآباد (+) و نقشه زمینشناسی ساده منطقه بررسی شده را نشان میدهد.

زمينشناسي منطقه

قدیمی ترین سنگهای منطقه خضر آباد سازند کهر است که پی سنگ منطقه را تشکیل داده و عموماً شامل: شیل، ماسه سنگ و سیلستون به رنگ سبز و سبز مایل به خاکستری است. به طور فرعی لایه های دولومیتی قهوهای متمایل به زرد مجموعه سنگهای وابسته به سازند کهر را همراهی می نماید که توسط سنگهای دولومیتی چرتدار سازند سلطانیه پوشیده شده است (شکل ۱). توده های گرانیتوئیدی خضر آباد به جز در ناحیه علی آباد دامک که آهکهای تریاس را دگرگون کرده و با گرانیت شیر کوه کنتاکت دارد در دیگر نواحی، درون سازند کهر و تفت نفوذ نموده و باعث اسکارن زایی و کانه زایی شده است (شکل ۱).

در جنوب مزرعه هشت کوه سنگ های اصلی برای تشکیل دگر گونی مجاورتی سنگ های آهکی توده ای اربیت ولین دار سازند تفت است که در برخی نقاط دول و یتی نیز شده اند (شکل های ۱ و ۲-A). مشاهدات صحرایی نشان می دهد که بیشتر اسکارن ها ساخت توده ای دارد. همچنین، رخنمون محدودی از ساخت نواری (banded skarn) نیز تا مدودی محفوظ مانده است که شاید نشان از لایه بندی سنگ آهک اولیه بوده که بعد از دگر گونی هنوز حفظ شده است (شکل ۲-B).



روش انجام پژوهش

مرحله نخست پیمایش صحرایی برای شناسایی محدوده اسکارنی شده انجام شد و در مرحله بعد چهار ایستگاه که شامل کامل ترین و ضخیم ترین رخنمون اسکارن بود برای بررسیهای صحرایی دقیـقتـر و نمونـهبـرداری انتخـاب شـد. بررسـیهـای صحرایی شامل: بررسی های ارتباط اسکارن با توده نفوذی، بافت و ساخت در نمونه دستی، شناسایی پهنههای اسکارن و ارتباط آنها بوده است. از نمونههای برداشت شده تعداد ۳۲ مقطع نازک میکروسکوپی تھیہ و با میکروسکوپ پلاریزان Olympus مـدل BX-60 مطالعـه و تصاوير با دوربـين Olympus مــدل DP تهيــه شــد. تحليــلهـاى مایکروپروب توسط دستگاه Cameca مدل SX-100 در دانشگاه اوکلاهامای آمریکا انجام شد. در هنگام تحليلها، ولتار شتاب دهنده برابر با 15KV و شدت جریان 15nA بوده است. برای پردازش داده ها و رسم نمودارها از نرمافزار Minpet 2.02 استفاده شده است. برای تفکیک میرزان⁺⁴ Fe از روش پیشینهادی Droop (۱۹۸۷) استفاده شده است.





شکل ۲- تصاویر صحرایی از: A) ارتباط توده گرانیتوئیدی خضرآباد (KhG) با سازند تفت (TF) و اسکارنزایی (Sk)؛ B) ساخت نواری در اسکارن هشتکوه (غرب خضرآباد)

اکتینولیت و فرواکتینولیت شدت چند رنگی به میزان محتوی آهن بستگی دارد و بیشتر همراهی آن به شکل محدود با کوارتز و کلسیت است (شکل ۴-A). در این مورد ادخالهایی از ترمولیت-اکتینولیت در کوارتز و کلسیت بافت پویی کیلوبلاست را شکل داده و تـداعی کننـده مرمـر ترمولیـت-اکتینولیـتدار است. یادآوری می شود این بافت بسیار محدود است و تنها در فضای خالی بین بلورهای پیروکسن-گارنت توسعه یافته است. این کانی در هنگام رخداد دگرگونی برگشتی در حال تبدیل به کلریت بوده که همیافتی نزدیک و مرز ناپایدار ترمولیت-اکتینولیت با کلریت گویای این رخداد است. علاوه بر این، كلريتها به شكل دروغين (pseudomorph) قالب ترمولیت-اکتینولیتها را اشغال کردهاند. (Delvigne) (B-۴ (شـــکل B-۴) و هنــوز بقايــای ترموليــت-اکتینولیت به شکل بازمانده (relict) در توده كلريتها نيز ديده مي شود.

