

Genesis and tectono-magmatic setting of Sadrabad iron Skarn (west of Yazd)

Saeid Moshtagh ¹, Hemayat Jamli ^{1*}, Alireza Nadimi Shahraki ¹, Hashem Bagheri ¹
and Fariborz Baniadam ²

¹ Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Isfahan, Isfahan, Iran

² Department of Geomatics, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran

Abstract

The Sadrabad iron deposit is located 28 km west of Sadrabad village (west of Yazd) at the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. The Upper Triassic-lower Jurassic sedimentary rocks (dolomitic limestone, sandstone, shale and marl), the Cenozoic granite to dioritic intrusive bodies and the Quaternary unconsolidated deposits outcrop in the study area. The intrusive bodies are of I-type calc-alkaline series formed in syn-collision to post collision settings of continental margin subduction zone. The later quartz monzodiorite intrusions played a significant role in iron mineralization. The location of mineralization controlled by NW-SE and NE-SW fault systems. Olivine, clinopyroxene, garnet, tremolite-actinolite, epidote, serpentine, talc, phlogopite, calcite, dolomite, brucite and hydromagnesite are the main skarn minerals. The ore bodies consist mainly of magnetite with minor pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite which occur as massive, vein-veinlets, brecciate and disseminated magnetite. Skarn formation occurs in two prograde and retrograde stages. Olivine, clinopyroxene and garnet formed in prograde and the remaining minerals in retrograde stages. The temperature and salinity of fluid inclusions in quartz veins associated with serpentine (in retrograde stage) range from 217 to 280[°]C and 8 to 16 (wt %) NaCl respectively, indicating the mixing of magmatic and meteoric water in retrograde stage. The Mg-bearing silicates such as serpentine, phlogopite, diopside and talc in the Sadrabad skarn, point to the mineralization of magnesian type.

Keywords: Iron deposit, Magnesian skarn, Subduction zone, Sadrabad, West of Yazd

* h.jamali@sci.ui.ac.ir

ژنز و جایگاه تکتونوماگمایی اسکارن آهن صدرآباد (باختر یزد)

سعید مشتاق^۱، حمایت جمالی^{۱*}، علیرضا ندیمی شهرکی^۱، هاشم باقری^۱ و فریبرز بنی آدم^۲

^۱ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

^۲ گروه ژئومتیکس، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

چکیده

کانسار آهن صدرآباد در ۲۸ کیلومتری باختر صدرآباد (باختر استان یزد) و در کمان ماگمایی ارومیه - دختر جای دارد. سنگ‌های رخنمون یافته در منطقه شامل سنگ‌های رسوبی تریاس پسین - ژوراسیک پیشین (سنگ آهک دولومیتی، ماسه‌سنگ، شیل و مارن)، توده‌های گرانیتی تا دیوریتی سنوزوییک و نهشته‌های کواترنری هستند. توده‌های نفوذی از سری ماگمایی کالک‌آلکان و از گرانیت‌های نوع I برخوردی تا پس از برخوردی پهنه فروانش حاشیه قاره‌ای هستند. در پیدایش کانسار آهن، توده‌های با ترکیب کوارتزومونزدیوریت تأخیری تر نقش اصلی را داشته‌اند. گسل‌های با روند شمال-باختری - جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در کنترل کانه‌زایی نقش بسزایی داشته‌اند. کانی‌های الیوین، کلینوپیروکسن، گارنت، ترمولیت-کتینولیت، اپیدوت، سرپانتین، تالک، فلوگوپیت، کلسیت، دولومیت، بروسیت و هیدرومنیزیت از کانی‌های اسکارنی در این کانسار هستند. ماده معدنی که بیشتر از مگنتیت همراه با مقدار اندکی از پیریت، کالکوپیریت و پیروتیت پدید آمده، به‌صورت عدسی‌های توده‌ای، رگه-رگچه ای، برشی و پراکنده دیده می‌شود. پیدایش اسکارن در دو مرحله پیش‌رونده و پس‌رونده روی داده است. کانی‌های الیوین، کلینوپیروکسن و گارنت در مرحله پیش‌رونده و کانی‌های دیگر در مرحله پس‌رونده پدید آمده‌اند. میانبارهای سیال در رگچه‌های کوارتز همراه با سرپانتین (مرحله پس‌رونده)، بازه دمایی ۲۱۷ تا ۲۸۰ درجه سانتیگراد و درجه شوری ۸ تا ۱۶ درصد وزنی معادل NaCl را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده آمیختگی آب‌های ماگمایی با آب‌های جوی در مرحله پیدایش اسکارن پس‌رونده است. وجود سیلیکات‌های منیزیم‌دار مانند سرپانتین، فلوگوپیت، دیوپسید و تالک، کانسار آهن صدرآباد را در رده اسکارن‌های آهن نوع منیزیم‌دار جای می‌دهد. واژه‌های کلیدی: کانسار آهن، اسکارن منیزیم‌دار، پهنه فروانش، صدرآباد، باختر یزد

مقدمه

جغرافیایی شمالی ۵۹' ۴۵" تا ۳۱° ۴۶' و در پهنه

کمان ماگمایی ارومیه - دختر جای دارد (شکل ۱). این کانسار به‌همراه دیگر کانسارهای آهن، مانند کانسارهای

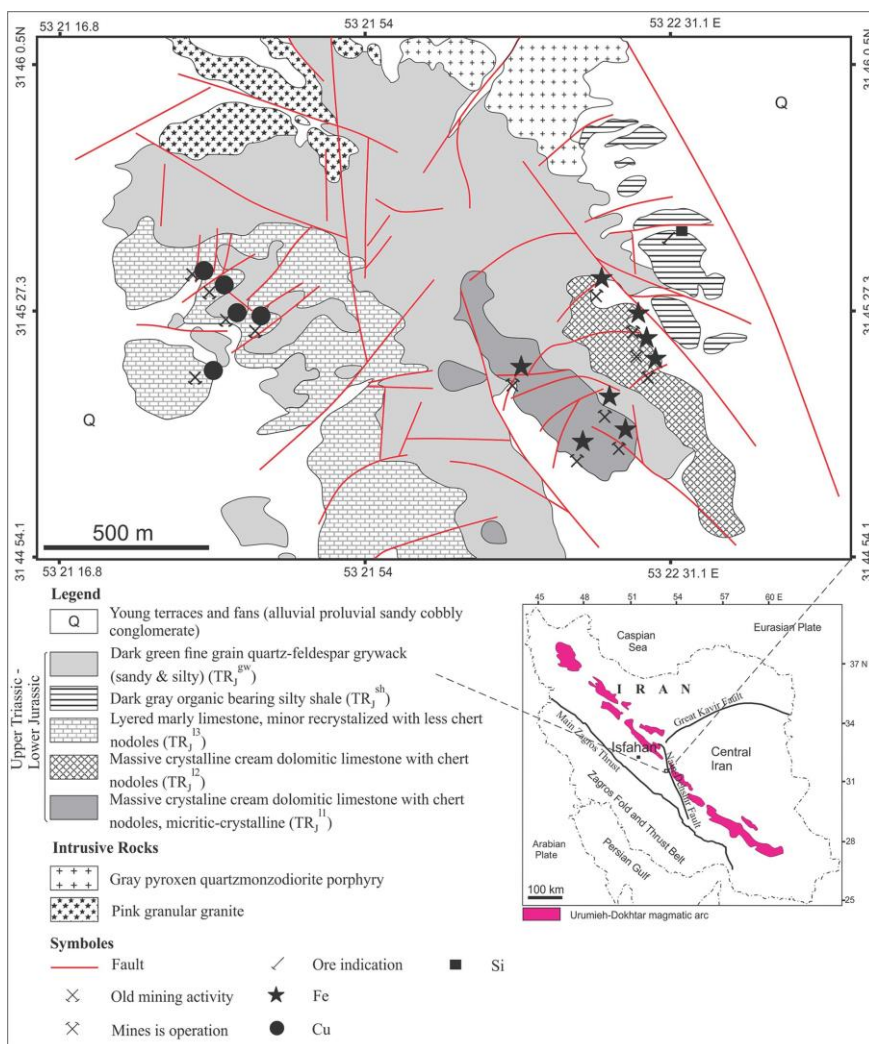
کانسار آهن صدرآباد در میان طول‌های جغرافیایی خاوری ۱۷' ۲۱" تا ۵۳° ۲۲' ۳۳" و عرض‌های

* h.jamali@sci.ui.ac.ir

کانی‌شناسی، بررسی زمین‌شیمی توده‌های آذرین درونی اسکارن‌ساز، هم در شناخت نوع اسکارن در منطقه صدرآباد سودمند است و هم در شناسایی جایگاه تکتونوماگمایی منطقه ابزار کارآمدی است (Meinert, 1995)؛ به‌گونه‌ای که در طراحی الگوهای اکتشافی و شناسایی پهنه‌های امیدبخش می‌تواند سودمند باشد. این پژوهش افزون بر شناسایی تیپ کانسار آهن صدرآباد بر پایه بررسی‌های کانی‌شناسی، کانه‌نگاری، ساخت و بافت و سیال‌های درگیر، نقش توده‌های آذرین درونی گوناگون در پیدایش کانسار و پهنه زمین‌پویای پیدایش آنها را نیز ارزیابی کرده است.

آهن اسکارنی سورک (Karimi, 2012)، دره زرشک (Taghipoor, 2011) و کوه آهن (Kohsari, 2007) بخشی از ایالت فلززایی آهن باختر یزد هستند. Liaghat (۲۰۱۱) اسکارن‌های باختر یزد را وابسته به توده‌های گرانیتویدی با ترکیب کوارتز دیوریتی، کوارتز مونزونیتی، گرانودیوریتی تا گرانیتی سنوزوییک می‌داند.

