

زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی در گارنت‌های اسکارنی در کانسار خوت و پناهکوه، غرب یزد

اعظم زاهدی^۱،*، محمد بومری^۱ و محمدعلی مکی‌زاده^۲

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

کانسار اسکارن خوت و پناهکوه در ۵۰ کیلومتری شمال غرب شهرستان تفت در استان یزد واقع شده است. آنالیز عناصر اصلی و نادر خاکی توسط Microprobe و LA-ICP-MS نشان داد که دو نوع گارنت اصلی در اسکارن‌های خوت-پناهکوه وجود دارد. ترکیب شیمیایی گارنت‌ها در اسکارن خوت از محلول جامد گروسولاریت-آندرادیت تا آندرادیت تقریباً خالص تغییر می‌کند، در حالی که تمام گارنت‌های اسکارنی پناهکوه آندرادیت تقریباً خالص و ایزوتروپ هستند. گارنت‌ها در طی فرآیند متاسوماتیسم غنی از عناصر نادر خاکی می‌شوند. نمودار Fe/Ti در مقابل نسبت‌های $Al/(Al + Fe + Mn)$ در اسکارن‌های خوت-پناهکوه نشان داد که بیش از ۵۰ درصد فاز سیال گرمابی در تشکیل گارنت‌ها مؤثر بوده است. مقایسه روندهای عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده نسبت به کندریت در دو نوع متفاوت گارنت نشان داد که همه گارنت‌ها غنی از عناصر نادر خاکی سبک و تپی از عناصر نادر خاکی سنگین همراه با آنومالی‌های متفاوتی از یوروپیم (Eu) هستند. گارنت‌های غنی از آهن با آنومالی مثبت Eu مشخص می‌شوند در حالی که گرانیت‌ها آنومالی منفی Eu را نشان می‌دهد. تفاوت در مقدار آنومالی‌ها نشان‌دهنده ناهمگونی‌های سامانه اسکارنی نظیر تغییرات محلی سنگ مادر و سیال متاسوماتیک است. الگوی فراوانی نسبتاً همسان عناصر نادر خاکی در اسکارن و گارنت بیانگر این است که در اسکارن‌های مطالعه شده، گارنت مهم‌ترین کانی میزبان برای عناصر نادر خاکی است. بنابراین، مطالعه رفتار زمین‌شیمیایی عناصر نادر خاکی گارنت در شناخت تکامل سیالات متاسوماتیک سودمند است.

واژه‌های کلیدی: زمین‌شیمی، عناصر نادر خاکی، گارنت، اسکارن، خوت و پناهکوه

مقدمه

توزیع عناصر نادر خاکی در سامانه‌های گرمابی فسیل شده و یا محصولات متاسوماتیسم تراوشی حاصل از سیالات آذرین، دگرگونی یا گرمابی مرتبط با کانسارهای اسکارنی تراوشی در سنگ‌های کربناته و سیلیکات‌های

بیش‌ترین مطالعات رفتار عناصر نادر خاکی (REE) در محیط‌های گرمابی در سامانه‌های فعال بررسی شده است. تاکنون مطالعات نسبتاً اندکی بر روی روندهای

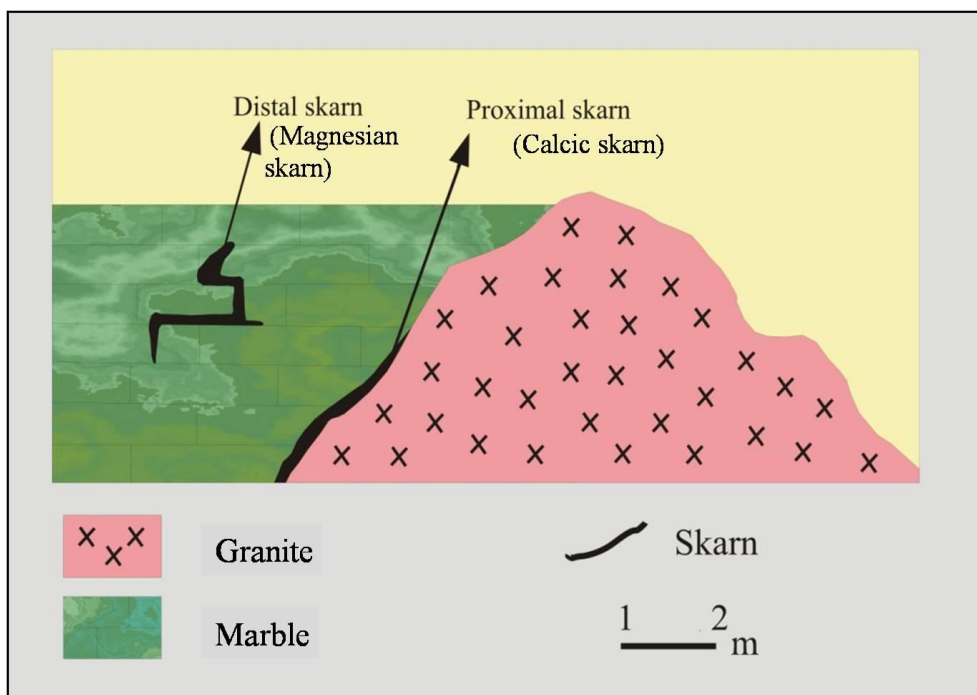
مجاور انجام شده است. متاسوماتیسم گسترده عناصر نادر خاکی می‌تواند در سامانه‌های گرمابی در اعماق کم تا متوسط رخ دهد و زمین‌شیمی این عناصر می‌تواند در شناسایی منشأ اسکارن‌ها و کانسارهای وابسته مفید باشد (Adriana et al., 2009). گارنت‌های اسکارنی در کانسار خوت- پناهکوه مانند دیگر گارنت‌های گرمابی در اسکارن‌های اسلو ریف و کرون جول واشینگتون تغییرات درون‌بلوری شدیدی را در توزیع عناصر نادر خاکی نشان می‌دهند. Hervig و Jamtveit (1994) علت این تغییرات را به منشأ سیال ماگمایی و جوی نسبت داده است. در این مطالعه به منظور بررسی شرایط تشکیل اسکارن در سامانه اسکارنی خوت- پناهکوه به بررسی رخداد تغییرات روندهای عناصر نادر و نادر خاکی در گارنت‌های اسکارنی منطقه خوت و پناهکوه پرداخته می‌شود.

زمین‌شناسی منطقه

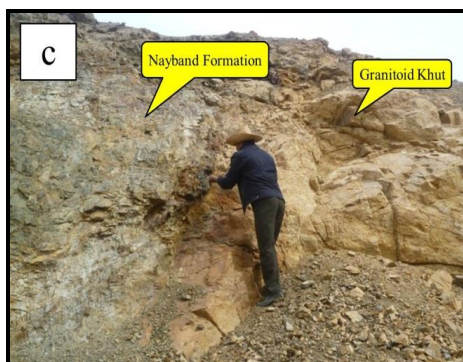
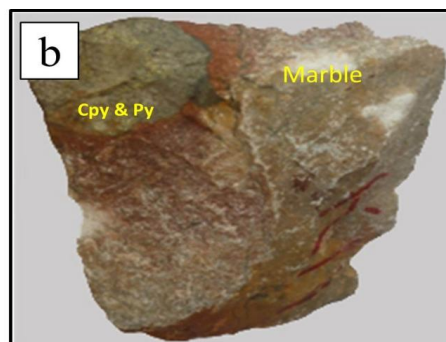
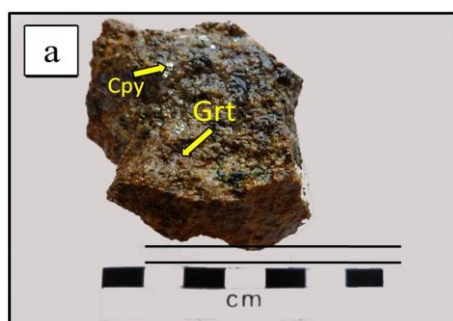
کانسار اسکارنی خوت- پناهکوه در ۶۰ کیلومتری غرب مرکز استان یزد واقع شده است. به‌طور کلی این منطقه در قسمت میانی کمربند ماگمایی ارومیه- دختر که خود بخشی از حاشیه غربی پهنه زمین‌ساختی ایران مرکزی است، واقع شده است. منطقه غرب یزد از لحاظ تنوع زمین‌شناسی و گسترش کانه‌زایی اسکارن، یکی از مناطقی محسوب می‌شود که همواره مورد توجه زمین‌شناسان قرار گرفته است. با توجه به مطالعات Zarasvandi و همکاران (۲۰۰۵) وجود باتولیت گرانیتی شیرکوه، توده‌های گرانیتوئیدی الیگومیوسن (۱۶-۳۰ میلیون سال) و گنبد‌های آتشفشانی نئوژن بر اهمیت این منطقه افزوده است به‌طوری‌که چندین ذخیره مس و آهن به صورت اسکارن- پورفیری، پورفیری و رگه‌ای چند فلزی در منطقه گزارش شده است (شریفی، ۱۳۸۷). اسکارن‌زایی در منطقه خوت و پناهکوه به ترتیب در بخش‌های آهکی سازند نایبند و جمال رخ داده است. توده‌های نفوذی در منطقه پناهکوه به‌صورت

رخنمون‌های پراکنده حضور دارند و در سه رخنمون توده اصلی، بی‌نظم و کوچک تا قطر ۲۵۰ متر جدا از هم مشاهده می‌شوند به‌طوری‌که زبانه‌های کوچکتر از توده نفوذی نیز دیده می‌شوند. مشاهدات صحرایی نشان می‌دهد که اسکارن‌های کلسیمی در منطقه پناهکوه در تماس مستقیم با زبانه‌های کوچک توده نفوذی در منطقه تشکیل شده‌اند. رخداد اسکارن‌زایی در منطقه پناهکوه در برخی از رخنمون‌ها محدود به ضخامت ۳۰ تا ۵۰ متر است. در مواردی اسکارن‌های منیزیمی به صورت رگچه‌ای دور از توده نفوذی و در امتداد شکستگی‌ها و لایه‌بندی سنگ‌های کربناته میزبان شکل گرفته است. در این گونه رخدادها ضخامت آن نیز به یک متر می‌رسد. در شکل ۱ تصویری شماتیک از پروفیل کانسار اسکارنی منطقه پناهکوه آورده شده است. اسکارن‌ها در منطقه خوت به‌صورت توده‌ای بوده و توسط مرمرها محصور شده‌اند (شکل ۲- a). مرمرها بیش‌ترین میزبان کانه‌زایی مس در منطقه خوت بوده است (شکل ۲- b). اسکارن‌های منطقه خوت در ارتباط نزدیک با توده نفوذی هستند اما تماس مستقیم با توده نفوذی ندارند. رسوبات شیلی، ماسه‌سنگی و آهکی سازند نایبند بیش‌ترین گسترش را در منطقه دارند که توسط دایک‌ها و زبانه‌هایی با ترکیب گرانیتوئیدی قطع شده‌اند (شکل ۲- c).

بر اساس مطالعات Yazdi (۱۹۹۱) کانسار مس خوت مرتبط با توده‌های نفوذی حدواسط تا اسیدی با بافت پورفیری بوده و از نوع پورفیری- اسکارن معرفی شده است. کانه‌زایی مس در اسکارن خوت علاوه بر رگه‌ای، به‌صورت افشان نیز در داخل توده‌های نفوذی وقوع یافته است. حفاری‌های معدنی از جمله تونل‌ها و برداشت‌های روباز در منطقه، نشان‌دهنده اهمیت کانه‌زایی فلزی (Cu) در این اسکارن است. تکامل ستون چینه‌شناسی منطقه خوت به‌صورت شماتیک در شکل ۳ نشان داده شده است.