کوارتز به شکل شکاف پّر کن (filling) یا بافت روزنهای (interstitial) با بلورهای گارنت، کلسیت و اپیدوت (کمتر) دیده می شود (شکل ۵–۸). همچنین، کوارتز به شکل رگچهای شکستگیهای گارنت را پر کرده یا این که پس از برشی شدن گسترده گارنتها آنها را سیمانی نموده است. بدیهی است خاستگاه این کوارتز از سیلیس اضافی انتشار یافته در محیط اسکارن بعد از شکل گیری کانی های کالکسیلیکات است که در آخرین مرحله اسکارن

اپیدوت ارتباط تنگاتنگی با گارنت داشته و به صورت پوششی بر روی گارنت (over growth) و یا پُرکننده قطعات برشی گارنتها مشاهده می شود (شکل ۵–B). مرز ناپایدار آن با گارنت نشان می دهد که باید به خرج گارنت به وجود آمده باشد (شکل ۵–C). **پتروگرافی** مجموعـه کانیـایی زیـر در اسـکارن هشـ*ت کـ*وه دیـده میشود:

Garnet+Pyroxene+Tremolite-

Actinolite+Epidote+Chlorite+Quartz+Calcite

بلورهای گارنت و پیروکسن (به ترتیب با۵۰ و ۴۰ درصد حجمی) عمده سازنده اسکارن است و می توان گفت که بقیه کانی ها فرعیاند. بلورهای کلینوپیروکسن نیمه شکل دار تا بی شکل بیشتر به شکل پویی کیلوبلاست درون گارنت دیده می شود. بیشتر دانه ریزتر و پراکنده تر از گارنت هستند و در همیافتی نزدیک با گارنت است. هیچ موردی از میافتی نزدیک با گارنت است. هیچ موردی از تجمعات گارنت دیده نمی شود (شکل ۳–۸). حواشی گردشیده و انحلالیی (resorbed margins) پیروکسین ها و شکل نامنظم و آمیبی آنها درون گارنت نشان دهنده تغییرات فیزیکوشیمیایی سیال کانی ساز ضمن تحول سامانه اسکارن است (شکل ۳– 8).

گارنت ها کانی عمده اسکارن هشت کوه را تشکیل دادهاند. این کانی ها همسانگرد تا ناهمسانگرد است و با ماکل پیچیده و ساختار منطقهای بهوضوح دیده می شود و ادخال های پیروکسن درون آنها به مقدار زیاد است (شکل ۳-B).

در برخی موارد ادخال هایی از کلسیت با حواشی گردشده نیز درون گارنت مشاهده می شود که به نظر می رسد بازمانده جذب نشده سنگ آهک مرمری شده میزبان باشد.

ترمولیت - اکتینولیت به عنوان کانی فرعی با رخداد محدود دیدهمی شود که با داشتن چند رنگی واضح سبز کمرنگ تا تیره و مایل به آبی کمرنگ (PPL) به نظر میرسد درآن عضو اکتینولیت غالب باشید. Deer و همکیاران (۱۹۹۱) معتقدنید در www.SID.ir



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی از اسکارن هشتکوه: A) رخداد پیروکسنهای نیمه شکلدار در گارنتهای نسل دوم (بافت پـوییکیلوبلاسـتیک). مـرز پیروکسنها با گارنت میزبان تا حدودی واضح است و کمتر خورده شدهاست (XPL)؛ B) پیروکسنها درون گارنت به وضوح مرز ناپایدار نشان میدهد و خردههای تحلیل نرفته به شکل بازمانده (relict) دیده میشود (XPL). علایم اختصاری نام کانیها از Kretz (۱۹۸۳) اقتباس شده است.





شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از اسکارن هشتکوه: A) ترمولیت- اکتینولیت درون کوارتز و کلسیت که این مجموعه به طـور محلـی گسـترش دارد و پرکننده فضای خالی مجموعه کانیهای اصلی اسکارن یعنی گارنت-پیروکسن است (PPL؛ B) ترمولیت-اکتینولیت به شکل بازمانده که از اطراف توسط کلریت احاطه شده است. در اینجا ترمولیت-اکتینولیت در ابتدا پرکننده فضای باز بین گارنتهای ناهمسانگرد بوده است (XPL).



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از: A) مرحله تأخیری (روزنهای) کوارتز (PPL)؛ B) اپیدوت به صورت مرحله پرکننده فضای بین خردههای گارنت و C) اپیدوتی شدن فراگیر گارنتها (XPL). علایم اختصاری نام کانیها از Kretz (۱۹۸۳) اقتباس شده است.



www.SID.ir

A

رشد کند بلور گارنت میتواند شرایط لازم برای تأمین یون ⁴³A را از تجزیه کانیها آماده نماید. این گونه غنیشدگی آلومینیم در سیالات گرمایی شبیه به فرآیندهای دراز مدت آبشویی (leaching) کاتیونی سینگهای حاوی آلومینوسیلیکاتها در زمان زمینشناسی است.

سازه گروسولار در گارنتهای پهنه اسکارن بررسی شده بیشترین حجم را دارد. همان گونه که گفته شد IA در میان عناصر موجود در سیالات گرمابی دارای کمترین پویایی است. برای تأمین IA مورد نیاز لازم است سنگ اولیه یک آهک مارنی بوده باشد. بنابراین، مواد مورد نیاز برای رشد گروسولار در محیط قابل تأمین است.