بررسی‌های کانی‌شناختی و بافت‌شناسی کانی‌ها ابزار مهمی در شناسایی اسکارن‌های گوناگون هستند. همچنین، کانی‌شناسی یک عامل مهم در شناخت خاستگاه اسکارن‌ها، دمای پیدایش و شناسایی کانسارهای با ارزش اقتصادی است. افزون بر



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ۱:۵۰۰۰ کانسار آهن صدرآباد (باختر یزد) از Baniadam (۲۰۱۳)، با تغییرات.

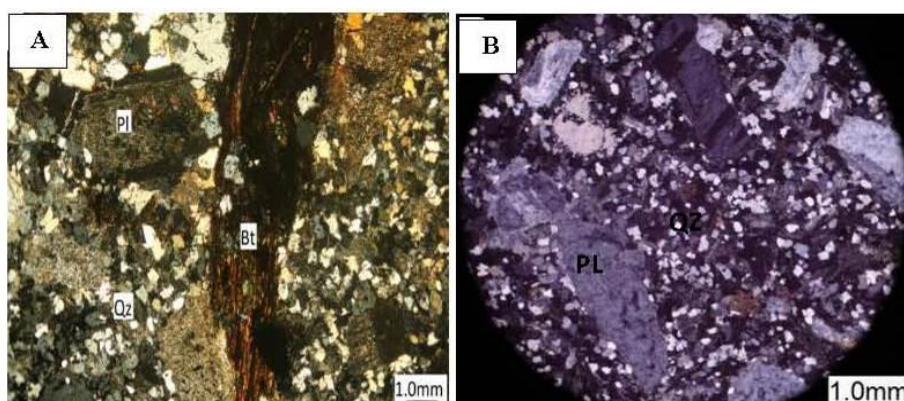
زمین‌شناسی منطقه صدرآباد

محدوده صدرآباد بخشی از ایالت ساختاری ایران مرکزی بوده و در کمان ماگمایی ارومیه - دختر جای دارد. رویدادهای زمین‌شناسی این ناحیه پیامد گسل دهشیر - بافت با روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری هستند که از ۱۵ کیلومتری خاور منطقه می‌گذرد. فعالیت ماگمایی ترسیری باختر یزد نیز چه‌بسا در پی جابجایی این گسل روی داده است (Liaghat, 2011). بر پایه نقشه زمین‌شناسی منطقه صدرآباد (شکل ۱)، سنگ‌های رخنمون‌یافته از کهن به جدید، شامل نهشته‌های رسوبی (شیل، ماسه‌سنگ، آهک دولومیتی و مارن به سن تریاس پسین - ژوراسیک پیشین) و توده نفوذی گرانیتوئیدی سنوزویک با ترکیب گرانیات تا دیوریت هستند که با نهشته‌های کواترنری فراگرفته شده‌اند. در کانسار خوت در ۵۰ کیلومتری شمال‌باختری تفت نیز پس از ائوسن، کانی‌سازی اسکارنی در بخش سطح هم‌بری توده با آهک‌های تریاس پسین رخ داده است (Zahedi and Boomeri, 2014). توده آذرین درونی منطقه صدرآباد به‌صورت استوک‌های کوچک تا متوسط و تپه‌مانند در سنگ‌های آواری و کربناته تریاس پسین - ژوراسیک پیشین که بیشتر ترکیب آهک دولومیتی دارد نفوذ کرده و کانه‌سازی آهن (مگنتیت) همراه با پیدایش سرپانتین را در پی داشته است.

از آنجایی که توده‌های نفوذی در پیدایش اندوخته‌های اسکارن اهمیت دارند، نخست به بررسی توده نفوذی منطقه صدرآباد از دیدگاه سنگ‌نگاری، ترکیب سنگ‌شناختی و شناسایی جایگاه زمین‌شناختی آن پرداخته و سپس نقش آنها در پیدایش انواع کانسارهای اسکارنی بررسی می‌شود. توده‌های آذرین درونی صدرآباد را می‌توان به دو گروه سنگی اصلی گرانیتی و کوارتز مونوزودیوریتی رده‌بندی کرد:

گرانیات: گرانیات در شمال و شمال‌باختری نقشه بیشترین گسترش را دارد و به رنگ خاکستری روشن تا صورتی دیده می‌شود. دارای بافت پورفیروئید و گرانولار است (شکل ۲- A). کانی اصلی آن پلاژیوکلاز با اندازه‌های ۱ تا ۴ میلیمتر و فراوانی ۲۵ تا ۳۰ درصد حجمی است و در زمینه‌ای ریز تا متوسط بلور از کوارتز و پلاژیوکلاز و آلکالی‌فلدسپار جای گرفته است. بیوتیت، اسفن و کانی کدر (احتمالاً مگنتیت) به مقدار کم دیده می‌شود. اپیدوت، سریسیت و کائولینیت کانی‌های ثانویه سنگ هستند. پلاژیوکلازها به‌صورت شکل دار (اتومورف) تا نیمه‌شکل دار (ساب‌اتومورف) و گاه با بافت منطقه‌ای دیده می‌شوند که سریسیتی شده‌اند و گاه دارای نشانه‌هایی از سوسوریتی‌شدن هستند. برخی بلورهای آلکالی‌فلدسپار ماکل کارلسباد دارد و گاه رشد همزمان آن با کوارتز بافت گرانوفیری را پدید آورده است.

کوارتز مونوزودیوریت پورفیری: این سنگ‌ها دارای رخنمون‌های پراکنده بوده و در برابر گروه سنگی گرانیتی گسترش کمتری دارند. این سنگ‌ها در شمال‌باختری نقشه به‌صورت آپوفیز در گرانیات و گری‌وک‌ها رخنمون پیدا کرده‌اند. در نمونه دستی به‌صورت خاکستری متمایل به سبز تا خاکستری تیره بوده و دارای بافت گرانوبلاستیک، پورفیری، پورفیروبلاستیک هستند. کانی اصلی، پلاژیوکلاز با فراوانی ۴۰ درصد حجمی است و سریسیتی و اپیدوتی‌شدن ضعیفی را نشان می‌دهد. آلکالی‌فلدسپارها نزدیک به ۲۰ درصد حجمی سنگ را دربرمی‌گیرند و بیشتر کائولینیتی شده و در نور طبیعی کدر دیده می‌شوند. فنوکریست‌های آمفیبول در کوارتز مونوزودیوریت تجزیه‌شدگی به اورالیت، اپیدوت، کلریت و کلسیت نشان می‌دهد (شکل ۲- B). از کانی‌های فرعی این سنگ‌ها می‌توان اسفن، آپاتیت، زیرکن و کانی‌های کدر را نام برد.



شکل ۲- تصویرهای میکروسکوپی از سنگ‌های آذرین درونی صدرآباد (باختر یزد). (A) گرانیت با بافت پورفیروئید. پلاژیوکلاز سریستی و بیوتیت کلریتی شده در زمینه‌ای از کوارتز- فلدسپار ریزبلور؛ (B) پلاژیوکلازهای درشت‌بلور در زمینه کوارتز- فلدسپاری ریز بلور در کوارتز موزودیوریت (Pl: پلاژیوکلاز؛ Bt: بیوتیت؛ Qz: کوارتز).

نازک صیقلی و ۹ مقطع صیقلی از سنگ میزبان کانه‌زایی، نسل‌های گوناگون توده‌های آذرین درونی و بخش‌های گوناگون کانه‌زایی بررسی شده‌اند. همچنین، برای تکمیل بررسی‌های کانی‌شناسی، ۵ نمونه از پهنه کانه‌زایی به روش پراش اشعه X (XRD) تجزیه شدند. افزون بر این، ۱۰ نمونه از توده‌های نفوذی به روش فلورسانس اشعه X (XRF) در آزمایشگاه کانساران بینالود تجزیه شدند (جدول ۱).

دستگاه XRD به کار گرفته شده در این آزمایشگاه ساخت کارخانه PHILIPS، مدل PW1800 و لامپ آن مس است. دستگاه XRF نیز ساخت کمپانی PHILIPS مدل PW1480 است. پس از بررسی دقیق کانی‌شناسی، سه نمونه گارنت و چهار نمونه پیروکسن به روش آنالیز ریزکاو الکترونی (EPMA) در شرکت کانساران بینالود تجزیه شدند (جدول‌های ۲ و ۳). همچنین، از رگچه‌های سیلیسی در پهنه کانه‌زایی، ۲ نمونه دوبر صیقل برای بررسی سیال‌های درگیر آماده و بررسی شدند (جدول ۴). برداشت‌های زمین‌ساختی از شکستگی‌ها و گسل‌های گوناگون انجام شد (جدول ۵) و وابستگی میان آنها و کانه‌زایی بررسی شد.