شکل ۱- نیم‌رخ زمین‌شناسی منطقه پناهکوه همراه با موقعیت اسکارن‌های وابسته به توده نفوذی

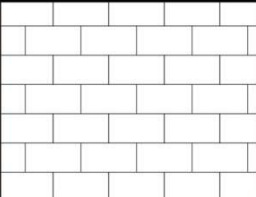
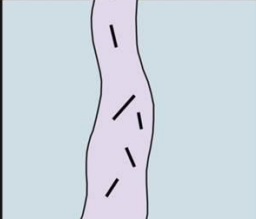


شکل ۲- نمونه دستی و تصویر صحرایی کانسار خوت؛

(a) گارنت اسکارن‌های توده‌ای کانسار خوت با بیش از ۹۰ درصد گارنت

(b) کانه‌زایی مس در مرمهرهای منطقه خوت

(c) نفوذ توده گرانیتوئیدی خوت به درون سازند نایبند در بخش جنوب‌غربی منطقه خوت (دید به سمت شمال‌غرب)

Age	Formation	Description	
Upper Cretaceous	Taft		Limestone
Lower Cretaceous	Sangestan		Sandstone and Conglomerate
Middle Triassic	Nayband		Shale, Sandstone
			Marble
			Shale, Sandstone
			Skarn
Middle Triassic	Nayband		Shale, Sandstone
			Dolomite
Lower Triassic	Shotori		Dolomite

شکل ۳- ستون چینه‌شناسی از منطقه خوت همراه با موقعیت اسکارن‌های تشکیل شده در مرمرها و جایگاه نفوذی گرانیتوئید

روش انجام پژوهش

توسط LA-ICP-MS در دانشگاه آکیتای ژاپن به‌دست آمد. در جدول‌های ۱ تا ۴ مقادیر میانگین عناصر کمیاب در گارنت‌های متفاوت اسکارنی ارائه شده است.

سنگ‌نگاری

گارنت اسکارن‌ها، پهنه غالب در کانسار اسکارنی خوت و پناهکوه هستند. بر اساس مشاهدات میکروسکوپی، گارنت کانی اصلی و عمده در این نوع زون اسکارنی است و بیش از ۷۰ درصد سنگ را تشکیل داده است. گارنت‌ها در اسکارن پناهکوه کاملاً بی‌شکل و همسانگرد هستند و در همراهی با پیروکسن‌های به‌شدت دگرسان شده یافت می‌شوند که با بافت غیرتعدادی مشخص می‌شوند (شکل ۴- a).

پس از مطالعات پتروگرافی دقیق، تعدادی مقطع نازک صیقلی با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر برای آنالیز LA-ICP-MS تهیه شد. قبل از آنالیز طیف‌سنج جرمی پلاسمای جفتیده القایی فرسآب لیزری (LA-ICP-MS)، منطقه‌بندی گارنت‌های اسکارنی توسط نور عبوری و آنالیز نقطه‌ای مطالعه شده است. عناصر اصلی در گارنت‌ها توسط سوپرپروب اتوماتیک مدل JEOL JXA-8600M با ولتاژ شتاب دهنده ۱۵Kv و جریان اشعه‌ای 2×10^{-8} Am در بخش علوم‌زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتا در کشور ژاپن تعیین شدند. مقادیر ۳۴ عنصر کمیاب در گارنت‌ها در چندین نقطه از مرکز تا حاشیه گارنت‌ها در دو نوع متفاوت از چندین گارنت اسکارنی خوت و پناهکوه

جدول ۱- نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های همسانگرد غنی از آهن (گارنت‌های آندرادیتی) در اسکارن خوت

Sample	K-14- Core-1	K-14- Core-2	K-14- Core-3	K-14- Core-4	K-14- Core-5	K-14- Rim-1	K-14- Rim-2	K-14- Rim-3	K-14- Rim-4	K-14- Rim-5	Mean K-14
SiO ₂	36.8	36.8	36.9	36.7	36.4	38.0	37.6	37.9	37.7	38.0	37.3
TiO ₂	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0
Al ₂ O ₃	1.0	0.6	0.3	0.1	0.0	6.0	5.3	5.3	4.6	4.4	2.8
FeO ^(T)	27.4	28.0	28.5	26.6	29.1	22.1	21.8	22.6	22.8	24.0	25.3
MnO	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
MgO	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1
CaO	33.0	33.4	33.2	33.1	33.5	34.2	34.2	34.7	34.3	34.4	33.8
Total	98.4	99.0	99.2	96.7	99.1	100.5	99.2	100.8	99.6	101.2	99.4
Si	6.2	6.2	6.2	6.3	6.2	6.2	6.2	6.1	6.2	6.2	6.2
Ti	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Al	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	1.1	1.0	1.0	0.9	0.8	0.5
Fe ⁺³	3.5	3.6	3.6	3.5	3.7	2.7	2.7	2.8	2.8	2.9	3.2
Mn	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mg	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	6.0	6.0	6.0	6.1	6.1	5.9	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Total	15.9	16.0	16.0	15.9	16.0	15.9	16.0	16.0	16.0	16.0	16.0
Al+Fe+Mn	3.7	3.7	3.7	3.5	3.7	3.9	3.8	3.8	3.7	3.8	3.7
%And	94.4	96.6	97.6	98.9	99.5	69.8	71.8	72.7	75.7	77.1	85.4
%Gro	5.2	3.0	1.6	0.7	0.0	29.5	27.4	26.6	23.7	22.2	14.0
%Spes	0.4	0.5	0.7	0.3	0.6	0.7	0.7	0.7	0.6	0.7	0.6

ادامه جدول ۱- نتایج آنالیز LA-ICP-MS در گارنت‌های همسانگرد غنی از آهن (گارنت‌های آندرادیتی) در اسکارن خوت

Sample	K-14-Core-1	K-14-Core-3	K-14-Core-4	K-14-Core-5	K-14-Rim-1	K-14-Rim-2	K-14-Rim-5	Mean K-14
REE (ppm) by LA-ICP-MS								
La	124.6	64.3	66.7	26.9	167.2	165.8	146.8	108.9
Ce	76.8	57.2	20.7	24.7	106.4	96.2	72.5	64.93
Pr	50	40.1	6.4	15.9	55.9	45.2	38.6	36.01
Nd	20.5	11.6	3	7.1	18.2	18.5	20.8	14.24
Sm	5	0	0	0	2.8	1.5	2.3	1.66
Eu	13.1	26.5	2.3	14.6	8.3	8.8	15.4	12.71
Gd	3.6	1.2	1.1	1.6	2.5	1.6	3.3	2.13
Tb	2.2	0	0	0	2.2	0	0.7	0.73
Dy	0.3	1.4	1	2.5	1.8	0.3	3	1.47
Ho	0	0	0.7	0	0	0	0	0.1
Er	0.4	0.4	0	0.7	1	0	0.6	0.44
Tm	0.7	2.5	1.6	1.5	0	0	0	0.9
Yb	1.3	0	0	0	0	0.4	0	0.24
Lu	0.7	1.6	0	0	2	0	3.4	1.1
ΣREE	299.2	206.8	103.5	95.5	368.3	338.3	307.4	245.57
ΣLREE	271.9	173.2	96.8	74.6	347.7	325.7	278.7	224.09
ΣMREE	24.2	29.1	5.1	18.7	17.6	12.2	24.7	18.8
ΣHREE	3.1	4.5	1.6	2.2	3	0.4	4	2.69
Trace element (ppm) by LA-ICP-MS								
V	3.99	5.63	2.49	3.12	3.05	3.31	0.41	3.14
Cr	2.1	4.11	3.76	1.3	2.5	0	2.4	2.7
Co	1.38	2.36	4.1	0.81	1.3	2.17	3.07	2.17
Ni	1.56	0	4.84	0.46	1.32	3.26	1.27	2.12
Cu	0.56	17275.96	5.08	3032.12	4.76	2.65	9.24	2904.34
Zn	5.11	13.94	12.89	2.54	2.62	9.31	8.03	7.78
Rb	0	0	0.15	0.46	0.24	0.33	0	0.3
Sr	2.57	1.51	9.42	1.19	0.96	4.59	1.95	3.17
Y	2.02	1.25	0.8	0.61	1.27	0.44	1.29	1.1
Zr	0	0.82	0.95	0.05	0.05	0.05	0.31	0.32
Nb	0.05	0.19	0.05	0.1	0.07	0.05	0.12	0.09
Cs	0.13	0.08	0.25	0.23	0.26	0	0	0.19
Hf	0.1	0	0	0.21	0	0.11	0	0.14
Ta	0.53	0.33	0.15	0.05	0.66	0.32	0.58	0.37
Pb	0	0	0.51	0	0	0	0	0.51
Bi	0.08	0.42	0.31	0.16	0.06	0.27	0.28	0.23
Th	0.52	1.03	0.44	0.33	0.23	0.14	0.26	0.42
U	9.13	5.28	2.15	3.07	12.36	11.6	9.69	7.61

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های گراندیتی در اسکارن خوت

Sample	K-10 Core-1	K-10 Core-2	K-10 Core-3	K-10 Core-5	K-10 Rim-6	K-10 Rim-8	K-10 Rim-9	K-10 Rim-10	K-10 Rim-12	K-10 Rim-13	Mean K-10
SiO ₂	38.24	38.51	38.11	38.34	37.72	38.85	37.48	38.23	38.13	39.3	38.29
TiO ₂	0.19	0	0	0.02	0.15	0.57	0.2	0.01	0.31	0.47	0.19
Al ₂ O ₃	10.21	10.53	9.83	9.45	5.91	13.55	4.84	6.89	6.4	13.53	9.11
FeO ^T	15.89	15.79	16.56	17.05	21.06	11.31	22.81	20.28	20.29	10.2	17.12
MnO	0.47	0.52	0.52	0.49	0.28	0.32	0.26	0.34	0.25	0.38	0.38
MgO	0.07	0.06	0.09	0.07	0.05	0.07	0.03	0.07	0.04	0.06	0.06
CaO	34.41	34.39	34.05	34.47	34.39	35.64	34.16	34.3	34.6	35.54	34.6
Total	99.49	99.84	99.2	99.89	99.56	100.3	99.79	100.2	100	99.49	99.78
Si	6.11	6.13	6.12	6.13	6.16	6.06	6.14	6.17	6.17	6.16	6.14
Ti	0.02	0	0	0	0.02	0.07	0.03	0	0.04	0.06	0.02
Al	1.92	1.97	1.86	1.78	1.14	2.49	0.93	1.31	1.22	2.5	1.71
Fe ³⁺	1.91	1.89	2	2.05	2.59	1.33	2.81	2.46	2.47	1.2	2.07
Mn	0.06	0.07	0.07	0.07	0.04	0.04	0.04	0.05	0.03	0.05	0.05
Mg	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02
Ca	5.89	5.86	5.86	5.9	6.01	5.96	6	5.93	6	5.96	5.94
Total	15.95	15.94	15.95	15.95	15.96	15.97	15.96	15.95	15.95	15.94	15.95
Al+Fe+Mn	3.9	3.94	3.93	3.9	3.76	3.86	3.78	3.82	3.73	3.75	3.84
%And	49.03	48.03	50.9	52.61	68.74	34.39	74.36	64.49	66.3	32.06	54.09
%Gro	49.33	50.18	47.3	45.7	30.24	64.5	24.7	34.29	32.77	66.61	44.56
%Spes	1.64	1.79	1.8	1.7	1.02	1.11	0.94	1.22	0.92	1.33	1.35