تبلور مجدد این سنگ آهک اولیه منجر به تشکیل مرمر با بافت گرانوبلاستیک یا پولی گونال خواهد شد. این تبلور مجدد شاید در ابتدای شوک حرارتی دگرگونی اتفاق افتاده باشد. انتشار در امتداد مرز دانههای کلسیت این مرمر به راحتی انجام مرز دانههای کلسیت این مرمر به راحتی انجام میشود (Shelley, 1993). فرآیند انتشار موجب (nucleation and ایز (Shelley در امتدای های دانهای (nucleation and ته کارنتها crystal growth) زمینه کلسیتی با مدل (۱۹۸۷) خواهد شد.

از شواهد فوق می توان نتیج و گرفت که: الف) سنگهای اطراف و میزبان اسکارن در رخنمون صحرایی مرمرها و سنگهای آهکی با تبلور مجدد بخشی است. ب) در مشاهدات میکروسکوپی همان گونه که ذکر شد بخشهایی از میزبان مرمر به شکل بازمانده (دانههای گرد شده) در گارنت دیده می شود. این گونه فرآیند معمولاً هنگام دگرسانی از نوع نشری (pervasive) روی می دهد. بنابراین، هر دو فرآیند انتشار و تراوش (infiltration) در انتقال مواد برای شکل گیری گارنتها نقش داشته است مواد برای شکل گیری گارنت ا شـواهد میکروسـکوپی نشـان مـیدهـد کلسـیت در چند شکل متبلور شده است:

الف) به عنوان جانشینی که حاصل دگرسانی بخشی پیروکسنها است. این گونه دگرسانی تا جانشینی کامل پیروکسن توسط کلسیت نیز در مواردی دیده شده است (شکل ۶-A).

ب) کلسیتها در بیشتر موارد درشتدانه بوده، مرحله روزنهای تشکیل داده، با ماکلهای واضح مشخص است (شکل 8-B).

ج) کلسیت فضای خالی خردههای برشی گارنت-کوارتز را نیز پر کرده است (شکل ۶-C).

مینرالشیمی اسکارن

برای شناخت ترکیب شیمیایی کانیهای اساسی سازنده اسکارن از تحلیلهای کمی (WDS) توسط دستگاه دستگاه تجزیه ریزکاو الکترونی استفاده شده است (جدول ۱). ترکیب شیمیایی گارنتها نزدیک به قطب گروسولار است (شکل ۲-A و جدول ۱).

این گارنت ها نزدیک به میدان اسکارن های حاوی کانسار آهن (Meinert *et al.*, Meinert, 1998) کانسار آهن 2005) قرار گرفتهاند (شکل ۲-B). دادههای حاصل از تجزیه پیروکسن ها نیز در جدول ۲ آمده است. بر مبنای طبقهبندی Morimoto و همکاران (۱۹۸۸)

پیروکسنها در میدان اوژیت قرار می گیرد (شکل ۸). Al⁺³ در ساختار گارنتهای منطقه نقش عمدهای دارد. این عنصر، عضو گروه HFSE الالالات گرمابی این Strength Element) است. در سیالات گرمابی این عنصر به سختی قابل انتقال است. بنابراین، برای تأمین آن می توان یک منشأ محلی و نزدیک را در سنگ میزبان اسکارن (کانیهای آلومینیم دار نظیر: رس ها یا سنگ آهک مارنی) در نظر گرفت (Masudy *et al.*, 2005).

نسبت بالای آب به سنگ (water/rock) و نرخ





شکل ۶- تصاویر میکروسکوپی از: A) جانشینی بخشی یک پیروکسن توسط کلسیت؛ B) رخداد کلسیت با ماکلهای واضح ضربدری؛ C) بافت برشی از خردههای کوارتز (کمتر) و گارنت در زمینه کلسیت که ناشی از مرحله برشی شدن نهایی و آنگاه تشکیل کلسیت است (XPL). علایم اختصاری نام کانیها از Kretz) اقتباس شده است.





شکل A-۷) نمودار توزیع ترکیب تجزیههای نقطهای الکترون مایکروپروب گارنتهای هشتکوه خضرآباد؛ B) مقایسه آن با اسکارنهای معدنی جهان (Meinert , 1998).

S1-1

Grt

37.72

0.77

15.36

0.00

0.81 9.36

0.78 0.01

34.50

0.000.00

99.31 2.943

0.045

1.412 0.000

0.612

0.051

0.052

0.001

2.884

0.000

0.000

0.04

65.89

1.73

1.73

30.56

0.005

0.052

0.002

2.873

0.000

0.000

0.08

66.91

1.85

1.75

29.34

0.031

0.055

0.001

2.873

0.000

0.000

0.04

65.98

1.06

1.89

30.86

0.068

0.058

0.001

2.859

0.000

0.000

0.04

66.63

2.27

1.96

29.05

Sample Mineral

SiO₂

 TiO_2

 Al_2O_3

 Cr_2O_3

Fe₂O₃

FeO MnO

MgO CaO

Na₂O

 K_2O Total

Si

Ti Al

Cr Fe(3+)