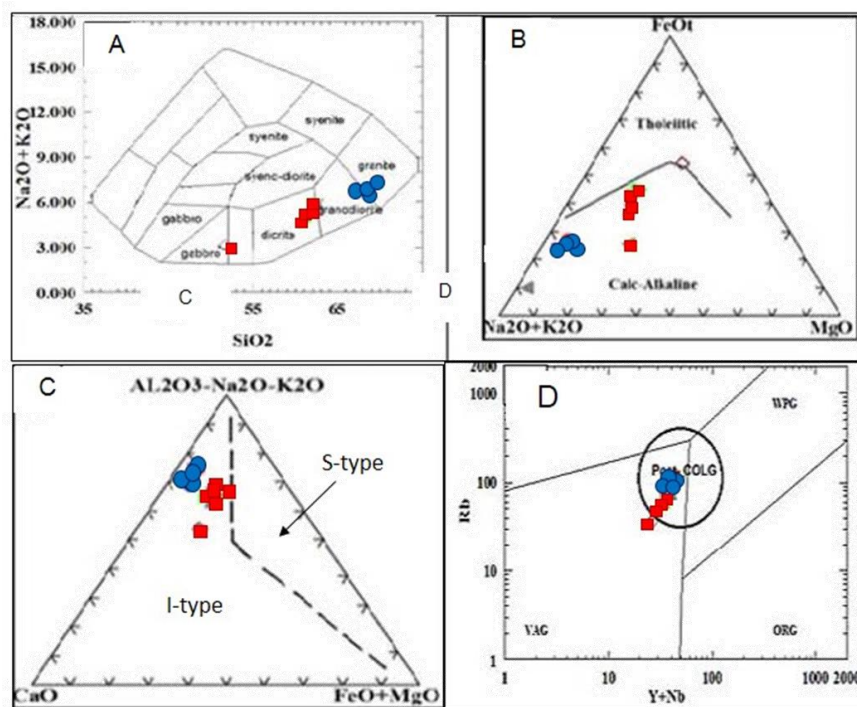
برای بررسی زمین‌شیمی و شناسایی جایگاه زمین‌ساختی ماگمای (تکتونوماگمایی) سازنده توده‌های نفوذی، ده نمونه به روش XRF تجزیه شد (جدول ۱). برپایه نمودار TAS، سنگ‌های نفوذی منطقه صدرآباد تغییراتی از گرانیت تا دیوریت نشان می‌دهند؛ اما همان‌گونه‌ای که پیش از این گفته شد، دو گروه گرانیتی و کوارتز موزودیوریتی را می‌توان به خوبی شناسایی کرد (شکل ۳- A). در نمودار مثلثی AFM که سری‌های توله‌ایتی و کالک‌آلکان را از یکدیگر جدا می‌کند، نمونه‌های این منطقه در بخش سری کالک‌آلکان جای می‌گیرند (شکل ۳- B). همچنین، برپایه نمودارهای شناسایی گرانیتوئیدهای نوع I و S، نمونه‌های منطقه صدرآباد در گستره گرانیت‌های نوع I جای گرفته‌اند (شکل ۳- C). در نمودارهای شناسایی جایگاه زمین‌ساختی نیز، سنگ‌های منطقه که در گستره سازوکار زمین‌ساختی پهنه فرورانش کمان قاره‌ای (VAG) جای می‌گیرند و گرایش به پهنه‌های پس از برخورد (دایره سیاه) دارند (شکل ۳- D).

روش انجام پژوهش

این پژوهش برپایه بررسی‌های صحرائی و آزمایشگاهی انجام شده و ۳۰ مقطع نازک، ۵ مقطع

جدول ۱- تجزیه شیمیایی سنگ‌های نفوذی صدرآباد به روش XRF. اکسیدها برپایه درصد وزنی، عناصر فرعی برپایه ppm گزارش شده‌اند.

Sample No.	Mo1	Mo10	Mo2	Mo3	Mo4	Mo5	Mo6	Mo7	Mo8	Mo9
SiO ₂	67.25	61.01	69.68	62.24	61.18	51.63	62.54	69.52	62.73	68.79
Al ₂ O ₃	17.11	16.81	16.58	16.86	16.81	17.42	16.75	15.42	16.91	16.34
Fe ₂ O ₃	3.03	3.08	0.95	6.5	6.58	9.96	5.66	2.63	5.62	3.03
MnO	0.081	0.159	0.001	0.088	0.065	0.149	0.121	0.011	0.103	0.03
MgO	0.88	2.68	0.26	2.42	2.42	4.35	2.68	0.57	2.56	0.7
CaO	3.69	3.11	3.52	3.51	4.11	7.98	3.75	2.32	3.86	2.58
Na ₂ O	3.69	3.35	3.56	3.45	3.31	2.01	2.91	3.48	3.34	3.72
K ₂ O	3.21	1.87	3.85	1.89	1.42	1.11	2.89	3.68	2.45	3.01
TiO ₂	0.245	0.481	0.168	0.45	0.471	0.663	0.496	0.199	0.538	0.228
P ₂ O ₅	0.054	0.079	0.033	0.074	0.084	0.086	0.076	0.045	0.088	0.054
L.O.I.	0.48	2.56	1.1	2.18	3.18	4.33	1.78	1.88	1.53	1.19
Total	99.72	97.86	99.7	99.66	99.63	99.69	99.65	99.75	99.64	99.67
Ba	662	360	714	530	544	288	848	562	973	649
Rb	117	62	102	69	53	38	101	89	77	118
Sr	397	323	397	359	343	356	328	376	380	356
Y	34	31	40	30	27	22	39	30	36	42
Zr	197	159	194	162	164	117	171	194	174	187
Nb	4	3	2	6	7	5	9	5	4	2
Th	4	2	11	1	3	5	7	2	7	5
Pb	44	52	41	42	18	98	46	24	59	59
Ga	19	19	21	18	19	16	18	19	16	17
Zn	55	64	25	56	41	86	54	17	82	32
Cu	313	31	31	36	41	28	40	16	33	39
Ni	40	116	49	46	38	238	62	34	39	45
V	44	103	23	97	99	168	105	32	104	40
Cr	11	15	9	10	5	142	15	11	18	13
Co	9	6	5	4	7	11	9	8	5	7
U	2	2	1	1	2	1	2	1	1	1
W	14	6	3	2	5	4	2	17	8	2
Mo	2	2	1	4	2	3	2	2	1	4
La	8	19	15	14	19	5	5	24	14	22
Ce	17	46	40	27	46	9	13	75	25	52



Symbols: ● Granite ■ Quartz monzodiorite

شکل ۳- رده‌بندی سنگ‌های آذرین درونی منطقه صدرآباد (باختر یزد) در: (A) نمودار Cox و همکاران (۱۹۷۹)؛ (B) نمودار AFM (Irvine and)؛ (C) نمودار ACF (Baragar, 1971)؛ (D) نمودار Y+Nb در برابر Rb (Pearce et al., 1994).

جدول ۴- داده‌های حاصل از بررسی میانبرهای سیال در کانسار آهن صدرآباد (باختر یزد).

No. of F.I	Sample No.	T _{LM}	T _H	Type of homogenization	NaCl (wt%)	Size (μ)
2	7	5-	248	L+V→L	8	10
3	7	12-	273	L+V→L	16	5
1	7	11-	217	L+V→L	15	5
1	7	8.5-	165	L+V→L	12	5
2	7	5.9-	279	L+V→L	13.5	7

جدول ۵- برداشت‌های صحرایی از رگه‌های آهن‌دار کانسار صدرآباد (باختر یزد).

Strike/Dip	Ore grade
300/40NE	high
209/83W	high
160/60W	high
220/90	high
320/55N	high
160/65W	high
296/38NE	medium
140/46S	low
180/90	low

اسکارن‌زایی و کانه‌زایی

نفوذ استوک‌های گرانیتوئیدی در سنگ‌های رسوبی با فرایندهای دگرگونی مجاورتی، مرمری شدن سنگ آهک‌های دولومیتی، هورنفلسی شدن ماسه‌سنگ‌ها و شیل‌ها و پیدایش اسکارن همراه بوده است. به‌هنگام تبلور توده نفوذی و برون‌رست سیال‌های متاسوماتیک، اسکارن در سنگ میزبان پدید آمده است. برپایه شواهد صحرایی و بررسی‌های میکروسکوپی، اسکارن آهن صدرآباد به‌صورت برون اسکارن در سنگ آهک‌های دولومیتی تریاس پسین - ژوراسیک پیشین رخ داده است. پیروکسن، گارنت، ترمولیت - اکتینولیت، اپیدوت، سرپانتین، تالک، کلریت، کلسیت، کوارتز، کانی‌های رسی و کانی‌های کدر (مگنتیت و اندکی سولفید) از کانی‌های اصلی پهنه اسکارنی است. در باختر محدوده، کانی‌سازی‌هایی از مس نیز رخ داده است و نشانه‌هایی از معدن‌کاری شدادی روی آنها دیده می‌شود (شکل ۱).

بررسی میکروسکوپی پهنه‌های گوناگون اسکارن نشان می‌دهد که فرایند اسکارن‌زایی در دو مرحله اصلی

جدول ۲- داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برای گارنت، به‌همراه محاسبه فرمول ساختاری و اعضای پایانی گارنت در منطقه صدرآباد (باختر یزد).

Sample No.	M-1	M-2	M-3
SiO ₂	43.05	42.28	44.55
Al ₂ O ₃	0.07	0.30	0.37
FeO*	19.08	15.74	13.99
MnO	0.45	0.61	0.70
CaO	34.70	38.39	35.84
Na ₂ O	0.01	0.57	2.80
Total	97.36	97.89	98.25
Oxygen No.	12.00	12.00	12.00
Si	3.56	3.43	3.53
Al	0.01	0.03	0.03
Fe ²⁺	0.07	0.05	0.05
Fe ³⁺	1.25	1.01	0.88
Mn	0.03	0.04	0.05
Ca	3.08	3.34	3.04
Na	0.00	0.09	0.43
Sum	8.00	8.00	8.00
Almandine	0.00	0.00	0.00
Andradite	99.46	97.25	96.22
Grossular	0.00	0.07	0.35
Pyrope	0.00	0.00	0.00
Spessartine	0.54	2.68	3.42
Uvarovite	0.00	0.00	0.00

جدول ۳: داده‌های تجزیه ریزکاو الکترونی برای پیروکسن، به‌همراه محاسبه فرمول ساختاری و اعضای پایانی آن در منطقه صدرآباد (باختر یزد).