ادامه جدول ۲- نتایج آنالیز LA-ICP-MS در گارنت‌های گراندیتی در اسکارن خوت

Sample	Kh-10- Core-1	Kh-10- Core-2	Kh-10-Core- 3	Kh-10- Core-5	Kh-10- Rim-6	Kh-10- Rim-8	Kh-10- Rim-9	Kh-10- Rim-10	Kh-10- Rim-12	Kh-10- Rim-13	Mean- K-10
REE (ppm) by LA-ICP-MS											
La	17.15	183.4	1.32	2.62	4.13	4.84	2.03	2.24	0.77	1.09	21.96
Ce	21.72	148.7	6.72	4.71	4.75	12.54	3.82	8.17	4.22	4.07	21.94
Pr	29.28	70.37	24.05	14.63	9.02	18.89	13.6	27.01	11.15	15.34	23.33
Nd	33.79	21.51	44.84	25.02	17.89	26.92	23.46	42.22	16.96	25.37	27.8
Sm	32.05	1.88	53.86	33.64	26.65	39.56	43.42	45.53	27.85	45.89	35.03
Eu	13.74	7.04	29.96	21.41	17.62	34.02	24.1	26.63	19.58	23.35	21.75
Gd	32.11	2.21	25.63	25.9	24.57	31.42	24.86	16.35	25.29	49.08	25.74
Tb	28.06	1.24	21.03	19.76	25.66	33.61	22.75	14.06	19.86	48.16	23.42
Dy	15.31	0	18.66	17.12	14.94	32.71	18.82	9.29	18.82	30.86	17.65
Ho	23.49	0.47	14.74	13.51	15.29	29.94	13.67	5.52	11.05	30.3	15.8
Er	20.44	0.54	9.63	14.76	17.3	30.06	9.95	4.9	12.61	27.74	14.79
Tm	14.72	0	10.16	13.35	12.53	23.66	6.41	3.53	9.68	31.02	12.51
Yb	13.6	1.44	8.86	11.29	8.36	20.86	7.39	2.51	9.78	23.48	10.76
Lu	11.04	0	5.4	15.37	17.75	17.91	6.33	5.85	10.47	23.67	11.38
ΣREE	306.5	438.8	274.9	233.1	216.5	356.9	220.6	213.8	198.1	379.4	283.9
Σ LREE	101.9	424	76.93	46.98	35.79	63.19	42.91	79.64	33.1	45.87	95.03
Σ MREE	144.8	12.84	163.9	131.3	124.7	201.3	147.6	117.4	122.5	227.6	139.4
Σ HREE	59.8	1.98	34.05	54.77	55.94	92.49	30.08	16.79	42.54	105.9	49.44
Trace element (ppm) by LA-ICP-MS											
Cr	2.09	13.51	8.97	16.18	18.43	13.79	0	2.46	2.22	27.61	11.7
Co	1.47	0.55	1.36	1.34	1.16	0.63	0.68	0.52	1.17	1.01	0.99
Ni	1.14	0.39	2.19	4.4	1.71	1.71	0.87	1.55	2.37	2.81	1.91
Cu	3.53	19.3	1.17	146.9	72.9	51.86	7.02	11.67	66.65	83.44	46.44
Zn	3.3	3.85	0.4	25.15	7.14	6.7	1.05	0	5.99	5.61	6.58
Rb	0.36	0.36	0.7	1.18	0.47	0.06	0.03	0	0	0	0.45
Sr	0.3	0.58	0	31.71	13.65	2.9	1.26	0.31	0	0.88	6.45
Y	38.35	0.8	21.78	21.65	23.39	49.84	20.05	10.9	23.82	48.79	25.94
Zr	36.04	0.68	41.77	75.81	128.4	113.6	14.08	33.58	38.27	112.3	59.45
Nb	8.2	0	6.43	11.37	11.21	12.74	4.02	4.6	11.84	9.3	8.86
Cs	0	0	0	0	0	0.12	0	0	0.38	0	0.25
Ba	0.44	0	0	5.65	0.46	0.3	1.48	0.19	0	0.54	1.29
Hf	0.86	0	0.73	2.07	4.73	2.43	0.36	1	0.21	5.99	2.04
Ta	0.26	0.39	0.21	1.12	0.75	0.88	0.03	0.22	0.3	0.63	0.48
Bi	0	0.04	0.05	0	0	0.03	0	0	0.04	0	0.04
Th	8.8	0.2	0.32	0.65	1.69	1.62	0.54	1.36	0.89	0.88	1.7
U	2.33	14.94	0.76	0.93	1.28	3.6	0.32	1.79	1.13	1.55	2.86

جدول ۳- نتایج آنالیز نقطه‌ای گارنت‌های آندرادیتی در اسکارن پناهکوه

Sample	M-9-2-1	M-9-2-2	M-11-2-1	M-11-2-2	M-7-3-1	M-7-3-2	M-7-3-3	M-7-3-4	M-7-3-5	Mean
SiO ₂	37.08	36.76	36.52	36.45	36.66	36.82	37.53	36.14	36.57	36.73
TiO ₂	0.04	0.03	0.02	0.00	0.12	0.09	0.35	0.14	0.03	0.09
Al ₂ O ₃	0.73	1.08	0.20	0.24	1.36	2.05	2.00	1.18	0.75	1.07
FeO ^T	27.80	27.98	28.99	29.45	27.00	26.42	26.71	27.91	27.95	27.80
MnO	0.39	0.35	0.51	0.55	0.42	0.41	0.43	0.64	0.37	0.45
MgO	0.03	0.02	0.04	0.06	0.06	0.04	0.07	0.08	0.04	0.05
CaO	33.66	33.40	32.33	32.33	32.42	32.97	33.58	32.74	32.85	32.92
Total	99.72	99.63	98.63	99.13	98.04	98.80	100.68	98.84	98.57	99.12
Si	6.21	6.16	6.20	6.17	6.22	6.18	6.18	6.11	6.20	6.18
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.04	0.02	0.00	0.01
Al	0.14	0.21	0.04	0.05	0.27	0.41	0.39	0.24	0.15	0.21
Fe ³⁺	3.50	3.53	3.71	3.75	3.44	3.34	3.31	3.55	3.56	3.52
Mn	0.06	0.05	0.07	0.08	0.06	0.06	0.06	0.09	0.05	0.06
Mg	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01
Ca	6.04	6.00	5.88	5.86	5.89	5.93	5.92	5.94	5.96	5.94
Total	15.96	15.96	15.92	15.94	15.91	15.93	15.93	15.97	15.95	15.94
Al+Fe+Mn	3.70	3.79	3.82	3.88	3.78	3.80	3.76	3.88	3.77	3.80
%And	94.63	93.03	97.04	96.71	91.21	87.79	88.08	91.55	94.63	92.74
%Gro	3.88	5.65	1.05	1.24	7.21	10.69	10.31	6.07	3.95	5.56
%Spes	1.49	1.33	1.91	2.05	1.58	1.52	1.61	2.38	1.41	1.70

ادامه جدول ۳- نتایج آنالیز LA- ICP-MS در گارنت‌های آندرادیتی در اسکارن پناهکوه

Sample	M-9-2C	M-9-2R	M-11-2A	M-11-2B	M-11-2C	M-7-3-01A	M-7-3-01B	M-7-3-01C	Mean
REE (ppm) by LA-ICP-MS									
La	28.00	70.25	36.64	19.52	32.90	11.22	11.70	64.46	34.34
Ce	23.34	35.44	17.97	9.97	9.97	20.39	23.18	45.34	23.20
Pr	20.50	14.14	10.15	5.31	5.08	26.30	26.23	20.23	15.99
Nd	3.97	4.27	3.75	3.32	3.62	17.39	24.76	5.17	8.28
Sm	2.34	0.60	2.39	2.41	3.49	3.54	4.29	0.82	2.48
Eu	5.72	4.43	2.29	0.46	0.76	14.75	13.70	1.79	5.49
Gd	2.15	0.42	2.96	2.98	2.47	8.80	3.29	1.88	3.12
Tb	0.99	0.00	0.85	0.85	1.06	9.99	9.69	1.55	3.12
Dy	0.29	0.00	2.09	0.79	0.87	13.50	8.64	0.57	3.34
Ho	1.71	1.06	0.27	1.36	1.35	12.81	10.55	0.36	3.68
Er	0.70	0.27	0.57	0.86	0.95	13.44	6.00	0.67	2.93
Tm	1.41	1.09	0.00	0.61	0.00	11.06	9.97	4.40	3.57
Yb	0.45	0.69	1.60	0.40	0.33	12.22	6.92	0.00	2.83
Lu	0.73	1.69	0.00	0.00	0.00	8.60	7.60	2.18	2.60
ΣREE	92.28	134.34	81.53	48.85	62.85	184.01	166.52	149.42	114.97
ΣLREE	75.81	124.10	68.51	38.12	51.56	75.30	85.87	135.20	81.81
ΣMREE	13.19	6.50	10.84	8.85	10.00	63.39	50.17	6.97	21.24
ΣHREE	3.29	3.74	2.18	1.88	1.29	45.32	30.48	7.25	11.93
Trace element (ppm) by LA-ICP-MS									
Sc	1.89	2.12	0	1.07	1.25	2.25	1.52	0.24	1.48
V	174.96	118.18	110.22	95.61	53.60	55.47	74.19	6.89	86.14
Cr	2.67	2.55	0	0.31	1.02	0	0	1.55	1.62
Co	1.76	5.30	0.69	0.71	0.68	0.59	0.44	0.52	1.34
Ni	4.53	10.24	0.22	1.35	0.28	0.12	0	0.33	2.44
Cu	207.09	564.19	6.07	6.71	5.25	3.53	5.72	0	114.08
Zn	10.54	23.19	2.85	0	0.12	2.56	1.45	0	6.79
Rb	0.66	1.03	0.13	0	0.18	0	0	0	0.50
Sr	7.53	21.47	0.56	0.19	0.14	10.29	87.88	1.81	0
Y	1.18	0.60	1.17	1.84	1.63	26.10	14.53	0.92	6.00
Zr	0.24	0.04	0.04	0.00	0.03	66.14	75.37	0.68	17.82
Nb	0.99	0.27	0.04	0.10	0.03	3.99	4.11	0.40	1.24
Cs	0.43	0	0.46	0.37	1.00	0.61	1.10	0.27	0.61
Ba	73.26	1.79	0.12	0.13	0	0.90	0.35	0	12.76
Hf	0.21	0.08	0.28	0.10	0	1.72	2.03	0	0.74
Ta	0.03	0.66	0.21	0.21	0.39	0.26	0.24	0.40	0.30
Pb	0	0.05	0.00	0.11	0.07	1.42	1.05	0.32	0.43
Bi	0	0.11	0.28	0.34	0.33	0.03	0.05	0.03	0.17
Th	0.88	0.38	0	0.09	0	1.49	1.39	0.14	0.73
U	19.15	31.36	92.77	43.19	69.99	7.38	6.62	25.14	36.95

جدول ۴- نتایج آنالیز LA- ICP-MS در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه

Sample	گارنت‌های آندرادیتی خوت		گارنت‌های گرانادیتی خوت		گارنت‌های آندرادیتی پناهکوه	
	K-14-1	K-14-2	K-10-1	K-10-2	M-1	M-2
REE (ppm) by LA-ICP-MS						
La	89	110	19.1	22.3	31.2	36
Ce	58	70	18.1	23.4	22.3	24.1
Pr	33	40	21.2	25.7	15.1	16.2
Nd	12	16.5	24.1	30.5	8.1	9.1
Sm	1.1	2.1	34	37.2	1.4	3.3
Eu	11.1	13.5	19.5	23.7	5.1	6.6
Gd	2.1	2.5	24.1	28.2	3.1	4.3
Tb	0.6	0.9	21.2	24.1	3.1	4.5
Dy	1.4	2.1	17.1	19.4	3.2	4.2
Ho	0.12	0.14	14.1	17.3	2.5	4.1
Er	0.5	0.66	13.3	18.2	2.3	3.5
Tm	0.7	1.00	12.3	15.1	2.7	3.9
Yb	0.22	0.26	12.1	13.4	2.5	4.1
Lu	1.4	1.8	10.1	13.7	2.3	4.8
ΣREE	211.24	261.46	260.3	312.20	104.90	128.70
ΣLREE	192	236.5	82.5	101.9	76.7	85.4
ΣMREE	16.42	21.24	130	149.9	18.4	27
ΣHREE	2.82	3.72	47.8	60.4	9.8	16.3

مرکزی گارنت آشکار است (شکل ۵- c). گارنت‌های اسکارنی پناهکوه، آندرادیت تقریباً خالص هستند ($Ad > 87\%$) که به صورت تجمعات توده‌ای در نوارهای غنی از گارنت دیده می‌شود و بیش از ۹۰ درصد سنگ اسکارنی را تشکیل داده است (شکل ۶- a). گارنت‌های موجود در این زون، درشت‌بلور، بی‌شکل و همسانگرد همراه با شکستگی‌های فراوان هستند که فضای بین آن‌ها را مگنتیت پر کرده است (شکل ۶- b).