Fe(2+)

Mn Mg

Ca

Na

Κ

%XPy

%XGr

%XAlm

%XSp %XAndr

مول ساختاری	ه و محاسبه فر	ئارن هشت كو	گارنت در اسک	از ۱۰ نمونه	يزكاو الكتروني	ستگاه تجزیه ر	۱– تحلیل د	جدول
S1-2	S1-3	S1-4	S1-5	S2-1	S2-2	S2-3	S2-4	S2-5
Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	rt	Grt
37.85	37 61	37.67	37.35	37.67	37.79	37.45	37.86	37.78
0.59	0.56	0.68	0.53	0.20	0.17	0.16	0.15	0.01
15.77	15.82	15.70	15.75	16.03	16.20	15.97	15.67	16.05
0.00	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00
0.79	0.80	0.79	0.79	0.23	0.80	0.82	0.82	0.83
9.04	9.18	9.13	9.09	9.84	9.20	9.41	9.41	9.55
0.79	0.84	0.88	0.81	0.79	0.81	0.84	0.86	0.86
0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00
34.43	34.40	34.12	34.46	34.46	34.44	34.43	34.42	34.34
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00
99.32	99.26	98.99	98.80	99.22	99.43	99.09	99.39	99.18
2.948	2.931	2.946	2.923	2.934	2.935	2.921	2.947	2.943
0.035	0.033	0.040	0.031	0.012	0.01	0.009	0.009	0.006
1.447	1.453	1.447	1.453	1.471	1.483	1.468	1.438	1.474
0.000	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.002	0.000
0.588	0.619	0.582	0.639	0.638	0.626	0.667	0.652	0.629

0.016

0.052

0.000

2.875

0.000

0.000

0.04

65.62

1.79

31.72

0.61

0.023

0.053

0.002

2.866

0.000

0.000

0.08

65.90

0.80

1.83

31.14

0.000

0.055

0.000

2.878

0.000

0.000

0.08

64.60

0.00

1.92

33.15

0.024

0.057

0.001

2.871

0.000

0.001

0.04

64.52

0.81

1.94

32.47

00.26

0.057

0.000

2.866

0.000

0.000

0.05

65.66

0.89

1.94

31.27

ی بر پایه ۱۲ اکسیژن

ر استکارن فرمـول سـاختاری بـر پایـه ۶ جـدول ۲- تحلیـل دســتگاه تجزیــه ریزکـاو الکترونــی از ۷ نمونــه پیروک ் اكسىتن

0.008

0.054

0.001

2.890

0.000

0.001

0.04

65.84

0.27

1.84

31.80

							، مسیری
Sample	Cpx1	Cpx3	Cpx4	Cpx6	Cpx7	Cpx8	Cpx9
Mineral	Augite						
SiO ₂	45.81	45.45	43.2	45.63	46.51	47.66	44.47
TiO_2	0.22	0.16	0.24	0.27	0.19	0.10	0.10
Al_2O_3	6	6.82	7.98	4 8	4.18	2.64	5.49
Cr_2O_3	0.03	0.00	0.02	0.05	0.07	0.07	0.02
Fe ₂ O ₃	0.80	3.12	3.09	3.16	3.20	3.07	3.05
FeO	9.24	28.08	27.02	28.45	28.77	27.63	27.14
MnO	1.13	0.87	0.91	1.31	1.32	1.90	1.17
MgO	1.91	2.12	1.71	2.07	2.27	2.39	2.35
CaO	11.32	11.36	11.50	10.99	10.81	11.97	12.20
Na ₂ O	0.54	0.41	0.47	0.35	0.28	0.14	0.25
K ₂ O	0.26	0.33	0.43	0.23	0.19	0.20	0.23
Total	98.34	98.73	97.37	97.33	97.79	97.77	96.43
Si	1.893	1.868	1.805	1.913	1.938	1.984	1.879
Ti	0.007	0.005	0.008	0.009	0.006	0.003	0.003
Al	0.292	0.330	0.393	0.238	0.205	0.130	0.273
Cr	0.001	0.000	0.001	0.002	0.002	0.002	0.001
Fe(3+)	0.000	0.000	0.044	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe(2+)	1.075	1073	1.036	1.108	1.114	1.069	1.066
Mn	0.040	0.030	0.032	0.047	0.047	0.067	0.042
Mg	0.118	0.013	0.106	0.129	0.141	0.148	0.148
Ca	0.501	0.500	0.515	0.494	0.483	0.534	0.552
Na	0.043	0.033	0.038	0.028	0.023	0.011	0.020
K	0.014	0.017	0.023	0.012	0.010	0.011	0.120

شکل ۸- توزیع ترکیب تجزیههای نقطهای الکترون مایکروپروب پیروکسنهای هشتکوه خضرآباد در نمودار سه گوش ولاستونیت (Wo)، انستاتیت (En) و فروسیلیت (Fs) (Morimoto *et al*., 1988).