Sample No.	M-71	M-72	M-73	M-74
SiO ₂	61.06	59.09	60.89	60.77
Al ₂ O ₃	0.27	0.26	0.07	0.32
Fe ₂ O ₃ *	0.59	0.59	0.40	0.68
MnO	0.08	0.13	0.13	0.13
MgO	17.45	16.98	16.90	17.01
CaO	20.33	21.57	21.34	20.89
Na ₂ O	0.00	0.76	0.00	0.01
K ₂ O	0.08	0.02	0.08	0.02
Total	99.86	99.40	99.81	99.83
Oxygen No.	6.00	6.00	6.00	6.00
Si	2.23	2.15	2.22	2.22
Al	0.01	0.01	0.00	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.02	0.02	0.01	0.02
Mg	0.95	0.92	0.92	0.93
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.79	0.84	0.84	0.82
Na	0.00	0.05	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00
Sum	4.00	4.00	4.00	4.00
Wollastonite	45.09	47.19	47.17	46.28
Enstatite	53.85	51.68	51.98	52.43
Ferro-sillite	1.06	1.13	0.85	1.29
WEF	100.00	94.32	100.00	99.92
Jadeite	0.00	5.68	0.00	0.08
Aegirine	0.00	0.00	0.00	0.00

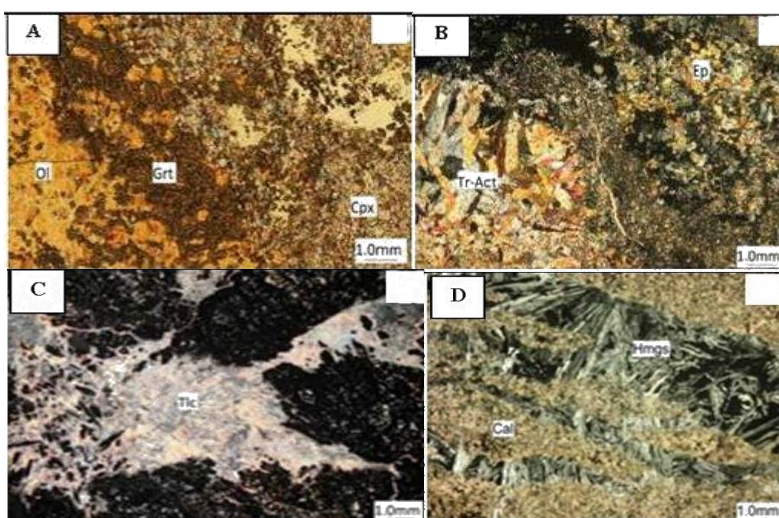
اندازه‌گیری اعضای پایانی و کاتیون‌ها که برپایه روش Richwood (۱۹۶۸) به‌دست آمده، آورده شده‌اند. اندازه‌گیری کاتیون‌ها برای گارنت‌ها برپایه ۱۲ اکسیژن و برای پیروکسن‌ها ۶ اکسیژن بوده است. اکسید آهن سه‌ظرفیتی نیز با روش Droop (۱۹۸۷) و برپایه ضرایب استوکیومتری به‌دست آمده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که گارنت‌ها بیشتر غنی از آهن و از نوع آندرادیتی بوده (شکل ۵) و مقدار سازنده‌های دیگر مانند منیزیم و کلسیم اندک هستند؛ از این‌رو، گارنت‌های منطقه صدرآباد همانند گارنت‌های منطقه دستگرد در جنوب قم هستند (Baharifar, 2011). پیروکسن‌ها نیز از سری دیوپسید - هدنبرژیت هستند (شکل ۵). پیدایش اکسید آهن (مگنتیت) و سولفیدها (بیریت، کالکوپیریت) در مرحله دگرسانی پس‌رونده رخ داده است. پیدایش مگنتیت در مرحله پس‌رونده به‌صورت رگه- رگچه‌ای، همراه با سرپانتین، بوده و گاه به‌صورت توده‌ای و برشی نیز یافت می‌شود (شکل ۶- A).

ته‌نشست کانه‌ها در مرحله پس‌رونده در پی کاهش دمای سیال، آمیختگی سیال‌ها و یا خنثی‌سازی سیال کانسار ساز در پی واکنش با سنگ‌های کربناته است و می‌تواند تجزیه کمپلکس‌های کلریدی آهن و ته‌نشست ماده معدنی را در پی داشته باشد (Robb, 2005). در پی فرایندهای سوپرژن کربنات مس آبدار (مالاکیت) و اکسید آهن آبدار (گوئیتیت) در اسکارن آهن صدرآباد پدید آمده‌اند.

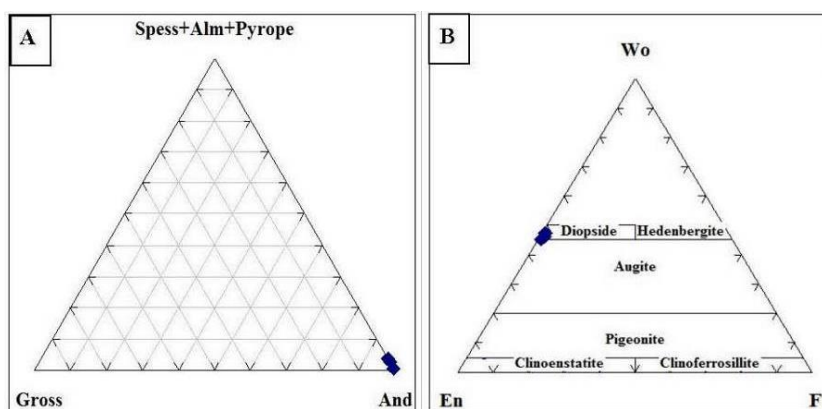
توالی کانی‌های همایند برای کانسار آهن صدرآباد در شکل‌های ۷ و ۸ نشان داده شده است. برپایه نوع کانی‌ها، ساخت و بافت، توالی پاراژنتیک، نمودارهای دماپویا (ترمودینامیک) و داده‌های سیال‌های درگیر، مرحله پیش‌رونده در بازه دمایی ۳۵۰-۵۴۰ درجه سانتیگراد و مرحله پس‌رونده در بازه دمایی ۱۸۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد پدید آمده است (Moshtagh, 2014).

و پیایی، شامل مرحله پیش‌رونده و مرحله پس‌رونده، رخ داده است. در مرحله پیش‌رونده همزمان با جایگیری توده نفوذی، سنگ‌های رسوبی دگرگون شده‌اند و مرمر، کوارتزیت و هورنفلس پدید آمده‌اند. پس از آن، با ورود سیال‌های متاسوماتیک پدیدآمده از برون‌رست فاز فرار از ماگما و افزایش فشار پس از آزاد شدن سیال‌های ماگمایی، شکستگی‌هایی در درون سنگ‌های کربناته کناری پدید آمده‌اند. این شکستگی‌ها می‌توانند گذرگاه‌هایی برای جابجایی سیال‌های ماگمایی و آمیختگی آنها با آب‌های جوی را فراهم کنند. در مرحله پیش‌رونده سیال‌های دارای Fe, Si, Mg در شرایط کمابیش اکسیدان، واکنش‌های کربن‌زدایی و گسترش سیلیکات‌های سرشار از آهن و بی‌آب را در پی داشته‌اند و مجموعه سیلیکات‌های بی‌آب گارنت، پیروکسن و اندکی الیوین را پدید آورده‌اند. گارنت‌ها به‌صورت دانه‌ریز و ایزوترپ همراه با پیروکسن‌ها دیده می‌شوند. کانی‌های همایند (پاراژنزی) و نبود بافت‌های جان‌نشینی، نشانه رشد همزمان پیروکسن و گارنت در مرحله‌های نخستین هستند (شکل ۴- A)؛ اما در مرحله‌های پس از آن، شرایط اکسیدان در هنگام تبلور سیال در سامانه اسکارنی، در دمای بیشتر از ۵۵۰ درجه سانتیگراد، پیروکسن را ناپایدار کرده است و گارنت‌های آندرادیت رشد کرده‌اند. این روابط پاراژنتیک در کانسار هشت‌کوه خضرآباد نیز گزارش شده‌اند (Ghanei and Mackizadeh, 2011). در مرحله پس‌رونده کاهش دما و شرایط نبود تعادل، پیدایش کانی‌های سیلیکاته آبدار ترمولیت - اکتینولیت، اپیدوت، سرپانتین، تالک و فلوگوپیت را در پی داشته است (شکل‌های ۴- B و ۴- C) و در پایان مرحله پس‌رونده کانی‌های بروسیت و هیدرومنیزیت پدید آمده و با واکنش‌های کربنات‌زایی همراه بوده است (شکل ۴- D).

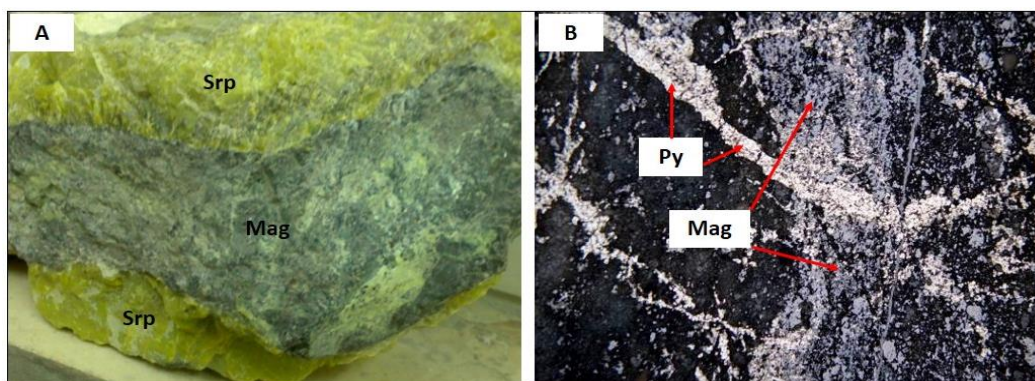
از منطقه صدرآباد، سه نقطه از گارنت‌ها و چهار نقطه از پیروکسن‌ها به روش ریزکاو الکترونی تجزیه شدند. در جدول‌های ۲ و ۳، داده‌های تجزیه و



شکل ۴- تصویرهای میکروسکوپی از اسکارن صدرآباد (باختر یزد). (A) الیون، کلینوپیروکسن و گارنت در مرحله پیش‌رونده. گارنت به‌صورت دانه‌ای و توده‌ای دیده می‌شود؛ (B) اپیدوت با بافت گرانوبلاستیک همراه با ترمولیت - اکتینولیت؛ (C) جانشرینی مگنتیت در تالک؛ (D) رگچه‌های هیدرومیزیت رشته‌ای و سوزنی در سنگ کربناته (Cpx: کلینوپیروکسن؛ Grt: گارنت؛ Ol: الیون؛ Ep: اپیدوت؛ Tr - Act: ترمولیت - اکتینولیت؛ Tlc: تالک؛ Hmgs: هیدرومیزیت؛ Cal: کلسیت).