شیمی بلور گارنت

گارنت‌ها دارای فرمول شیمیایی $X_3Y_2Z_3O_{12}$ هستند که در آن کاتیون‌های دو ظرفیتی (Fe^{2+} , Ca, Mg and Mn) با هم‌آرایی هشت، Y کاتیون‌های سه ظرفیتی (Fe^{3+} , Al and Cr) با هم‌آرایی شش و Z اغلب Si بوده، با هم‌آرایی ۴ چهار شرکت می‌کنند (Menzer, 1926). عناصر فرعی و جزئی شرکت کننده در ساختار گارنت در جدول ۵ فهرست شده است.

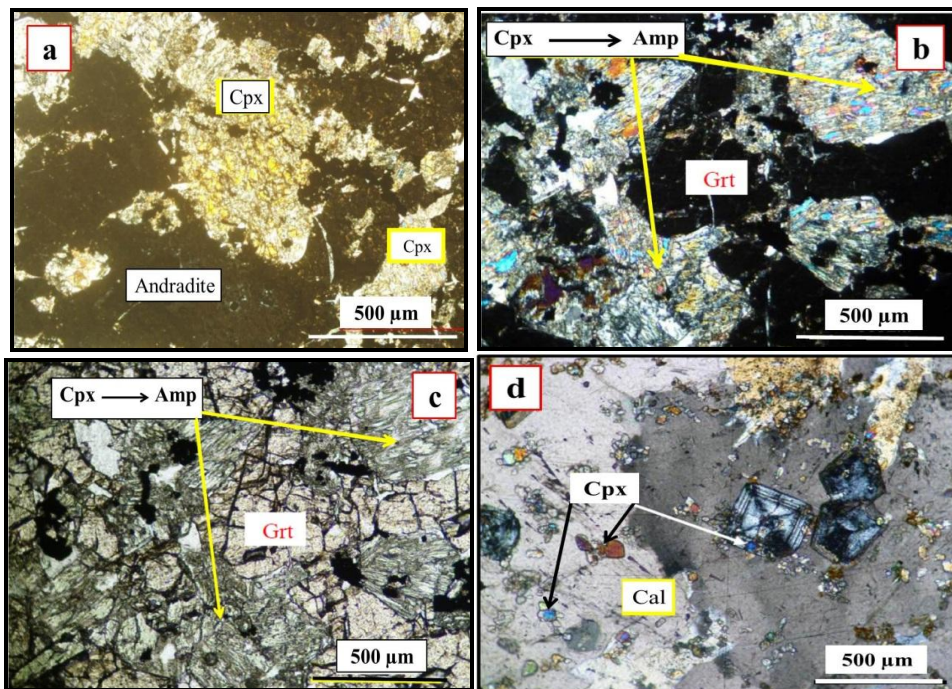
بر اساس نظر McIntire (۱۹۶۳)، حداقل چهار فرآیند اصلی در مشارکت عناصر جزئی به داخل بلورها وجود دارد که عبارتند از: جذب سطحی، جفت‌شدگی، فرآیندهای جاننشینی و محلول جامد میان بلورین. جذب

پیروکسن‌ها به شدت تجزیه‌شدگی نشان داده به طوری که تنها قالبی از آن باقی مانده است. اورالیتی شدن به طور کامل در پیروکسن‌ها رخ داده و تشکیل پزدومورف‌ها رخدادی عادی است (شکل ۴- c و b). کلینوپيروکسن‌ها در اسکارن خوت عمدتاً به صورت بلورهای ریز بی‌شکل تا نیمه‌شکل دار مشاهده می‌شود. این کانی به صورت اذخال در گارنت تشکیل شده است که نشان‌دهنده رشد هم‌زمان این دو کانی یا تبلور زودتر کلینوپيروکسن است (شکل ۴- d).

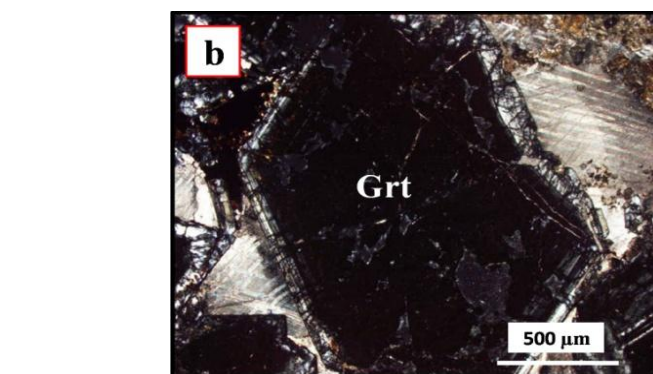
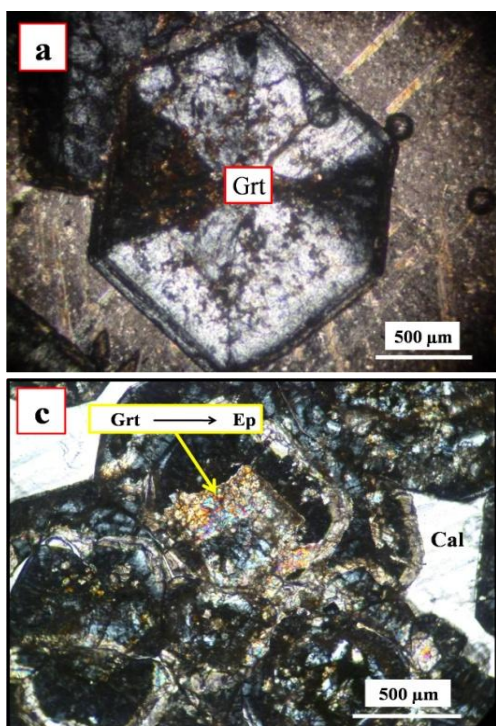
بر اساس ویژگی‌های نوری، نسل‌های مختلف گارنت در اسکارن خوت و پناهکوه تشخیص داده شده است که نشان‌دهنده طبیعت پویای سامانه اسکارنی خوت و پناهکوه است. در اسکارن خوت دو نسل گارنت با ترکیب شیمیایی متفاوت شناسایی شد. گارنت‌های مرحله پیش‌رونده پیشین ناهمسانگرد هستند و ماکل قطاعی نشان می‌دهند ($Ad_{74.30} - Gr_{24.81} - Ad_{32.06}$) ($Gr_{66.61}$) در حالی که گارنت‌های پیش‌رونده پسین دارای هسته‌های خودشکل همسانگرد هستند ($Ad > 94\%$) که توسط رورشدی‌های ناهمسانگرد بعدی محصور می‌شوند (شکل ۵- a و b). این گارنت‌های همسانگرد، اغلب برشی شده‌اند که نشان‌دهنده تغییر در فشار سیال است. دگرسانی آن‌ها به اپیدوت، کلریت و کلسیت در قسمت

عدم توازن بار و شعاع یونی بین کاتیون میزبان و کاتیون جانشین شونده در یک جایگاه مشخص توسط فرآیند جانشینی کنترل می‌شود (قانون اول گلدشمیت).

سطحی و جفت‌شدگی توسط تأثیرات جنبشی در زمان رشد کانی کنترل می‌شود در حالی‌که جانشینی و محلول جامد اساساً توسط شیمی بلور کنترل می‌شود.

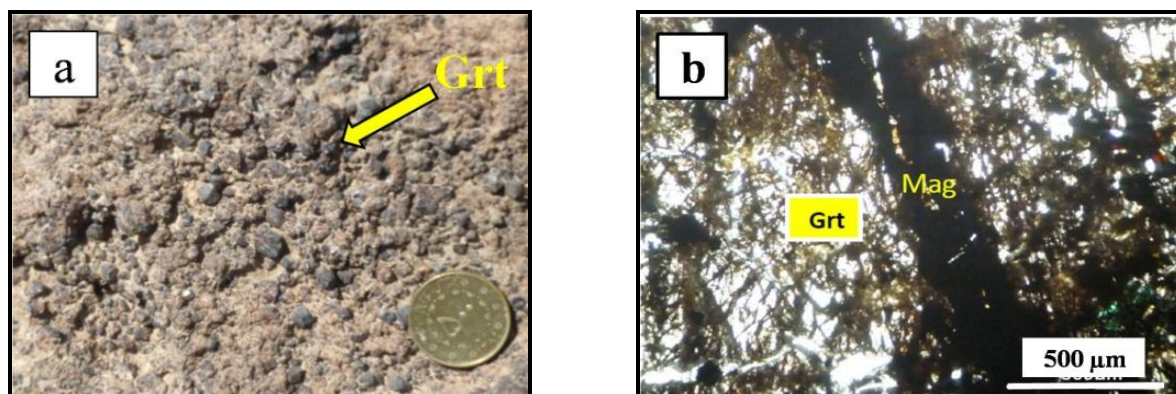


شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از کانی‌ها در اسکارن خوت و پناهکوه. (a) هجوم گارنت‌های بی‌شکل به پیروکسن‌ها و جانشینی پیروکسن‌ها توسط گارنت در اسکارن پناهکوه (XPL)، (b) و c) پزودومورف پیروکسن در اسکارن پناهکوه که کاملاً با آمفیبول رشته‌ای جایگزین شده است (اورالیتی‌زاسیون) (XPL, PPL) و (d) میکروفونوکریست‌های کلینوپیروکسن در گارنت‌های منطقه خوت (XPL)



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از نسل‌های مختلف گارنت‌های اسکارنی خوت (XPL)

(a) گارنت ناهمسانگرد با ماکل قطاعی
(b) گارنت همسانگرد با هسته خودشکل در مرکز که در حاشیه اندکی ناهمسانگردی نشان می‌دهد
(c) جانشینی گارنت توسط اپیدوت و کلریت در مرکز گارنت در مرحله متاسوماتیسم پس‌رونده



شکل ۶- تصاویر صحرایی و میکروسکوپی از گارنت‌های اسکارنی پناهکوه. (a) رخنمون توده‌ای از گارنت‌های اسکارنی، (b) گارنت‌های همسانگرد بی‌شکل با شکستگی‌های فراوان که توسط مگنتیت پر شده است.