برای جانشینی دو گانه ⁺³→⁴ Al⁺³ در محلول جامد گارنتها میتوان نظر Yardley و همکاران (۱۹۹۱) را در نظر گرفت. آنها بر این باورند که جریان سیال گرمابی به شکل متناوب با فرآیند جوشش همراه است که این فرآیند سبب رخداد اکسایش در محلول می شود و شرایط را برای حضور Fe⁺³ مستعدتر مینماید. با افزایش نسبت اکتیویته یونها (⁴Al⁺³) عضو انتهایی آندرادیت در محلول جامد افزایش میابد. در گارنتهای اوگراندیت پایداری آندرادیت با نرخ سریع رشد و جریان تند سیالات گرمابی هماهنگ است.

به طور کلی، Jamtveit و همکاران (۱۹۹۳) و Deer و همکاران (۱۹۹۱) برای بالا بودن آندرادیت در محلول جامد اوگراندیت، افزایش ۲CO₂ و شوری بالای سیالات را در نظر گرفتهاند. در سکارنهای منطقه وجود ساخت برشی در بخشهای تودهای و سطوح لایهبندی در بخشهای نواری، فراهم کننده جریان تند و آسان سیالات گرمایی بوده است که این پدیده در پایداری آندرادیت مؤثر بوده است. علاوه بر این، شرایط اکسیدان در سیال گرمایی نیز نهشت آندرادیت را فراهم میکند یا به عبارت دیگر می توان گفت فوگاسیته بالای اکسیژن باعث شده که آهان موجود در سیال ابتدا به ⁴⁹ اکسید شده و نه تنها برای

www.SID.ir

Ca₂Si₂O₆ (Wo) 50 45 diopside hedenbergite 45 augite 50 Fe₂Si₂O₆ (Fs)

تشـكيل گارنـت آنـدراديت، بلكـه بـراى تشـكيل اپيـدوت نيز شركت كند: 2Fe₃O₄+1/2O₂→3Fe₂O₃

 $4CaCO_3 + 3Fe_2O_3 + 6SiO_2 + H_2O =$

 $2Ca_2Fe_3Si_3O_{12}(OH)+4CO_2$

اپیدوت در ادامه، با کمتـر شـدن فوگاسـیته اکسـیژن شـرایط برای نهشـت ترمولیـت-اکتینولیـت و کلریـت مهیـا شـده

بحث و نتیجه گیری

بر مبنای مشاهدات بافتی کانی ها، شکل، ارتباط مرزهای دانه ای بلوری (مرزهای تعادل یا عدم تعادل) میتوان گفت: واکنش های اسکارن سازی به شکل زنجیروار و درچند مرحله انجام شده است. بنابراین، روابط پاراژنتیک کانی ها به شکل جدول ۳ قابل طرح است. به طور کلی، اسکارن های منطقه با دو گونه دگرسانی اصلی مشخص است که بر مبنای تقدم و تأخر نهشت سیلیکات ها است:

(early الف) همیافتی کانیایی پیشرونده (early) (prograde assemblage که با گارنت و پیروکسن مشخص است؛ ب) همیافتی کانیایی پسین (late (retrograde assemblage که با شکل گیری اپیدوت، ترمولیت-اکتینولیت و کلریت مشخص است. شکل گیری آنورتیت به وجود میآید یعنی آنورتیت و ولاستونیت در دماهای بالا پایدار است (شکل ۹) از سویی منطقی است که واکنش تشکیل گروسولار در اسکارنهای منطقه به خرج کائولینیت و کلسیت یعنی سنگهای آهکی میزبان مارنی در نظر گرفته شود (Casillas et al., 2011):

> 2[Al₂Si₂O₅(OH)₄]+6CaCO₃ = کلسیت + کائولینیت 2Ca₃Al₂(SiO₄)₃+4H₂O+6CO₂ گروسولار

این واکنش شکل گیری گارنت را در اشر هستهزایی به خرج کانی های زمینه سنگ را توجیه مینماید. Deer و همکاران (۱۹۹۱) نشان دادهاند که برای تشکیل گروسولار از مخلوط واکنشی کسائولین، 2CaCa، مهترین شرایط دمایی ۹۰۰ درجه سانتیگراد و فشار ۲۰۰۰ اتمسفر است. اما در مخلوطی از سیلیس، کلسیت و 3SiO2، ولاستونیت و گروسولار در ۵۰۰ درجه سانتیگراد تشکیل می شود.