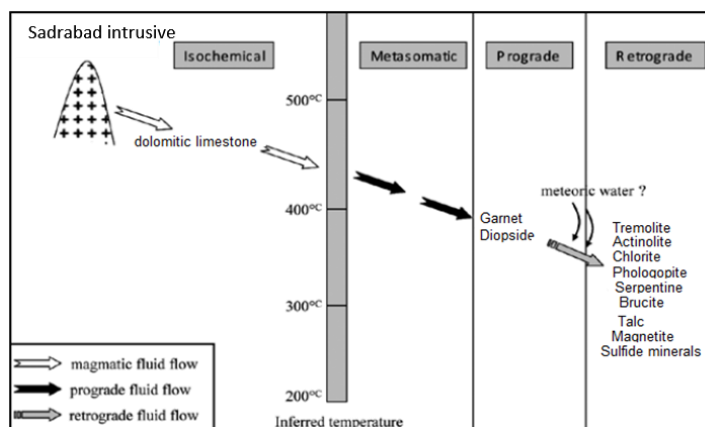
شکل ۵- ترکیب شیمیایی: (A) گارنت؛ (B) پیروکسن منطقه صدرآباد (باختر یزد) برپایه تجزیه ریزکاو الکترونی. بیشتر گارنت‌ها آندرادیت $[Ca_3Fe_2^{3+}(SiO_4)_3]$ و بیشتر پیروکسن‌ها دیوپسید $[CaMg(Si_2O_6)]$ هستند.



شکل ۶- (A) همراهی سرپانتین با مگنتیت به‌صورت رگه‌ای در کانسار صدرآباد (باختر یزد) (در نمونه دستی)؛ (B) رگچه مگنتیت که با رگچه‌های پیریت قطع شده است (در نور انعکاسی) (Mag: مگنتیت؛ Py: پیریت؛ Srp: سرپانتین).

سوپرژن	مرحله پسین		مرحله پیشین	مرحله کانی ها
	زیر مرحله II		زیر مرحله I	
	کربنات زایی		کربنات زدایی	
				کوارتز
				الیون
				دیوسید
				گازنت
				نرمولیت - اکتینولیت
				ایپدوت
				کلریت
				کلسیت
				سریانتین
				تالک
				فلوگوپیت
				بروسیت
				هینرومنزیت
				مگنتیت
				یزریت
				یبرونیت
				کالکوپیریت
				گوئیت
				مالاکیت

شکل ۷- توالی پاراژنتیکی کانی ها در کانسار آهن صدرآباد (باختر یزد).

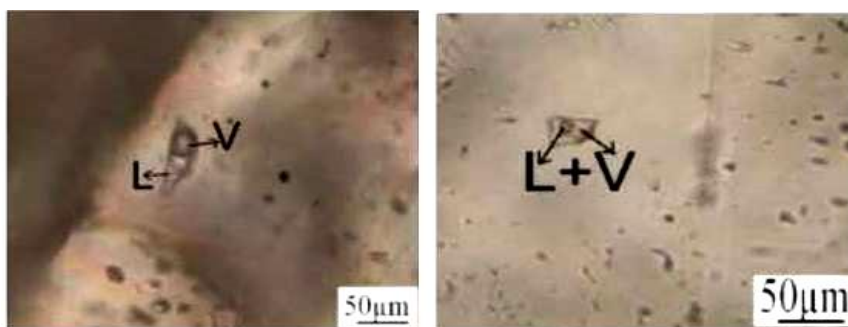


شکل ۸- نمودار نمادین از روابط کانی‌های همایند (پاراژنتیک) در کانسار صدرآباد (باختر یزد)، به‌همراه مسیر حرکت سیال، با تغییراتی پس از Zaw و Kamvong (۲۰۰۹).

سیال‌های درگیر

کوارتزها بیشتر از نوع اولیه و دوفازی (L+V) بودند (شکل ۹)؛ البته سیال‌های غنی از بخار نیز وجود داشت. سیال‌های درگیر هم‌زیست سرشار از L و V، می‌تواند نشانه‌ای از جوشش یا آمیختگی سیال به‌شمار آید (Pirajno, 2009).

برای بررسی و شناسایی ویژگی‌های فیزیکوشیمیایی سیال‌های کانه‌ساز، ۲ نمونه از رگه‌های کوارتز همراه با سرپانتین (در مرحله دگرسانی پس‌رونده) برگزیده و مقطع دوبر صیقل آنها ساخته شد. میانبرهای سیال در



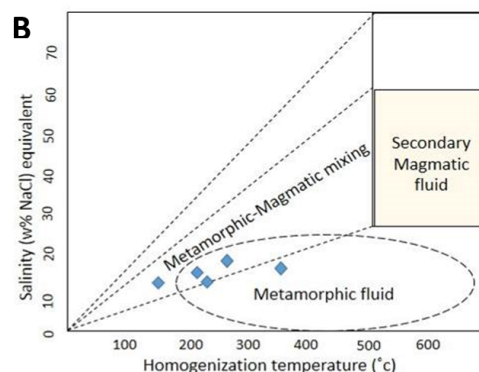
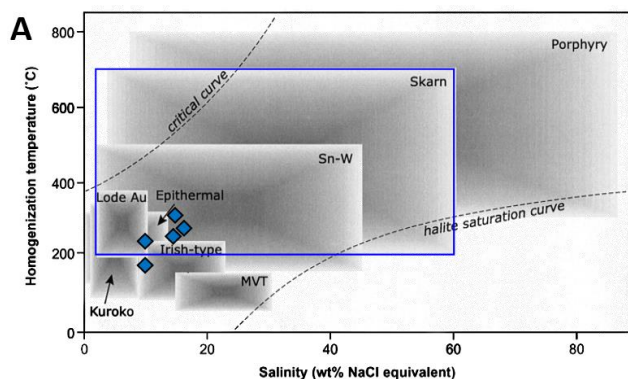
شکل ۹- تصویرهای میکروسکوپی میانبارهای سیال دارای دو فاز مایع (L) و بخار (V) در کانسار صدرآباد (باختر یزد).

مرحله، سیال (نسبت به مرحله پیش‌رونده) دچار کاهش دما و شوری شده است؛ از این‌رو، با محدوده کانسارهای اپی‌ترمال نیز هم‌پوشانی نشان می‌دهد.

بر پایه پیشنهاد Kesler (۲۰۰۵) با به‌کارگیری نمودار شوری-دمای همگن‌شدن سیال‌های درگیر می‌توان خاستگاه سیال کانه‌ساز را گمان زد (شکل ۱۰-B). بر پایه نمودار Kesler (۲۰۰۵) نمونه‌های منطقه صدرآباد هم در قلمرو سیال‌های پدیدآمده از آمیختگی سیال‌های ماگمایی-جوی و هم در محدوده سیال‌های دگرگونی جای می‌گیرند؛ اما بر پایه شواهد زمین‌شناسی دیگر (مانند: ندیدن دگرگونی ناحیه‌ای، پیدایش سطح هم‌بندی توده‌های نفوذی با سنگ‌های رسوبی که دچار دگرگونی مجاورتی و دگرسانی گرمایی (هیدروترمالی) شده‌اند و نیز نوع کانه‌زایی که از نوع اسکارنی است) می‌توان دریافت که سیال‌های کارساز در کانه‌زایی از آمیختگی سیال‌های ماگمایی با آب‌های جوی پدید آمده‌اند.

بر پایه داده‌های به‌دست‌آمده (جدول ۴)، شوری سیال‌ها در این نمونه‌ها (۸ تا ۱۶ درصد وزنی NaCl) به اندازه شوری کم تا متوسط سیال‌های درگیر به‌دام‌افتاده است. نبود کانی دختر نیز خود گواهی بر کم‌بودن میزان شوری سیال (Roedder and Bodnar, 1980) و نشانه آمیختگی با آب‌های جوی می‌تواند باشد (Barnes, 1979). دمای همگن‌شدن سیال‌های درگیر که ۱۶۵ تا ۲۷۹ درجه سانتیگراد به‌دست آمده است با شرایط پیدایش اسکارن‌های پس‌رونده همخوانی دارد.

شکل ۱۰-A جایگاه کانسارهای گوناگون را بر پایه شوری و دمای همگن‌شدن سیال‌های درگیر نشان می‌دهد. بر پایه این نمودار، نمونه‌های کانسار صدرآباد در محدوده کانسارهای اسکارنی جای می‌گیرد؛ زیرا میانبارهای سیال بررسی‌شده، وابسته به مرحله دگرسانی پس‌رونده بوده‌اند. در این



شکل ۱۰-A) شناسایی نوع کانه‌زایی در منطقه صدرآباد با به‌کارگیری دمای همگن‌شدن و میزان شوری سیال‌های درگیر (Wilkinson, 2001)؛ B) شناسایی نوع سیال کانه‌ساز با به‌کارگیری دمای همگن‌شدن و میزان شوری سیال‌های درگیر (Kesler, 2005).

توده آذرین درونی و ارتباط آن با کانه‌زایی

برپایه بررسی‌های Kuskو و همکاران (۲۰۰۲)، نمودار MgO در برابر SiO₂، K₂O در برابر SiO₂، Na₂O+K₂O در برابر SiO₂، نمودار V در برابر Ni، می‌توانند گرانیتوئیدهای سازنده اسکارن آهن، مس، طلا، تنگستن و مولیبدن را از یکدیگر جدا کنند. بر این پایه، ترکیب شیمیایی توده نفوذی صدرآباد روی این نمودارها نمایش داده شد (شکل ۱۱). در این میان، نمونه‌های کوارتز-مونزونیتی و دیوریتی همپوشانی بیشتری با محدوده توده‌های نفوذی سازنده کانسارهای اسکارن آهن نشان می‌دهند و نمونه‌های گرانیتی با فاصله بسیار از اسکارن آهن جای گرفته و چه‌بسا در کانه‌زایی آهن نقشی نداشته‌اند.