ساخت گارنت‌های استفاده شده برای مواد شیشه‌ای کاربرد دارد (برای مثال: yttrium aluminum garnet- YAG) یا مانند $[X^{2+}]_{-2}^{VIII}[X^{+}]_{+1}^{VIII}[REE^{3+}]_{+1}^{VIII}$ که فرآیندهای اصلی جانشینی REE^{3+} در گارنت‌ها هستند (X^{1+} برابر Na^{+} است) (McIntire, 1963; Smith *et al.*, 2004). فرآیندهای دیگر شامل ایجاد فضای خالی در ساختار بلور است که نقش مهمی را بازی نمی‌کند.

مشارکت REE و Y تنها توسط جانشینی کاتیون‌های X^{2+} در جایگاه دودکاهدرال امکان‌پذیر است. برای Eu^{2+} جانشینی از نوع هم‌ظرفیت بوده و عدم تعادل بار وجود ندارد. برای عناصر REE^{3+} و Y یک جانشینی از نوع ظرفیت متغیر جهت خنثی کردن بار الکتریکی در ساختار گارنت لازم است. جانشینی‌های دوتایی مانند $[X^{2+}]_{-1}^{VIII}[REE^{3+}]_{+1}^{VIII}[Si^{4+}]_{-1}^{IV}[Z^{3+}]_{+1}^{IV}$ معمولاً برای

جدول ۵- عناصر فرعی و کمیاب شرکت کننده در جایگاه‌های ساختاری گارنت (Gaspar *et al.*, 2008)

	X-site	Y-site (6 coordination)	Z-site (4 coordination)
Minor	Zn, Y, Na	Ti, V, Fe^{2+} , Zr, Sn	Al, Ti, Fe^{3+} , P
Trace	Li, Be, B, F, Sc, Cu, Ga, Ge, Sr, Nb, Ag, Cd, In, REE, U		

کینتیکی مانند نرخ رشد و جذب سطحی کنترل می‌شود (Hickmott and Spear, 1992; Jamtveit and Chernoff and Carlson, 1999; Hervig, 1994; Smith *et al.*, 2004). با نگاهی کلی به رفتار عناصر خاکی کمیاب در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه مشاهده می‌شود که عناصر نادر خاکی سبک نسبت به عناصر نادر خاکی سنگین غنی‌شدگی بیشتری نشان می‌دهند که ناشی از تحرک بیشتر آن‌ها در فرآیندهای متاسوماتیک است. مقایسه روندهای عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده نسبت به کندریت در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه نشان می‌دهد که گارنت‌های اسکارنی خوت نسبت به گارنت‌های منطقه پناهکوه غنی‌شدگی

زمین‌شیمی عناصر کمیاب در گارنت

عناصر کمیاب، ردیاب‌های مهمی در فرآیندهای متاسوماتیک هستند (Griffin *et al.*, 1996) و جزییات بیشتری را نسبت به عناصر اصلی ثبت می‌کنند. زمین‌شیمی عناصر کمیاب، مهم‌ترین ابزار برای بررسی‌های زمین‌شیمیدانان، زمین‌شناسان و زمین‌شناسان اکتشافی است.

زمین‌شیمی عناصر نادر خاکی

تفکیک عناصر کمیاب مانند REE بین سیال متاسوماتیک و گارنت در حال رشد، پیچیده است و به‌شدت توسط شیمی بلور، تعادل بلور- مذاب، اثرات

بیشتری از عناصر نادر خاکی سبک و سنگین نشان می‌دهند به‌طوری‌که بیش‌ترین غنی‌شدگی عناصر نادر خاکی به‌ترتیب مربوط به گارنت‌های گرانادیتی و آندرادیتی خوت بوده است (شکل ۷). عناصر نادر خاکی در گارنت‌های گرانادیتی خوت بیشتر از گارنت‌های آندرادیتی است زیرا در ترکیبات حدواسط، عناصر نادر خاکی نسبت به اعضای نهایی محلول‌تر هستند که نشان‌دهنده تطابق مثبت بین مقدار Al و REE است (Gaspar *et al.*, 2008) (شکل ۸-ا) افزایش عناصر نادر خاکی در گارنت‌های گرانادیتی همچنین می‌تواند توسط جانشینی کاتیونی محلی (REE به جای کلسیم) و مشارکت عناصر نادر خاکی در جایگاه X توضیح داده شود.

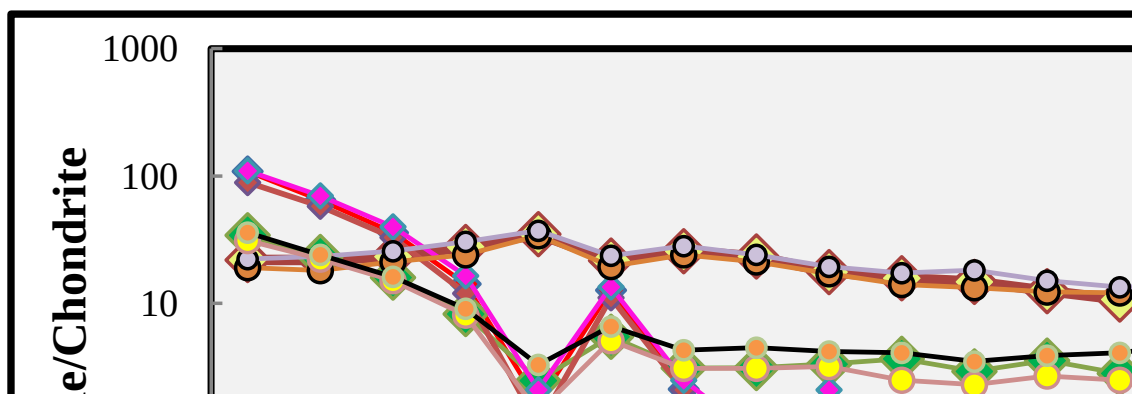
گارنت‌های غنی از آهن در منطقه خوت و پناهکوه غنی‌شدگی بیشتری از عناصر LREE نسبت به HREE دارند در حالی که گارنت‌های گرانادیتی غنی از Al در منطقه خوت غنی‌شدگی کمتری از عناصر LREE را نسبت به HREE نشان می‌دهند (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود، روندهای فراوانی به‌دست آمده از عناصر نادر خاکی در گارنت‌ها تشابه بسیاری با ترکیب اسکارن‌های منطقه نشان می‌دهد که نشان‌دهنده قرابت ژنتیکی میان آن‌ها است (شکل ۸-ب). این الگوی فراوانی نسبتاً همسان عناصر نادر خاکی در اسکارن و گارنت بیانگر این است که در اسکارن‌های مورد مطالعه گارنت مهم‌ترین کانی میزبان برای عناصر نادر خاکی است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود عناصر نادر خاکی سبک (La تا Nd) در گارنت‌های آندرادیتی خوت و پناهکوه با شیب نسبتاً تند کاهش می‌یابند. در محل Eu آنومالی مثبت می‌شود به‌طوری‌که شدت آنومالی مثبت Eu در گارنت‌های آندرادیتی خوت بیشتر از پناهکوه است. تفاوت در مقدار آنومالی‌ها نشان‌دهنده ناهمگونی‌های سامانه اسکارنی نظیر تغییرات محلی سنگ مادر و سیال متاسوماتیک است. وجود مگنتیت و

پروتیت در اسکارن خوت (شکل ۸-ج) نشان‌دهنده یک محیط احیایی با fO_2 زیر بافر هماتیت-مگنتیت است (Gaspar, 2005). در چنین شرایط احیایی، Eu به صورت Eu^{2+} حضور دارد (شکل ۸-ج) که تا حدودی رفتاری متفاوت از دیگر REEs و نسبت‌های Eu/Eu^* نشان می‌دهد. پتانسیل اکسایش-کاهش Eu^{3+}/Eu^{2+} در سیالات گرمایی اساساً بستگی به دما و گونه‌زایی دارد و به pH و فشار وابستگی اندکی دارد. گونه‌زایی می‌تواند باعث گسترش پایداری Eu^{3+} در دماهای پایین شود. در دماهای بالاتر از ۲۵۰ درجه سانتیگراد، Eu^{2+} غالب است (Sverjensky, 1984)، بنابراین، در دماهای نسبتاً بالا در سامانه‌های اسکارنی از دیگر عناصر نادر خاکی تفکیک می‌شود. عناصر نادر خاکی سبک و سنگین در گارنت‌های گرانادیتی خوت تفاوت آشکاری را نشان نمی‌دهند و روند تقریباً صاف و یکنواختی را نشان می‌دهند. تنها تغییرات در آنومالی منفی نسبتاً ضعیف Eu مشاهده می‌شود. آنومالی منفی Eu به عدم وجود لیگاندی‌هایی مانند Cl^- مربوط می‌شود که قادر به انتقال Eu^{2+} است.

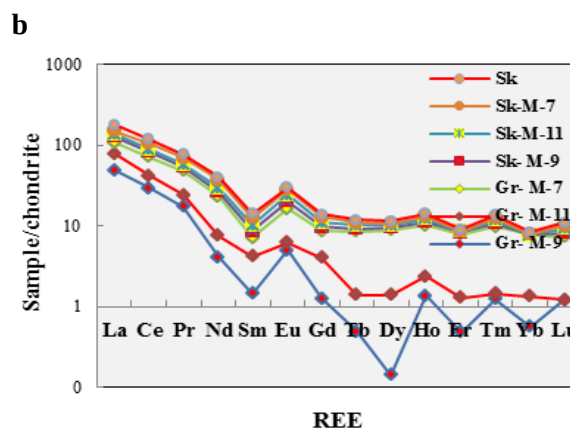
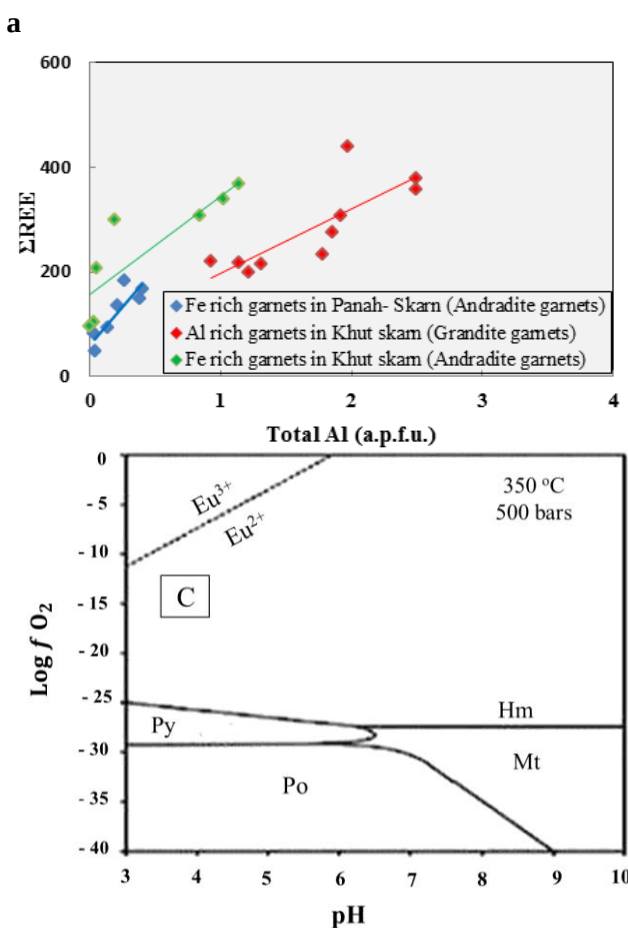
عناصر نادر خاکی سبک (LREE)

همان‌طور که در جدول‌های ۱ تا ۴ مشاهده می‌شود، La بالاترین غلظت عناصر نادر خاکی سبک را در تمام گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه نشان می‌دهد، به‌طوری‌که میانگین فراوانی این عنصر در گارنت‌های گرانادیتی خوت ۲۲ ppm، گارنت‌های آندرادیتی پناهکوه ۳۴/۳۴ ppm و در گارنت‌های آندرادیتی خوت به بیش‌ترین مقدار خود (۱۰۹ ppm) می‌رسد. La جزو کاتیون‌های با قدرت میدان بالاست ولی ماهیت هیگروماگماتوفیلی بالایی دارد بنابراین، می‌تواند در ترکیب سیال ماگمایی محلول باشد (Jenner, 1996).