شکل ۹ نمودار واکنش دماهای ۳۸۰ تا ۵۳۰ درجه سانتیگراد را برای تشکیل گروسولار نشان میدهد. دارد که مانیدهای (۱۹۹۴) اعتقاد دارد که مجموعه کوارتز و گروسولار تحت شرایط فشار کم CO₂ پایدار میماند و با افزایش دما واکنش تشکیل ولاستونیت+آنورتیت انجام می گیرد. در مرحله پیشرونده پیروکسن پایهای ترین و تنها کانی اسکارن است. بر مبنای واکنش های زیر رخداد این کانی قابل توجیه است. 2Fe₃O₄+6CaCO₃+6SiO₂ = 6CaFeSiO₂O₆+6Ca₂+O₂ هدنبرژیت = کلسیت + گنتیت CaMg(CO₃)₂+2SiO₂=CaMgSi₂O₆+2CO₂

دیوپسید دولومیت وجود سنگ های کربناته آهندار به عنوان سنگ میزبان برای تأمین آهن در واکنش بالا لازم است و به احتمال زیاد آهن مورد نیاز می تواند از منشأ ماگما نیز دریافت شود. در ارتباط با ترکیب شیمیایی پیروکسن برای تأمین Mg، کربنات های میزبان اسکارن اندکی دولومیتی است. از طرفی، A1 موجود در ساختار پیروکسن می تواند از سنگ میزبان مارنی یا این که از ماگما تأمین شود. برای پیدایش گروسولار واکنش زیر توسط Tracy و Tracy (۱۹۹۱)

 $CaAl_{2}Si_{2}O_{8}+2CaCO_{3}+SiO_{2}(aq)=Ca_{3}Al_{2}Si_{3}O_{12}+2C$ O₂(aq)

برای تشکیل گارنت مطابق واکنش بالا آنورتیت لازم است و آنورتیت در سنگهای آهکی منطقه وجود ندارد. بنابراین، میتوان CaAl₂Si₂O₈ را به شکل بستههای ساختاری و کلوئیدی در سیالات ماگماتیک در نظر گرفت که برای شکل گیری گارنت گروسولار لازم است. ولاستونیت از واکنش کوارتز و کلسیت قبل از

بافتے	شواهد	مبناى	کانی ها بر	ياراژنتيک	۳– روابط	جدول
<u> </u>	-		J. U			

گامه\کانی	پيشرونده	پسرونده
پيروكسن		
گارنت		
اپيدوت		
ترموليت-اكتينوليت		
كلريت		
كلسيت		
کوار تز		



میدهد که CaO ترکیب ضروری برای واکنشها است که از دیدگاه اسکارنسازی نیز منطقی است چرا که بالا رفتن پتانسیل شیمیایی CaO در محیط اسکارن (تجزیه کربنات ها) خود سبب پیشرفت سایر واکنشهای مراحل تأخیری اسکارنسازی است. شکل گیری سازه آندرادیت در گارنتهای سری اوگراندیت منطقه را میتوان با واکنش زیر توجیه نمود (Rose and Burt, 1979): 4CaFeSi₂O₆+2CaCO₃+O₂=

> پيروكسن 2Ca₃Fe₂Si₃O₁₂+2SiO₂+2CO₂ گارنت

مطالعات تجربی Rose و Ros (۱۹۷۹) نشان داده است که Fe²⁺ میتواند در ساختار پیروکسن (هدنبرژیت) نقش پایین آورنده فوگاستیه اکسیژن سیالات را بازی نموده و در پیدایش آندرادیت تأخیری شرکت نماید. در خصوص منشأ اکسیژن میتوان گفت شاید ناشی از ورود آبهای جوی سرشار از اکسیژن به سامانه اسکارن بوده باشد. واکنش بالا از این رهگذر در سامانه های اسکارنی نیز قابل توجه است. اکسیژن زدایی سیالات (تبدیل Fe²⁺ شـکل ۹- نمـودار T-X_{CO2} در ۵۰۰ بـار در سیسـتم (H₂O-CO₂). CAS محاسبه شده در Seo-Calc) (Tracy and Frost, 1991)

پس از پیدایش گارنت هایی که با پیروکسن همیافت نیست، پیدایش نسل دوم گارنت به خرج فروپاشے پیروکسےنھا است. تحلیل رفتن حاشیہ ییروکسینها توسط گارنیت در گارنتیت اسیکارن را می توان در واقع هجوم CaO فعال در محیط اسکارن به پيروکسن ميزبان دانست: $CaAl_2Si_2O_8+CaO+CaFeSi_2O_6 =$ آنور تیت هدنبرژيت Ca₃Al₂(SiO₄)₃+FeO+SiO₂ گارنت با در نظر گرفتن محتوی Al پیروکسن ها واکنش بالا به شکل زیر نیز قابل پیشنهاد است: $(CaMgSi_2O_6+CaAl_2Si_2O_6)+CaO =$ ييروكسن Ca₃Al₂(SiO₄)₃+MgO گارنت

برای هر دو واکنش بالا شواهد میکروسکوپی دلالت بر وجود مرزهای انحلالی و نامتعادل گارنت-پیروکسن دارد. علاوه بر این، بافتهای بازماندهای (relict textures) از پیروکسن جانشین شده توسط گارنت نیز دلیل دیگری بر وقوع واکنش فوق نشان است (Kato, 1991). نگاهی به دو واکنش فوق نشان