گرانیتوئیدهای سازنده اسکارن آهن از گرانیتوئیدهای دیگر MgO بالاتر و K₂O و SiO₂ کمتری دارند. میانگین MgO گرانیتوئیدهای همراه با اسکارن آهن، طلا و مس به ترتیب نزدیک به ۳، ۳/۲ و ۱/۸ درصد وزنی است (Meinert, 1995). میانگین MgO در نمونه‌های کوارتز-مونزونیتی و دیوریتی منطقه صدرآباد در نزدیک به ۲/۵ درصد وزنی است که نزدیک به اسکارن‌های آهن است. الگوی پراکندگی نمونه‌ها در نمودار MgO در برابر SiO₂ انباشته‌شدن آنها را در نزدیکی اسکارن آهن و طلا نشان می‌دهد (شکل ۹ - A). میانگین K₂O همراه با گرانیتوئیدهای اسکارن آهن، مس و طلا به ترتیب ۲/۱، ۳/۶، ۲/۵ درصد وزنی است (Meinert, 1995). میانگین K₂O نمونه‌های توده صدرآباد، برابر ۲/۱ درصد وزنی بوده و با اسکارن‌های آهن همخوانی دارد.

الگوی پراکندگی داده‌ها در نمودار K₂O برابر SiO₂ پیرامون اسکارن آهن و تا اندازه‌ای

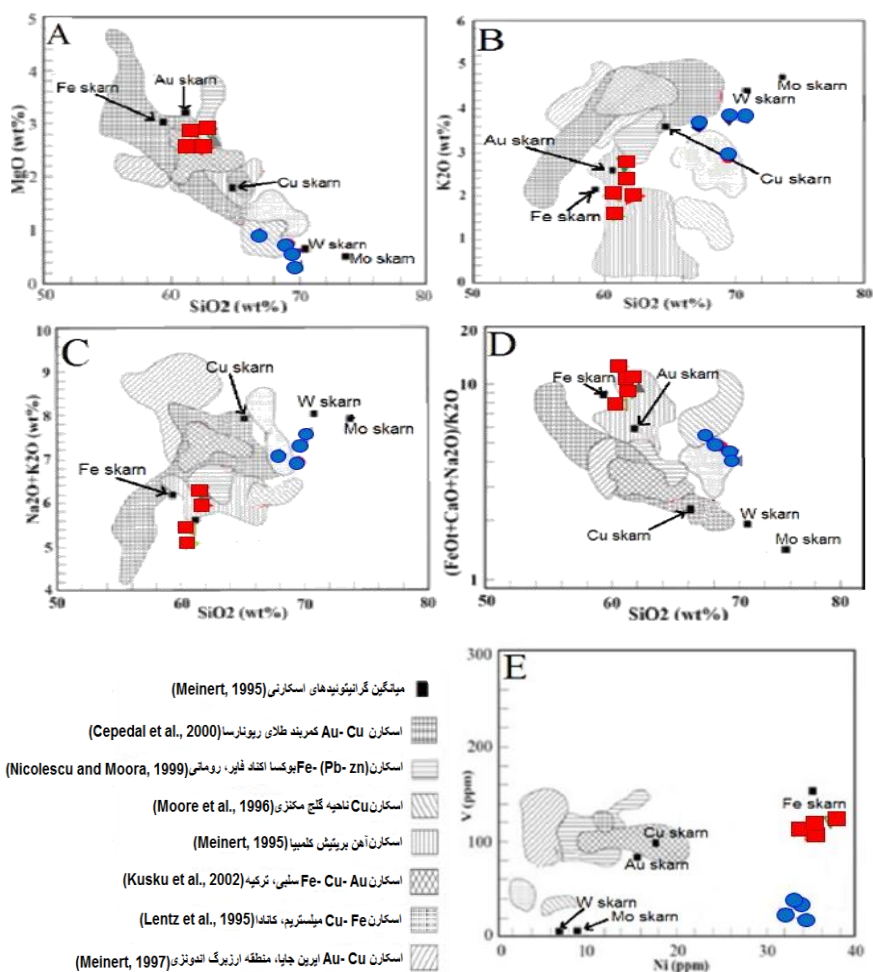
اسکارن طلا دار را نشان می‌دهد (شکل ۱۱ - B).

در نمودار مجموع قلیایی‌ها (Na₂O+K₂O) در برابر SiO₂، الگوی پراکندگی نمونه‌ها در محدوده کانه‌زایی اسکارن آهن و طلا جای می‌گیرد (شکل ۱۱ - C). میانگین مجموع قلیایی‌ها برای اسکارن‌های مس، طلا و آهن به ترتیب ۷/۶، ۵/۶ و ۶/۱ درصد وزنی است (Meinert, 1995). میانگین Na₂O+K₂O در نمونه‌های مرتبط با کانه‌زایی اسکارن صدرآباد برابر ۵/۳ درصد وزنی است و از این دیدگاه، اسکارن صدرآباد همانند اسکارن‌های طلا دار است.

در نمودار (FeO*+CaO+Na₂O)/K₂O در برابر SiO₂، پراکندگی نمونه‌های توده مرتبط با کانه‌زایی در محدوده گرانیتوئیدهای همراه با اسکارن آهن جای می‌گیرد (شکل ۱۱ - D)؛ از این رو، می‌توان گفت جایگیری نمونه‌ها در نزدیکی میانگین اسکارن‌های طلا، اسکارن آهن صدرآباد، افزون‌بر کانه‌زایی آهن، از دیدگاه دارابودن اندوخته طلا نیز می‌تواند اهمیت داشته باشد.

در نمودار V در برابر Ni، نمونه‌های توده با ترکیب کوارتز-مونزونیتی و دیوریتی نزدیک به محدوده توده‌های مرتبط با کانه‌زایی اسکارن آهن جای می‌گیرند (شکل ۱۱ - E).

همچنین، سنجش ویژگی‌های زمین‌شیمیایی عناصر اصلی و فرعی توده نفوذی صدرآباد در برابر گرانیتوئیدهای اسکارنی جهان نشان می‌دهد که این توده همانند گرانیتوئیدهای سازنده اسکارن آهن British Columbia (Meinert, 1995) و اسکارن Fe- Celebi در ترکیه (Kuskو et al., 2002) است. مقادیر δ³⁴S در کانسار خوت که همانند کانسار صدرآباد است همانند مقادیرهای ایزوتوپی گوگرد در بسیاری از کانسارهای اسکارن مس و مس- طلا است (Zahedi and Boomeri, 2014).



شکل ۱۱- مقایسه گرانیتوئیدهای صدرآباد (باختر یزد) با گرانیتوئیدهای بزرگ اسکارنی جهان در نمودارهای هارکر (Kusku *et al.*, 2002; Meinert *et al.*, 2005) (نشانه‌ها همانند شکل ۳ هستند).

شدند (شکل ۱۲- A) و در پایان با بهره‌گیری از وابستگی میان گسل‌ها و شکستگی‌ها با کانه‌زایی، الگوی ساختاری پیدایش کانسار ارائه شد. برپایه بررسی تصویرهای ماهواره‌ای و برداشت‌های صحرائی دو روند اصلی گسلش در منطقه صدرآباد شامل روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری هستند (شکل ۱۲- B). گسل‌های شمال‌خاوری- جنوب‌باختری دارای مؤلفه کششی (راستای گسل موازی σ_1) و گسل‌های شمال‌باختری- جنوب‌خاوری دارای مؤلفه فشارشی (راستای گسل عمود بر σ_1) هستند؛ از این رو، رگه‌های پرعیار باید دارای روند شمال‌خاوری- جنوب‌باختری باشند.

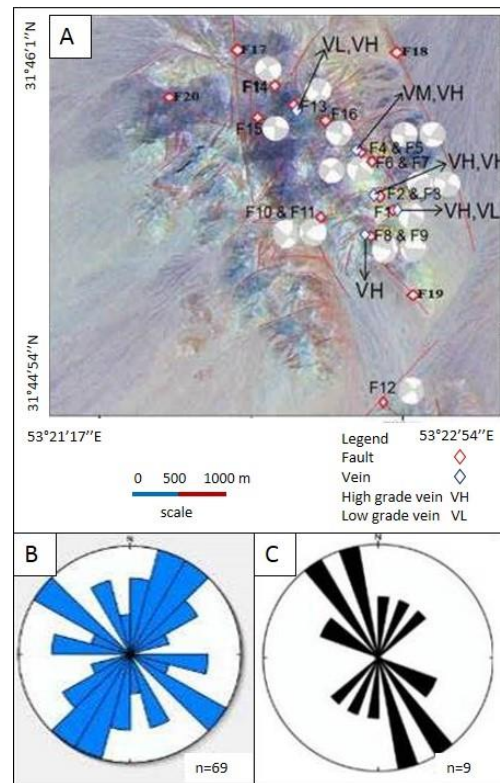
زمین‌ساخت و ارتباط آن با کانه‌زایی

برپایه بررسی‌های صحرائی، افزون‌بر کنترل سنگ‌شناختی، کنترل ساختاری نیز فرایند مهمی در پیدایش کانسار صدرآباد بوده و بخشی از کانه‌زایی توسط گسل‌ها کنترل شده است. برای شناسایی نقش گسل‌ها در کانه‌زایی، ویژگی‌های زمین‌ساختی گسل‌ها و رگه‌های کانه‌دار برداشت شد و سپس نمودارهای گل‌سرخ و استریوگرام گسل‌ها و رگه‌های برداشت‌شده با نرم‌افزارهای زمین‌شناسی Fault kin و Statec ترسیم شد.