گارنت‌های غنی از آهن در منطقه خوت و پناهکوه غنی‌شدگی بیشتری از عناصر LREE نسبت به HREE دارند در حالی که گارنت‌های گرانادیتی غنی از Al در منطقه خوت غنی‌شدگی کمتری از عناصر LREE را نسبت به HREE نشان می‌دهند (شکل ۷). همان‌طور که مشاهده می‌شود، روندهای فراوانی به‌دست آمده از عناصر نادر خاکی در گارنت‌ها تشابه بسیاری با ترکیب اسکارن‌های منطقه نشان می‌دهد که نشان‌دهنده قرابت ژنتیکی میان آن‌ها است (شکل ۸-ب). این الگوی فراوانی نسبتاً همسان عناصر نادر خاکی در اسکارن و گارنت بیانگر این است که در اسکارن‌های مورد مطالعه گارنت مهم‌ترین کانی میزبان برای عناصر نادر خاکی است. همان‌طور که در شکل ۷ مشاهده می‌شود عناصر نادر خاکی سبک (La تا Nd) در گارنت‌های آندرادیتی خوت و پناهکوه با شیب نسبتاً تند کاهش می‌یابند. در محل Eu آنومالی مثبت می‌شود به‌طوری‌که شدت آنومالی مثبت Eu در گارنت‌های آندرادیتی خوت بیشتر از پناهکوه است. تفاوت در مقدار آنومالی‌ها نشان‌دهنده ناهمگونی‌های سامانه اسکارنی نظیر تغییرات محلی سنگ مادر و سیال متاسوماتیک است. وجود مگنتیت و



شکل ۷- میانگین عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده از گارنت‌های اسکارنی خوت نسبت به کندریت (مقادیر کندریت از Boynton (۱۹۸۴))



شکل ۸- (a) تطابق بین مقادیر میانگین Al و ΣREE در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه، (b) روند‌های عناصر نادر خاکی به‌هنگار شده نسبت به کندریت در گارنت‌های اسکارنی پناهکوه به همراه اسکارن‌های مرتبط با آن (Sk نماد سنگ اسکارنی و Gr نماد گارنت اسکارنی است) و (c) نمودار Log fO₂-pH که واکنش‌های Eu³⁺-Eu²⁺ و دیگر واکنش‌های مرتبط برای سامانه گرمابی خوت را نشان می‌دهد (Gaspar et al., 2008).

میانگین فراوانی این عنصر در گارنت‌های گرانادیتی خوت ۲۲ ppm، گارنت‌های آندرادیتی پناهکوه ۲۳ ppm و در گارنت‌های آندرادیتی خوت مانند لانتانیم به بیش‌ترین مقدار خود ۶۵ ppm می‌رسد (جدول‌های ۱ تا

سیریم (Ce) پس از لانتانیم (La) بالاترین غلظت عناصر نادر خاکی را در گارنت‌های اسکارنی خوت-پناهکوه تشکیل می‌دهد. رفتار زمین‌شیمیایی این عنصر شبیه لانتانیم بوده و هیگروماگماتوفیلی بالایی دارد.

جزو کاتیون‌های با قدرت میدان بالا هستند. در سامانه‌هایی که آب، سیال غالبی است، عناصری نامتحرک‌اند، ولی با اضافه شدن کربنات به سامانه ممکن است تا حدودی متحرک شوند (Jenner, 1996). بنابراین، انتظار می‌رود که این عناصر در گارنت‌های حاوی CaO بیش‌ترین غنی‌شدگی را نشان دهند. از آنجا که گارنت‌های گرانیتی خوت دارای مقادیر بالاتری از اکسید کلسیم نسبت به سایر گارنت‌های اسکارنی مورد مطالعه هستند. بنابراین، نسبت به سایر گارنت‌ها غنی‌شدگی بیشتری از عناصر نادر خاکی سنگین را نشان می‌دهند (جدول ۲). اربیم (Er) و ایتربیم (Yb) هر دو در سیال غنی از آب نامتحرک‌اند، ولی با ورود کربنات‌ها رفتاری متحرک از خود نشان می‌دهند بنابراین، غلظت این عناصر در ترکیب گارنت‌های گرانیتی خوت که اکسید کلسیم بیشتری شرکت دارد نسبت به گارنت‌های آندرادیتی خوت- پناهکوه نیز بیشتر است. تولیم (Tm^{+3}) و لوتسیم (Lu^{+3}) کم‌ترین غلظت را در بین عناصر نادر خاکی سنگین در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه نشان می‌دهد که به‌علت فراوانی پایین آن‌ها در طبیعت است.

عناصر نادر لیتوفیل

همه گارنت‌های اسکارنی خوت- پناهکوه به‌شدت از عناصر لیتوفیل بزرگ یون (LILE) تهی شده‌اند و دارای مقادیر اندکی از Rb و Cs هستند (جدول‌های ۱ تا ۳). مقادیر Sr و Ba در گارنت‌ها بسیار پایین‌تر از مقادیر کندریت‌هاست که به‌علت شعاع یونی بزرگتر این عناصر نسبت به جایگاه‌های ۸ تایی با هم‌آرایی ۸ در ساختار گارنت است (Gaspar et al., 2008). عناصر با شدت میدان بالا (HFSE) و نادر خاکی (REE) تغییرات سازگارتری با زمین‌شیمی عناصر اصلی و مشاهدات سنگ‌نگاری نشان می‌دهند (شکل ۹).

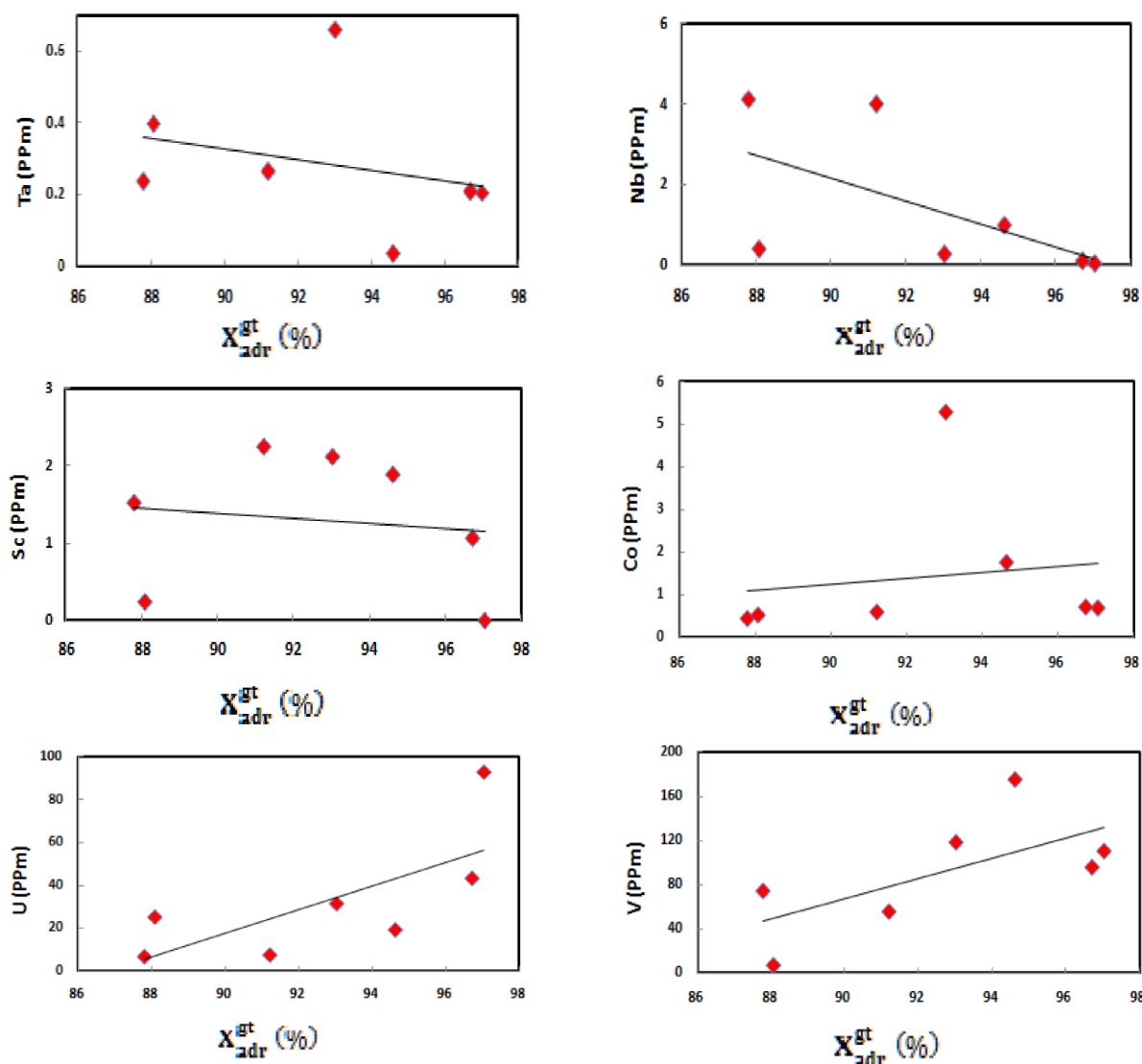
۳. عنصر پرازئودیمیم (Pr) و نئودیمیم (Nd) نسبت به سایر عناصر نادر خاکی سبک غنی‌شدگی کمتری دارد که می‌تواند به‌علت فراوانی کمتر این عناصر در پوسته زمین و گرانیته‌ها باشد.

عناصر نادر خاکی متوسط (MREE)

ساماریم (Sm)، گادولینیم (Gd) و دیسپروزیوم (Dy) رفتار زمین‌شیمیایی کاملاً مشابهی دارند. فراوانی تقریباً یکسان این عناصر در گرانیته‌ها و پوسته زمین، یکسان بودن رفتار زمین‌شیمیایی این عناصر را تأیید می‌کند. فراوانی ساماریم در گارنت‌های آندرادیتی خوت و پناهکوه تقریباً یکسان بوده است. بالاترین مقادیر ساماریم، گادولینیم و دیسپروزیوم مربوط به گارنت‌های گرانیتی خوت است. به نظر می‌رسد فراوانی این عناصر با اکسید کلسیم در گارنت‌ها ارتباط مستقیم دارد. عناصر کمیاب متوسط دیگر شامل سه عنصر یوروپیم (Eu)، تربیم (Tb) و هولمیم (Ho) هستند که دارای رفتار زمین‌شیمیایی تقریباً مشابهی هستند. پایین بودن فراوانی این عناصر (جدول‌های ۱ تا ۴) نسبت به عناصر Dy، Sm و Gd مربوط به فراوانی پایین آن‌ها در طبیعت است. فراوانی این عناصر در گارنت‌های اسکارنی مورد مطالعه با اکسید سیلیسیم و اکسید کلسیم ارتباط مستقیم دارد (Jenner, 1996) به‌طوری‌که در گارنت‌های گرانیتی خوت که مقادیر اکسید سیلیسیم و کلسیم بیشتری دارند مقادیر این عناصر بیشتر است (جدول‌های ۱ تا ۳).