نفوذی، رخداد کم و بیش بافت پرفیروئید در سنگها و ساختمان منطقهای در پلاژیوکلازها می توان گفت جای گیری توده به صورت نیمه عمیق بوده است. علاوه بر آن، واحدهای رسوبی موجود در منطقه به عنوان سربار تودہ نفوذی نزدیک ہے ۱۰۰۰ متر ضے خامت دارد. بنابراین، برآورد فشار تقریبے ۵/۰ کیلوبار دور از واقعیت نیست. همان طور که دیده مے شود میدان پایداری آندرادیت از ۳۹۰ تا ۷۰۰ درجـه سانتیگراد اسـت و فوگاسـیته اکسـیژن ۲۶- تـا ۱۵- را نشان میهدهاد. آنه درادیت توسط ولاستونیت+مگنتیت در T<۲۰۰ درجه سانتیگراد و هدنبرژیت+ولاس_تونیت در T<۵۰۰ درج_ه س_انتیگراد در حضور کوارتز جانشین میشود. از آنجا که همیافتی کانیایی بالا در اسکارن منطقه مشاهده نشده است، بنابراین، گارنتسازی بهعنوان شاخص اسکارن منطقه در T<۵۵۰ درجه سانتیگراد رخ داده



هدنبرژیت می تواند یک محیط احیا را برای سیال اسکارن ساز یا کانه ساز فراهم نماید. بنابراین، سیالات سولفیددار می توانند فلزات خود را در مرز محیط های احیا-اکسیدان نهشت نمایند. همراهی نزدیک و نامتعادل گارنت-پیروکسن بنا به نظر Einaudi و نامتعادل گارنت-پیروکسن و یا به نظر اعلامی ویایی +403 می تواند بیانگر تغییرات دمایی و پویایی +403 می SiO4 در شرایط اکسیدان باشد: Ca₃Fe₂Si₃O₁₂+H₄SiO₄+2H⁺= آندرادیت

 $2CaFeSi_2O_6 \!\!+\! Ca^{\!+\!2} \!\!+\! 3H_2O \!\!+\!\! 0.5O_2$

هدنىرژىت

از آنجا که تمام کانی های سازنده اسکارن هشت کوه در سامانه Ca-Fe-Si-C-O-H جای می گیرد، بنابراین، از نمودار شکل ۱۰ برای تخمین شرایط فیزیکوشیمیایی تشکیل این اسکارن استفاده شده است. نمودار بالا بر پایه XCO₂=0/01 بنا شده است. با در نظر گرفتن مورفولوژی زبانه مانند توده

شکل ۱۰– نمودار T-fO₂ در ۵۰۰ بار که میدانهای عمده پایداری کانیهای سیلیکات، اکسید و سولفید در اسکارنها را نشان میدهد (Einaudi and Burt, 1982).

معاونت پژوهشـی دانشـگاههـای صـنعتی شـاهرود و پیـام نور کمال تشکر و قدردانی نمایند.

سپاسگزاری نگارنــدگان لازم مــیداننــد کــه از حمایــت مــالی

منابع

- Aghanabati, A. (1998) Major sedimentary and structural units of Iran (map). Geosciences 7, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bard, J. P. (1987) Microtextures of igneous and metamorphic rocks. Dordt Reidel publishing Company, Holland, Dordrecht.
- Casillas, R., Demeny, A., Nagy, G., Ahijado, A. and Fernandez, C. (2011) Metacarbonatites in the Basal complex of Fuerteventura (Canary islands), The role of fluid/rock interactions during contact metamorphism and anatexis. Lithos 125:503-520.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1991) An introduction to the rock forming minerals. Seventeenth impression, Longman, London.
- Delvigne, J. (1998) Atlas of Micromorphology of mineral alteration and weathering. The Canadian Mineralogist special publication 3. Orstom wditions, Berlin.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentration in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analysis, using stoichiometric criteria. Mineralogical Magazine 51: 431-435.
- Einaudi, M. T. and Burt, D. M. (1982) Introduction terminology, classification, and composition of skarn deposits. Economic Geology 77: 745-754.
- Ghanei, J. and Mackizadeh, M. A. (2007) Occurrences of brucite, serpentine, forsterite and hydromagnesite bearing marbles, east of Shirkuh, Yazd. Petrology 25(3): 39-49 (in Persian).
- Ghanei, J. and Mackizadeh, M. A. (2011) Textural assemblage relationships between clintonitespinel-garnet in the central Iranian skarns as evidence of clintonite genesis. Petrology 1(4): 65-72 (in Persian).
- Jamtveit, B., Wogelius, R. A. and Fraser, D. G. (1993) Zonation patterns of skarn garnets, records of hydrothermal system evolution. Geology 21: 113-116.
- Kamvong, T., and Zaw, K. (2008) The origin and evolution of skarn-forming fluids from the Phu Lon deposit, northern loei Fold belt, Thailand: evidence from fluid inclusion and sulfur isotope studies. Journal of Asian Earth Sciences 32: 961-980.
- Kato, Y. (1991) Textural and compositional changes of clinopyroxene replaced by garnet in the Mozumi deposit, Kamioka mine, Japan. In: Skarns, their genesis and metallogeny (Ed. Barto-Kyriakidis, A.). Theophrastus publications States America, California.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming mineral. American Mineralogist 68: 227-279.
- Lentz, D. R. (1998) Mineralized intrusion-related skarn systems. vol. 26. Mineralogical Association of Canada, Ottawa.
- Masudy, F., Mehraby, B. and Faraydel, F. (2005) Type of zoning structure of garnet from Ghohrud skarn, south of Khashan. Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy 13(1): 43-60.
- Meinert, L. D. (1998) Application of skarn zonation models to mineral exploration. Exploration and Mining Geology 6(2): 185-208.
- Meinert, L. D., Dipple, G. M. and Nicolescu, S. (2005) World skarn deposits. In: Economic geology (Eds. Hedenquist, J. W., Thompson, J. F. H., Goldfarb, R. J. and Richards, J. P.) 100th Anniversary Volume: 299-336. Society of Economic Geologists, Littleton, Colorado, USA.