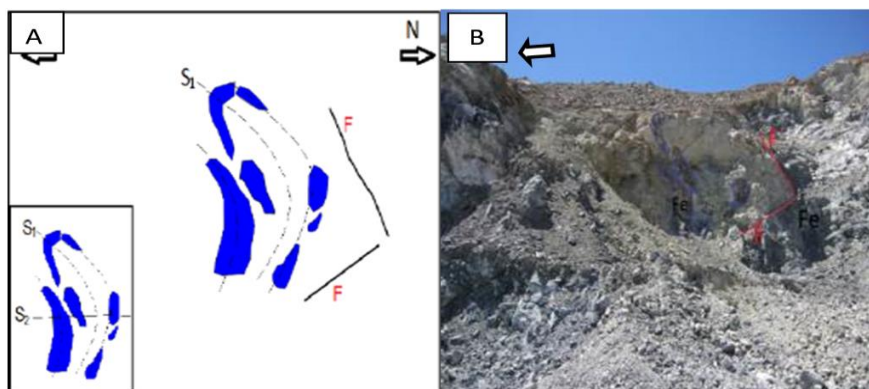
برای تحلیل بهتر، گسل‌ها برپایه تصویرهای ماهواره‌ای شناسایی و به برداشت‌های صحرائی افزوده

رگه‌های آهن‌دار

بر پایه روند، رگه‌ها در منطقه صدرآباد دارای دو روند کلی شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری هستند (شکل ۱۳- A). برپایه وضعیت عیار، رگه‌ها از نوع پرعیار (VH)، متوسط‌عیار (VM) و کم‌عیار (VL) هستند (جدول ۵). برپایه جایگاه زمین‌ساختی منطقه (شکل ۱۲)، رگه‌های پرعیار باید دارای روند شمال‌خاوری- جنوب‌باختری (راستای رگه موازی σ_1) و رگه‌های کم‌عیار دارای روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری (راستای رگه عمود بر σ_1) باشند. برپایه شکل ۱۳- B، رگه کم‌عیار با روند شمال‌خاوری- جنوب‌باختر وجود ندارد؛ اما در روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری رگه‌های کم‌عیار، متوسط‌عیار و پرعیار با هم دیده می‌شوند. برخی رگه‌های پرعیار و بزرگ آهن در محل برخورد گسل‌های با روندهای یادشده رخ داده‌اند. رگه‌های معدنی پرعیار گاه به‌صورت رگه یا عدسی‌های چین‌خورده دیده می‌شود. از دیدگاه ساختاری پیدایش رگه‌ها به دنبال پیدایش شکستگی‌های کششی رخ داده است و در یک‌فاز دگرریختی ساده باید به‌صورت ساختارهای عدسی‌شکل ساده دیده شوند؛ اما بیرون‌زدگی و نمای سه‌بعدی دیده‌شده از این رگه‌ها در منطقه صدرآباد نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- A) جایگاه گسل‌ها و رگه‌های اندازه‌گیری‌شده به‌همراه سازوکار کانونی و تصویر استریوگرام گسل‌ها روی تصویر ماهواره‌ای منطقه صدرآباد (باختر یزد)؛ B) نمودارهای گل‌سرخ برای گسل‌ها که نشانه وجود دو سیستم گسلی اصلی با روندهای شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری در منطقه هستند؛ C) نمودارهای گل‌سرخ رگه‌های منطقه صدرآباد که نشان‌دهنده دو روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری و شمال‌خاوری- جنوب‌باختری هستند. همه رگه‌های با روند شمال‌خاوری- جنوب‌باختری از نوع پرعیار هستند.



شکل ۱۴- ساختارهای عدسی آهن‌دار کانسار صدرآباد (باختر یزد) که دچار چین‌خوردگی در پی فاز فشارشی شده‌اند در: A) تصویر صحرائی؛ B) تصویر نمادین (S1: سطح محوری فاز چین‌خوردگی کهن‌تر؛ S2: سطح محوری فاز چین‌خوردگی تازه‌تر؛ رنگ‌های آبی نشان‌دهنده عدسی‌های آهن).

کانه‌ساز بیشتر شده و کانسارهای آهن با سن الیگوسن-میوسن پدید آمده‌اند (شکل ۱۵-C). توده‌های کوارتز موزودپوریتی با سرشت ماگماهای پس از برخورد در این دوره پدید آمده‌اند.

(۴) برپایه بررسی‌های Agard و همکاران (۲۰۰۵) سن برخورد و حرکت‌های فشاری پایانی کوهزایی زاگرس از الیگوسن (یا میوسن) تا پس از آن دانسته می‌شود. در هنگام این جابجایی‌ها، شکستگی‌های کهن با سازوکارهای نیوینی دگرریخت شده‌اند و گسل‌های وارونه (معکوس) همراه با چین‌خوردگی، گسترش یافته‌اند (شکل ۱۵-D).

در مرحله اصلی جابجایی‌های فشاری کوهزاد، در پی کلفت‌شدن پوسته و پیدایش راندگی‌های فراوان، احتمال بالآ آمدن سنگ‌های کهن‌تر به سطح یا نزدیک سطح زمین افزایش یافته است. در این هنگام چین‌خوردگی‌های دیگری در کانسار روی داده‌اند. با تغییر روند همگرایی صفحه عربی نسبت به صفحه ایران مرکزی، تغییر بزرگی در زمین‌ساخت ایران روی داده است. به گونه‌ای که بیشتر ساختارهایی که در زمان‌های پیشین، نشانه‌های فشاری نشان می‌دادند با تغییر روند همگرایی دچار جابجایی‌های فشاری و راستالغز شده‌اند. از آنجایی که منطقه صدرآباد با گسل‌های راستالغز راست‌گرد با روند شمال‌باختری - جنوب‌خاوری دربر گرفته شده است و سیستم‌های گوناگون گسلش راستالغز گسترش یافته‌اند، می‌توان نشانه‌های مرحله تکمیلی پایانی این منطقه را برشی‌شدن در یک پهنه بزرگ با جابجایی‌های راستالغز راست‌گرد دانست.

این ساختارهای عدسی‌شکل در هنگام یک‌فاز فشاری پس از پیدایش رگه‌ها در پهنه کششی، دچار چین‌خوردگی شده‌اند؛ از این‌رو، چه‌بسا رگه‌ها پس از پیدایش به یک یا چندین فاز دگرریختی پلاستیک و شکننده فشاری دچار شده باشند (شکل ۱۴).

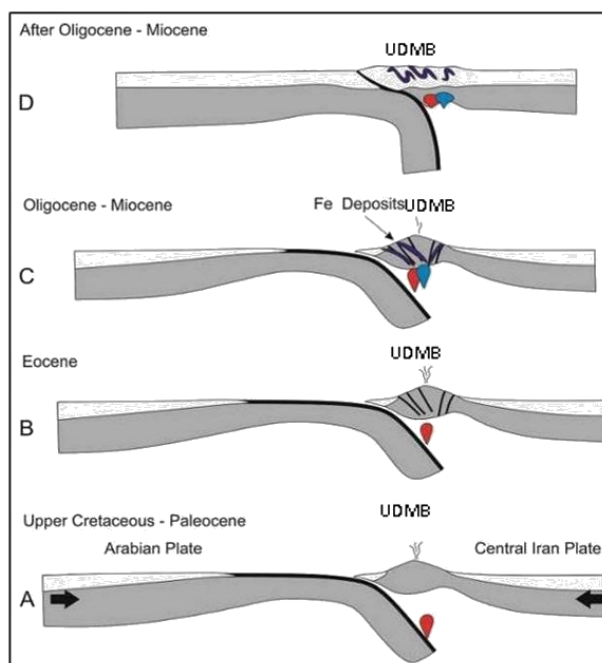
الگوی زمین‌ساختی پیدایش و جایگزینی کانسار آهن صدرآباد

پیدایش و جایگزینی کانسار آهن صدرآباد در پهنه زمین‌ساختی وابسته به پهنه فرورانش تا برخورد، به صورت الگوی زیر پیشنهاد می‌شود:

(۱) مرحله اول شامل همگرایی میان صفحه‌های ایران مرکزی و صفحه عربی در هنگام کرتاسه پسین - پالتوسن همراه با فرورانش بوده و از نشانه‌های آن پیدایش سنگ‌های ماگمایی وابسته به این پهنه‌هاست (شکل ۱۵-A).

(۲) در مرحله دوم، ساختارهای شکننده فراوانی پدید آمده‌اند که پیامد ادامه فرورانش در زمان ائوسن و پیدایش مؤلفه‌های تنش کششی محلی، در روندهای موازی با کوتاه‌شدگی (شکستگی‌های کششی) و همچنین، عمود بر روند کوتاه‌شدگی (شکستگی‌های رهایی) بوده‌اند (شکل ۱۵-B). توده‌های گرانیتی صدرآباد که ویژگی پهنه‌های فرورانش تا برخورد را نشان می‌دهند، چه‌بسا در این مرحله روی داده‌اند.

(۳) در مرحله سوم، برپایه حضور شکستگی‌های فراوان کششی که فضای خوبی برای روند بالآ آمدن سیال‌های کانسه‌ساز را فراهم ساخته، شرایط برای بالآ آمدن ماگما و سیال‌های



شکل ۱۵- الگوی پیشنهادی مرحله‌های پیدایش و جایگزینی کانسار آهن صدرآباد (باختر یزد) در رابطه با فعالیت ماگمایی و فرورانش صفحه عربی به زیر ایران مرکزی. فعالیت ماگمایی در مرحله‌های A و B به فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی بستگی داشته است (رنگ سرخ در شکل)؛ اما در مرحله‌های پس از آن، ویژگی پهنه‌های پس از برخورد را نشان می‌دهد. توده کوارتمونزودیوریتی (رنگ آبی در شکل) که عامل کانه‌زایی در منطقه است، در پهنه پس از برخورد پدید آمده است. عدسی‌های سرمه‌ای تیره در تصویرهای C و D نیز نشان‌دهنده توده‌های آهن هستند که در ارتباط با توده‌های کوارتمونزودیوریتی پدید آمده‌اند و در مرحله‌های پایانی دچار دگرریختی شده‌اند.