عناصر نادر خاکی سنگین (HREE)

عناصر نادر خاکی سنگین در رده عناصر با هیگروماگماتوفیلی پایین قرار می‌گیرند (Jenner, 1996). ضریب توزیع آن‌ها تقریباً $0.1 \sim 1$ (D) بوده و



شکل ۹- تغییرات ترکیبی عناصر کمیاب نسبت به ترکیب گارنت‌های اسکارنی پناهکوه

غلظت‌های ۲ ppm و ۲۲۲ ppm به‌ترتیب برای Y و ΣREE^{3+} وجود دارد (شکل ۱۰- a). در مقادیر بالاتر از این، از حالت خطی منحرف شده که نشان‌دهنده ناهمگونی‌های شیمیایی پروتولیت یا تغییرات ترکیب سیال در زمان رشد گارنت است. همچنین، چنین رابطه خطی بین Y و ΣREE^{3+} در تمام غلظت‌های Y و ΣREE^{3+} برای گارنت‌های ناهمسانگرد خوت و گارنت‌های همسانگرد پناهکوه وجود دارد (شکل ۱۰- b و c).

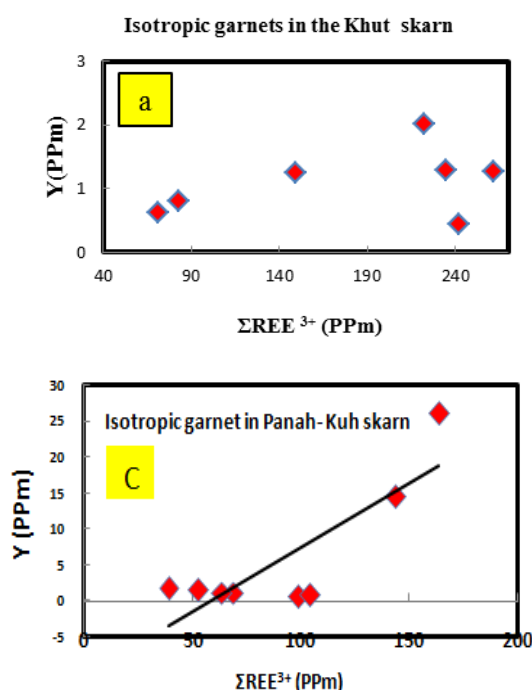
مقایسه عناصر HFSE در گارنت‌های غنی از Al و Fe در اسکارن‌های خوت و پناهکوه نشان می‌دهد که عناصر Y، Zr و Nb تفاوت آشکارتری را نسبت به عناصر Ta، Hf و Th نشان می‌دهند که می‌تواند به‌علت فراوانی کمتر عناصر Ta، Hf و Th باشد (Gaspar *et al.*, 2008) (جدول‌های ۱ تا ۳).

Y اغلب رفتاری مشابه با عناصر نادر خاکی سنگین (HREE) دارد و تقریباً برای گارنت‌های همسانگرد در اسکارن خوت رابطه خطی بین Y و ΣREE^{3+} تا

اسکاندیم (Sc) و کبالت (Co)، تغییرات چشمگیری را نسبت به میزان عضو انتهایی آندرادیت نشان نمی‌دهند. آهن در گارنت‌های آندرادیتی تنها به صورت آهن فریک وجود دارد. از آنجا که اسکاندیم و کبالت جانشین آهن فرو می‌شوند بنابراین طبیعی است که آندرادیت‌های منطقه خوت- پناهکوه دارای مقادیر اندکی از این عناصر باشند (شکل ۹).

اورانیوم (U^{6+}) در ترکیب گارنت‌های آندرادیتی جایگزین آهن فریک در ساختار Y گارنت‌ها می‌شود بنابراین، با افزایش میزان آهن فریک در گارنت‌ها مقدار آن افزوده می‌شود به طوری که غلظت آن در آندرادیت‌های تقریباً خالص پناهکوه (۳۷ ppm) بیشتر از گارنت‌های آندرادیتی (۷/۶ ppm) و گراندیتی خوت (۲/۹ ppm) است و یک روند افزایشی را با میزان آندرادیت در گارنت نشان می‌دهد (شکل ۹). وانادیم (V) عنصری لیتوفیل است. در شبکه گارنت‌ها جانشین آهن فریک می‌شود. بنابراین در گارنت‌های آندرادیتی بیش‌ترین جانشینی را دارد، بنابراین غلظت وانادیوم در گارنت‌های آندرادیتی خوت و پناهکوه بیشتر از گارنت‌های گراندیتی خوت است.

تغییرات عناصر هافنیوم (Hf) و زیرکونیوم (Zr) در گارنت‌های آندرادیتی خوت- پناهکوه به علت یکسان بودن رفتار زمین‌شیمیایی این دو عنصر، بسیار مشابه است. از آنجا که این دو عنصر در گروه عناصر نامتحرک با قدرت هیدروماگماتوفیل کم قرار می‌گیرند، بنابراین غنی‌شدگی چندانی را در آندرادیت‌های اسکارنی خوت- پناهکوه نشان نمی‌دهند اما گارنت‌های گراندیتی خوت دارای مقادیر بیشتری زیرکونیوم هستند که می‌تواند به علت جانشینی این عنصر به جای آلومینیوم در جایگاه Y گارنت‌ها باشد (شکل ۹). تانتالوم (Ta) اندازه و بار یونی مشابه نیوبیوم (Nb) دارد و جزو عناصر نامتحرک محسوب می‌شود، بنابراین، رفتار زمین‌شیمیایی یکسانی را با تغییرات میزان عضو انتهایی آندرادیت در گارنت‌های پناهکوه نشان می‌دهند. فراوانی اندک این عنصر می‌تواند به علت غلظت اندک این عنصر در سنگ میزبان باشد. غلظت Nb در گارنت‌های ناهمسانگرد و آلومینیوم‌دار خوت بیشتر از گارنت‌های آهن‌دار و همسانگرد خوت- پناهکوه است که می‌تواند به علت جانشینی این عنصر همراه با تیتانیوم به جای آلومینیوم در جایگاه Y گارنت باشد (شکل ۹).



شکل ۱۰- نمودار تغییرات REE^{3+} با Y برای گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه

عناصر نادر سیدروفیل

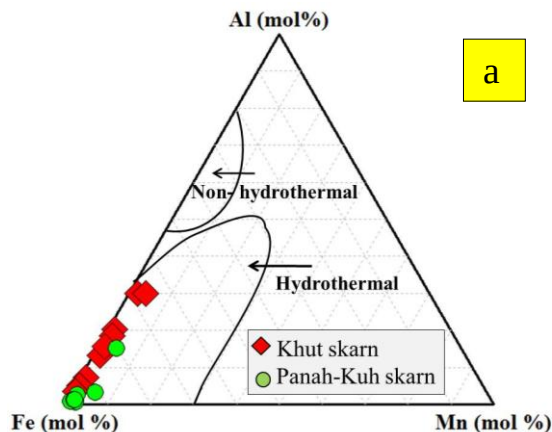
مس بالاترین مقادیر عنصر کالکوفیل را در گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه تشکیل می‌دهد. محتوای بالای مس در گارنت‌های غنی از آهن خوت ناشی از دگرسانی گارنت‌ها در زمان کانه‌زایی سولفیدی است که به افزایش مقدار مس در گارنت‌ها منجر شده است به طوری که مقادیر میانگین مس در گارنت‌های آندرادیتی خوت به ۲۹۰۴ ppm می‌رسد (جدول ۱). در این نوع گارنت‌ها جانشینی مس به جای آهن رخ داده است. در مراحل اولیه اسکارن‌زایی، غلظت مس در سیالات گرمایی به اندازه‌ای نیست که کانه‌های سولفیدی تشکیل شوند و یا در صورت غلظت کافی مس در سیالات، شرایط فیزیکوشیمیایی نظیر دما، اکتیویته گوگرد و Eh سیالات برای تشکیل کانی‌های سولفیدی فراهم نیست. بنابراین، مس در ساختار گارنت‌های غنی از آهن جانشین آهن شده است و در زمان دگرسانی گارنت‌ها در طی مرحله کانه‌زایی سولفیدی مس از ساختار گارنت آزاد شده است. الگوی رفتاری عناصر کمیاب گارنت‌های اسکارنی خوت- پناهکوه تا حدی به کانسار اسکارنی مس- مزرعه شباهت دارد. بنابراین افزایش محتوای مس در گارنت‌های آندرادیتی را می‌توان به عنوان نشانگری در جهت اکتشاف کانسارهای اسکارن در نظر گرفت (Karimzadeh Somarin, 2004). در گارنت‌ها مقادیر میانگین روی بیشتر از سرب بوده و در گارنت‌های گراندیتی خوت به ۸/۴۳ ppm و در گارنت‌های آندرادیتی خوت و پناهکوه به ترتیب به ۷/۷۸ و ۵/۰۹ می‌رسد (جدول‌های ۱ تا ۳).

فرآیند رشد گارنت

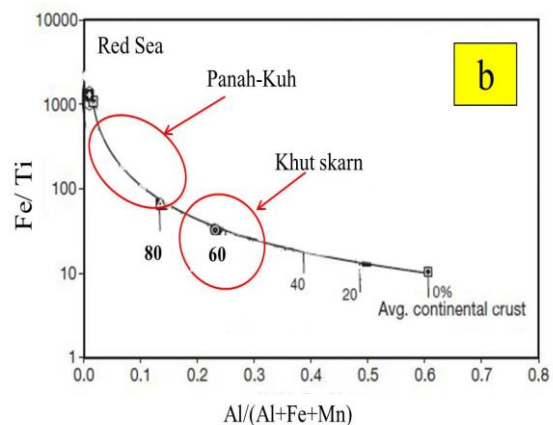
نمودار سه‌تایی Fe-Mn-Al منشأ گرمایی اسکارن‌های خوت و پناهکوه را نشان می‌دهد (شکل ۱۱-a). با استفاده از نمودار $Al/(Al + Fe + Mn)$ در مقابل Fe/Ti می‌توان به درصد حجمی سیالات گرمایی

شرکت‌کننده در کانسار اسکارنی پی برد (شکل ۱۱-b). بر اساس این نمودار، مقادیر $Al/(Al + Fe + Mn)$ برای بیشتر گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه کمتر از ۰/۳ است که نشان‌دهنده مشارکت بیش از ۵۰ درصد سیالات گرمایی در تشکیل کانسار اسکارنی خوت و پناهکوه است. دوره‌های جریان سیال در سامانه‌های گرمایی هم‌زمان با رخداد جوشش بوده و فرآیند جوشش به صورت متناوب تکرار شده است. مطالعات میان‌بارهای سیال بر روی گارنت‌های گراندیتی و آندرادیتی خوت شاهی بر رخداد جوشش در سامانه اسکارنی خوت- پناهکوه است. نحوه تشکیل گارنت‌های اسکارنی مورد مطالعه شباهت زیادی به اسکارن‌های توصیف شده توسط Jamtveit و همکاران (۱۹۹۳) در منطقه ریفت مرکزی اسلو در جنوب تروژ دارد (شکل ۱۲). در این اسکارن‌ها رشد گارنت هم‌زمان با دوره‌های جوشش بوده است. جوشش باعث اکسیداسیون مایع باقی‌مانده شده و افزایش سریع اکتیویته Fe^{3+} نسبت به Al^{3+} را به دنبال دارد که پیامد آن ته‌نشست سریع آندرادیت در اسکارن خوت- پناهکوه است. فراوانی میان‌بارهای سیال در گارنت‌ها نشان می‌دهد که سیالات در نرخ‌های رشد بالا به دام افتاده‌اند. برشی شدن مجموعه‌های کانمایی پیش‌رونده در کانسارهای اسکارنی متداول است (Einaudi et al., 1981؛ Meinert, 1992؛ Ciobanu and Cook, 2004) و به عنوان فرآیندی جهت شروع تراوش فراگیر عمل می‌کند. تراوش معمولاً توسط افزایش فشار سیالات شدت می‌یابد که توسط بافت‌های برشی مشخص می‌شود. به علت تحرک‌پذیری پایین عناصر شدت میدان بالا، نظیر Al، گارنت‌های گروسولاری در دوره‌های میان جوشش رشد کرده است. در این زمان گارنت‌های غنی از Al به آرامی رشد کرده و در تعادل نزدیک با سیالات منفذی محلی هستند که نشان‌دهنده نسبت‌های پایین سنگ/آب (W/R) در زمان