Miyashiro, A. (1994) Metamorphic petrology. University College London, London.

Morimoto, N., Fabries, J., Ferguson, A. K., Ginzburg, I. V., Ross, M., Seifert, F. A., Zussman, J.,

Aoki, K. and Gottardi, G. (1988) Nomenclature of pyroxenes, subcommittee on pyroxenes, commission on new minerals and mineral names. International Mineralogical Association Mineralogy and Petrology 39: 55-76.

- Orhan, A., Mutlu, H., E. and Fallick, A. (2011) Fluid infiltration effects on stable isotope systematic of the Susurluk skarn deposit, NW Turkey. Journal of Asian Earth Sciences 40: 550-568.
- Pirajno, F. (1991) Hydrothermal mineral deposits. Springer-Verlag, London.

- Ray, G. E. and Webster, I. C. L. (1997) Skarns in British Columbia. Ministry of Employment and Investment, British Columbia, Victoria, Canada.
- Robb, L. (2005) Introduction to ore-forming processes. Blackwell Publishing, Oxford.
- Rose, A. W. and Burt, D. M. (1979) Hydrothermal alteration In: Geochemistry of hydrothermal ore deposits (Ed. Barnes, H. L.) Hoboken 173-235. John Wiley & Sons, Inc., New York.
- Shelley, D. (1993) Igneous and metamorphic rocks under the microscope, classificathon, textures, microstructures and mineral preferred-orientathons. Chapman and Hall, London.
- Tracy, R. J. and Frost, B. R. (1991) Phase equilibria and thermobarometery of calcareous, ultramafic and mafic rocks and iron formation. In: Contact metamorphism (Ed. Kerrick, D. M.) Reviews in Mineralogy 26: 207-289.
- Yardley, B. W. D., Rochelle, C. A., Barn coat, A. C. and Lloyd, G. E. (1991) Oscillatory zoning in metamorphic minerals, an indicator of infiltration metasomatism. Mineralogical magazine 55: 357-365.
- Zahedi, A. and Boomeri, M. (2012) Mineralogy and geochemistry of Khut copper deposit West of Taft, Yazd provinc. Petrology 2(8): 21-38 (in Persian).

٨٢

Petrography and petrogenesis of Hasht-kuh Khezrabad of Yazd skarns

Javad Ghanei Ardakanei ^{1, 2} *, Hossein Mehdizadeh Shahri ¹, Ali Darvishzadah ³ and Mohammad Ali Mackizadeh ⁴

¹ Department of Petrology, School of Geosciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

² Department of Geology, University of Payame Noor, 19395-4697, Tehran, Iran

³ Department of Geology, Islamic Azad University, Lahijan Branch, Lahijan, Iran

⁴ Departments of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The Khezr-Abad granitoid intrusive body is located in the north-west of Yazd province within Urumia-Dokhtar magmatic arc. The intrusion of this body into the Cretaceous carbonate rocks (Taft Formation), gave rise to Hasht-kuh skarn mineralization with the following mineral assemblage:

Garnet+ Clinopyroxene+Epidote+Tremolite-Actinolite+Chlorite+Calcite+Quartz Mineral associations studies show that pyroxene- garnet occurrence have most relations and are widespread in skarn. A detailed study of paragenetic relationships of skarn minerals clearly demonstrate that there are two stages in skarn evolution system, so the Hasht-kuh skarn can be considered as a polygenic skarn. On the basis of mineral chemistry data the garnet tends to be grossular and pyroxene is augite in composition. The peak temperature of contact metamorphism episode is accompanied by pyroxene crystallization in the early stage followed by overprinting of garnet formation. Due to presence of Al/Fe⁺³ periodic changes in fluids during garnet precipitation, zoning structure in some garnets was developed. The prevailing oxidation conditions during crystallization of fluids caused the instability of pyroxene (reducing fO_2) and the growth of andradite garnet could be occurred at T<550°C in skarn system.

Key words: Paragenetic relationships, Polygenic Skarn, Khezr-Abad granitoid, Hashtkuh Skarn