شناسایی نوع کانه‌زایی

کانسارهای اسکارنی بر پایه نوع کانی‌ها و سنگ‌های همراه به دو نوع منیزیمی و کلسیک تقسیم می‌شوند (Einaudi and Burt, 1982). بررسی ویژگی‌های کانسار آهن صدرآباد در برابر تیپ‌های گوناگون کانسارهای

اسکارنی (جدول ۶)، نشان‌دهنده آن است که از دیدگاه کانی‌شناسی، دگرسانی، ساخت و بافت، کانه‌های همایند، زمین‌شیمی و خاستگاه سیال‌ها، کانه‌زایی در کانسار آهن صدرآباد با کانسارهای اسکارن آهن منیزیمی بسیار همانند است.

جدول ۶- مقایسه کانسار آهن صدرآباد (باختر یزد) با کانسارهای اسکارن آهن منیزیمی و کلسیمی

Skarn Type:	Sadradabad iron skarn	Magnesian iron skarn	Calcic iron skarn
Characteristics:			
Tectonic setting	Continental margin	Continental margin	Continental margin, Iceland arc
Intrusive compositions	Diorite-granite	Granodiorite- granite	Gabbro-syenite, commonly diorite
Tonnage/ grade metals	5-10 Mt/40% Fe (Baniadam, 2013) Fe (Cu±Au) (Baniadam, 2013)	5-100 Mt/40% Fe Fe (Cu±Zn)	5-200 Mt/40% Fe Fe(Cu±Co±Au)
minerals	Olivine, diopside, amphibole, serpentine, talc, brocite, hydromagnesite, phlogopite	Forsterite, calcite, diopside, amphibole, phlogopite	Grandite, salite, ferrosalite, epidote
Ore minerals	Magnetite (pyrite, chalcopyrite, pyrrhotite)	Magnetite (pyrite, chalcopyrite, sphalerite, pyrrhotite)	Magnetite (chalcopyrite, cobaltite, pyrrhotite)
Alteration	Propylitic, sericitic	Minor propylitic	Mainly ca-silicates
Morphology of intrusive	Small stock	Small stock	Small to big stock

نتیجه‌گیری

در هنگام فرورانش و فرایندهای فشارشی پس از آن، تنش‌های کششی محلی در روندهای موازی با کوتاه‌شدگی (شکستگی‌های کششی) و همچنین، عمود بر کوتاه‌شدگی (شکستگی‌های رهایی)، ساختارهای شکننده فراوانی پدید آورده و فضای خوبی برای بالآمدن ماگما، سیال‌های ماگمایی و پیدایش اندوخته معدنی را پدید آورده‌اند. اسکارن‌زایی در کانسار آهن صدرآباد در دو مرحله پیش‌رونده (آندرادیت، دیوپسید و الیون) و پس‌رونده (سرپانتین، تالک، ترمولیت-اکتینولیت، کلریت، کلسیت و مگنتیت) رخ داده است. برپایه کانی‌های همایند، مرحله پیش‌رونده در دمای بالا (۵۰۰-۳۵۰ درجه سانتیگراد) روی داده است؛ اما بررسی سیال‌های درگیر مرحله پس‌رونده در رگه‌های کوارتز، دمای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتیگراد را نشان می‌دهد. کانه‌زایی در کانسار آهن صدرآباد، از دیدگاه کانی‌شناسی، دگرسانی، ساخت و بافت، کانه‌های همایند (پاراژنز)، زمین‌شیمی و خاستگاه کانه‌زایی، همانندی بسیاری را با کانسارهای اسکارن آهن منیزیمی نشان می‌دهد.

سپاس‌گزاری

نگارندگان از مسئولان دانشگاه اصفهان و شرکت معدنکاران خاک‌سرخ ندوشن برای همکاری صمیمانه‌شان، به‌ویژه در زمینه فراهم‌آوردن خودرو و کمپ صحرایی، سپاس‌گزاری می‌کنند.

یافته‌ها و بررسی‌های میدانی، بررسی‌های سنگ‌نگاری، کانی‌شناسی، ساخت و بافت و زمین‌شیمیایی، نشان می‌دهند که در پی تزریق توده‌های گرانیتوئیدی با سن پس از ائوسن، حجم چشمگیری از سیال‌های آهن‌دار به داخل سنگ آهن‌های دولومیتی وارد شده و رخداد متاسوماتیسم جانشینی و نهشته‌شدن کانسار آهن صدرآباد را در پی داشته‌اند. توده‌های نفوذی منطقه صدرآباد را می‌توان در دو گروه گرانیتی و کوارتزومونزودیوریتی رده‌بندی کرد. از دیدگاه جایگاه زمین‌ساختی، ماگمای سازنده این سنگ‌ها در پهنه‌های فرورانش تا پس از برخورد پدید آمده است. بررسی‌های زمین‌شیمی توده‌های نفوذی و مقایسه آن با توده‌های گرانیتوئیدی اسکارن‌ساز در دیگر نقاط جهان، نشان‌دهنده نقش بیشتر توده کوارتزومونزودیوریتی و دیوریتی تأخیری در پیدایش کانسار آهن صدرآباد است. کانسار آهن صدرآباد که شامل مگنتیت همراه با کمی از سرپانتین است به‌صورت رگه-رگچه‌ای و عدسی‌شکل در سنگ میزبان بیشتر دولومیتی جای دارد و تا اندازه‌ای کنترل لیتولوژیک نشان می‌دهد. افزون‌بر آن، گسل‌ها و شکستگی‌های منطقه گذرگاه‌هایی برای گذر و انتشار سیال‌ها و انباشته‌شدن ماده معدنی پرعیار بوده‌اند. گسل‌های وابسته به رویداد کانه‌زایی دارای روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و شمال‌باختری-جنوب‌خاوری هستند.

منابع

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, F. and Mouthereau, P. (2005) Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation. *International Journal of Earth Sciences* 94: 401 – 419.
- Baharifar, A. A. (2011) Mineralogy and origin of garnet in acidic volcanic rocks of Dastgerd area, Qom. *Petrology* 4: 1-14 (in Persian).
- Baniadam, F. (2013) Report on geological map (1:5000) of Sadrabad iron deposit. Madankaran Khak-e-

- Sorkh-e- Nodoshan Co., Tehran (in Persian).
- Barnes, H. L. (1979) *Geochemistry of hydrothermal ore deposits*. 2nd edition, Wiley, New York.
- Chappell, B. W. and White, A. J. R. (1992) I and S type granites in the Lachlan fold belt. *Earth Science* 83: 1- 26.
- Cox, K.G., Bell, J. D. and Pankhurst, R.J. (1979) *The interpretation of igneous rocks*. George Allen and Unwin, London.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric data. *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. (2011) Textural assemblage relationships between clintonite-spinel-garnet in the central Iranian skarns as evidence of clintonite genesis. *Petrology* 4: 65-72 (in Persian).
- Irvine, T. N. and Baragar, W. R. A. (1971) A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8: 523–548.
- Kamvong, T. and Zaw, K. (2009) 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* 34: 624–633.
- Karimi, M. (2012) Mineralogy and geochemistry of Sork iron deposit, Yazd. *Proceeding of the 1st National congress of Iranian geologists*, Azad University, Shiraz, Iran (in Persian).
- Kesler, S. E. (2005) Ore-forming fluids. *Ore Geology Reviews* 12: 18–113.
- Kohsari, A. (2007) The mineralogy of Koh-e-Ahan skarn, Yazd. *Proceeding of the 15th Congress of Crystallography and Mineralography Society of Iran*, Mashhad University, Mashhad, Iran (in Persian).
- Kusku, I., Kascu, G., Meinert, L. and Floyd, P. (2002) Tectonic setting and petrogenesis of the Celebi granitoid (Turkey) and comparison with world skarn granitoids. *Geochemical Exploration* 76: 175–194.
- Liaghat, S. (2011) Characteristics of intrusive bodies at SW Yazd and comparison with world skarn granitoids. *Journal of Science* 14: 53-63 (in Persian).
- Meinert, L. D., Dipple, G. N., and Nicolescu, S. (2005) World Skarn Deposits. *Economic Geology* 100th anniversary volume 299-336.
- Meinert, L. D. (1995) Mineralogy and petrology of iron skarns in Western British Columbia, Canada. *Economic Geology* 79: 869–882.
- Moshtagh, S. (2014) Mineralogy, Alteration, Petrogenesis and ore forming process of Sadrabad iron deposit, South West of Yazd. M. Sc. thesis, University of Isfahan, Isfahan, Iran (in Persian).
- Pearce, J. A., Harris, N. B. W. and Tindle, A. G. (1994) Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25: 956–983.
- Pirajno, F. (2009) *Hydrothermal processes and mineral systems*. Springer, New York, USA.
- Rickwood, P. C., (1968) On recasting analyses of garnet into end-member molecules. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 18: 175-198.

- Robb, L. (2005) Introduction to ore-forming processes. Black well Publishing, Oxford.
- Roedder. E. and Bodnar. R. J. (1980) Geological pressure determination from fluid inclusion studies. Annual Review of Earth and Planetary Science 8: 263–301.
- Taghipour, B. (2011) Petrogenesis of porphyry related skarn in Aliabad-Darreh Zereshk, Yazd. Journal of Economic Geology 1: 79-92.
- Wilkinson. J. J. (2001) Fluid inclusion in hydrothermal mineral deposits. Lithos 55: 229-272.
- Zahedi, A. and Boomeri, M. (2014) Studies on fluid inclusions and stable isotopes (C, O and S) during generation and evolution of Khut copper skarn West of Yazd, Central Iran. Petrology 20: 107-127 (in Persian).