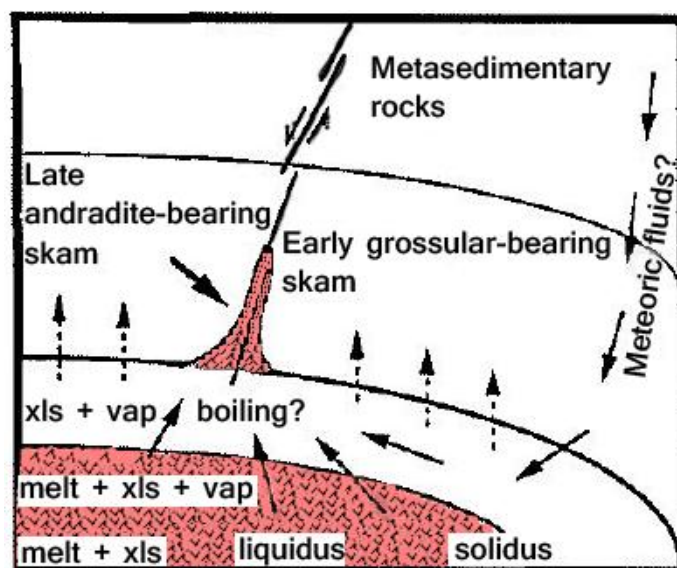
طی متاسوماتیسم تراوشی (advective) در نسبت‌های بالای سنگ/آب و در مکان‌هایی که جذب سطحی کنترل‌کننده اصلی روندهای REE مشاهده شده هستند، رشد می‌کنند.



متاسوماتیسم انتشاری هستند. در چنین شرایطی مشارکت و تفریق REE اساساً توسط فرآیندهای بیرونی و شیمی بلور کنترل می‌شود در حالی که گارنت‌های غنی از Fe به سرعت از سیالات خارجی در



شکل ۱۱- a) نمودار سه‌تایی Fe-Mn-Al (mol%)، تفکیک‌کننده میدان ترکیبی سیالات گرمایی از سیالات غیرگرمایی با استفاده از آنالیز شیمیایی اسکارن‌های غنی از گارنت (Heimann et al., 2009) و b) نمودار $Al/(Al + Fe + Mn)$ در مقابل Fe/Ti : اعداد روی منحنی درصد حجمی سیالات گرمایی شرکت‌کننده در تشکیل کانسار اسکارنی را مشخص می‌کند (Heimann et al., 2009).



شکل ۱۲- این مدل توسط Jamtveit و Hervig (۱۹۹۴) برای تشکیل گارنت‌های گراندیتی (آندرادیت-گروسولار) در منطقه ریف مرکزی اسلو در جنوب نروژ پیشنهاد شده است و به علت شباهت تشکیل آن با گارنت‌های مورد مطالعه به کانسار اسکارنی خوت و پناهکوه بسط داده شده است (XLS= Solid phases, Vap= H₂O-rich fluid phase).

تراوشی شکل گرفته‌اند و روندهای متفاوت توزیع عناصر نادر خاکی را ایجاد کرده‌اند. تمام گارنت‌های اسکارنی خوت-پناهکوه غنی‌شدگی بیشتری از عناصر نادر خاکی

نتیجه‌گیری

گارنت‌های اسکارنی خوت و پناهکوه در جنوب غرب یزد در یک سامانه گرمایی پیچیده توسط متاسوماتیسم

زمین‌شیمیایی همچون شرایط شکل‌گیری اسکارن مؤثر واقع شود. بنابراین، بررسی عناصر نادر خاکی در شناسایی خاستگاه اسکارن‌ها و کانسارهای اقتصادی وابسته بسیار مؤثر خواهد بود.

سپاسگزاری

از همکاری‌های پروفیسور ناکاشیما از بخش علوم‌زمین دانشگاه یاماگاتا در ژاپن برای انجام آنالیز نقطه‌ای کانی‌ها و همچنین پروفیسور ایشی‌یاما برای انجام آنالیز LA-ICP-MS گارنت‌ها در دانشگاه آکیتای ژاپن تشکر و قدردانی می‌شود.

سبک نسبت به سنگین را نشان می‌دهند. عناصر نادر خاکی سبک در گارنت‌های گرانبدیتی بیش‌ترین غنی‌شدگی را دارند، زیرا در ترکیبات حدواسط عناصر نادر خاکی نسبت به اعضای نهایی محلول‌تر هستند که نشان‌دهنده تطابق مثبت بین مقدار Al و REE است. همچنین، این غنی‌شدگی می‌تواند توسط تفاوت در شعاع‌های یونی بین Ca^{2+} و یون‌های REE^{3+} در جایگاه X توضیح داده شود. این نتایج نشان می‌دهد که تحرک اساسی عناصر نادر خاکی می‌تواند در سامانه‌های گرمایی در سنگ‌های کربناته در عمق کم تا متوسط در پوسته قاره‌ای رخ دهد، در نتیجه روندهای توزیع REE در گارنت‌های اسکارنی می‌تواند برای مطالعه فرآیندهای

منابع

شریفی، ر. (۱۳۸۷) بررسی خصوصیات زمین‌شیمیایی اندیس‌های فلزی در منطقه پناه‌کوه یزد با دیدگاه اکتشافی. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه شیراز، شیراز، ایران.

- Adriana, H., Paul, G. S., Graham, S. T., Colin, H. H. and Wolfgang, R. L. (2009) Geochemistry of garnet-rich rocks in the southern Curnamona Province, Australia, and their genetic relationship to Broken Hill-type Pb-Zn-Ag mineralization. *Economic Geologists* 104: 687-712.
- Boynton, W. V. (1984) Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: Henderson, P. (Ed.): *Rare earth element geochemistry*. Elsevier, London, 63-114.
- Chernoff, C. B. and Carlson, W. D. (1999) Trace element zoning as a record of chemical disequilibrium during garnet growth. *Geology* 27: 555-558.
- Ciobanu, C. L. and Cook, N. J. (2004) Skarn textures and a case study: the ocna de fier-doghecea orefield, Banat, Romania. *Ore Geology Reviews* 24: 315-370.
- Einaudi, M. T., Meinert, L. D. and Newberry, R. J. (1981) Skarn deposits. 75th Anniversary Volume, Society of Economic Geologists, USA.
- Gaspar, M. (2005) The Crown Jewel gold skarn deposit. Ph.D. Thesis, Washington State University, Washington, USA.
- Gaspar, M., Knaack, C., Meinert, L. D. and Moretti, R. (2008) REE in skarn system: A LA-ICP-MS study of Garnet from the Crown Jewel gold deposit. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 72: 185-205.
- Griffin, W. L., Smith, D., Ryan, C. G., O'Reilly, S. Y. and Win, T. T. (1996) Trace element zoning in mantle minerals: metasomatism and thermal events in the upper mantle. *Canadian Mineralogist* 34: 1179-1193.
- Heimann, A., Spry, P. G., Teale, G. S., Connor, C. H. H. and Leyh, W. R. (2009) Geochemistry of garnet-rich rocks in the Southern Curnamona province, Australia and their genetic relationship to Broken Hill-type Pb-Zn-Ag mineralization geology. *Economic Geology* 104: 687-712.
- Hickmott, D. D. and Spear, F. S. (1992) Major and trace element zoning in garnets from calcareous pelites in the NW Shelburne Falls Quadrangle, Massachusetts: garnet growth histories in retrograded rocks.

- Journal of Petrology 33: 965-1005.
- Jamtveit, B. and Hervig, R. L. (1994) Constraints on transport and kinetics in hydrothermal systems from zoned garnet crystals. *Science* 263: 505-508.
- Jamtveit, B., Wogelius R. A. and Fraser, D. G. (1993) Zonation patterns of skarn garnets: Records of hydrothermal system evolution. *Geology* 21: 113-116.
- Jenner, G. A. (1996) Trace element geochemistry of igneous rocks: geochemical nomenclature and analytical geochemistry. In: Wyman, D. A. (Ed.): trace element geochemistry of volcanic rocks: applications for massive sulphide exploration. Geological Association of Canada Short Course Notes 12: 51-77.
- Karimzadeh Somarin, A. (2004) Garnet composition as an indicator of Cu mineralization: Evidence from Skarn deposits of NW Iran. *Journal of Geochemical Exploration* 81: 47-57.
- McIntire, W. L. (1963) Trace element partition coefficients: A review of theory and applications to geology. *Geochemica et Cosmochimica Acta* 27: 1209-1264.
- Meinert, L. D. (1992) Skarns and skarn deposits. *Geoscience Canada* 19: 145-162.
- Menzer, G. (1926) Die kristall structure von granat. *Zeitschrift fu Kristallographie* 63: 157-158.
- Smith, M. P., Henderson, P., Jeffries, T. E. R., Long, J. and Williams, C. T. (2004) The rare earth elements and uranium in garnets from the Beinn and Dubhaich aureole, Skye, Scotland, UK: constraints on processes in a dynamic hydrothermal system. *Journal of Petrology* 45: 457-484.
- Sverjensky, D. M. (1984) Europium redox equilibria in aqueous solution. *Earth and planetary Science Letters* 67: 70-78.
- Yazdi, M. (1991) The study of economic geology and lithology in Khut ore deposit, Ms. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran.
- Zarasvandi, A., Liaghat, S., Zentilli, M. A. (2005) Geology of Darreh-Zerreshk and Ali-Abad porphyry copper deposits, Central Iran. *International Geology Reviews* 47: 620-646.

REE geochemistry in skarn garnets from Khut and Panah-Kuh Ore feposit, West of Yazd

Azam Zahedi ^{1*}, Mohammad Boomeri ¹ and Mohammad Ali Mackizadeh ²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciencse, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

² Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The Khut and Panah-Kuh skarn deposit is located at about 50 km northwest of Taft in Yazd province. The analyses of major and REE's by microprobe and LA-ICP-MS show that there are two major types of garnet at Khut and Panah Kuh skarns. The garnets in the Khut skarn range from (Ad_{74.30}Gr_{24.81}- d_{32.06}Gr_{66.61}) to almost pure andradite (Adr>96) in composition whereas all Panh-Kuh skarn garnets are almost pure andradite and isotropic. The REE become commonly enriched in garnets during metasomatic process. On the Fe/Ti versus Al/(Al + Fe + Mn) diagrams, these rocks suggests that over 50% of hydrothermal fluid phase has been effective in the formation of garnets. Comparison of chondrite- normalized REE patterns garnets exhibit that all garnets have light REE (LREE) enrichment and heavy REE (HREE) depletion, with different Eu anomalies. Fe-enriched garnets are characterized with positive Eu anomaly whereas grandite show negative Eu anomaly. Differences in the magnitude of the anomaly reflect local heterogeneities of the system such as protolith as well as metasomatic fluid. The same abundance pattern of REE in the skarn and garnet suggests that garnet is the most important REE host mineral. Therefore, the study of REE geochemical behavior is benefiial in understanding the evolution of metasomatic fluids.

Key words: Geochemistry, REE's, Garnet, Skarn, Khut and Panah-Kuh

* zahedi.geochemistry@gmail.com