

جنبه‌های کانی‌شناختی، زمین‌شیمیایی و زایشی کانی‌سازی کانسار مس آبگاره؛ نمونه‌ای از کانسارهای مس رگه‌ای

راضیه مهابادی^{۱*} و فرج‌الله فردوست^۲

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

^۲ دکتر، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۱۰ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۳/۱۱

چکیده

کانسار مس آبگاره در ۱۴۰ کیلومتری جنوب غرب شاهرود و بخشی از مجموعه آتشفشانی-رسوبی نوار طرود-چاه‌شیرین است که در حاشیه شمالی پهنه ساختاری-رسوبی ایران مرکزی واقع شده است. فعالیت‌های آتشفشانی و ماگمایی در این نوار از ائوسن تا میوسن باعث دگرسانی و کانه‌زایی‌های گرمایی گسترده و متعددی شده است که عمدتاً در ارتباط با چرخه گرمایی در منطقه می‌باشد. محدوده کانسار از نظر سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب آندزیت، آندزیت بازالتی و بازالت و به مقدار کمتر آذرآواری (کریستال توف) به سن ائوسن میانی-بالایی می‌باشد که با انواع دگرسانی‌های آرژیلیتی، سریسیتی، سلیسی، کربناتی، کلریتی و اکسیدهای آهن در امتداد رگه‌ها همراه هستند. براساس مشاهدات صحرایی و مطالعات کانه‌نگاری، کانه‌زایی در دو مرحله هیپوژن و سوپرژن و هوازدگی صورت گرفته که کانه‌های پهنه هیپوژن را عموماً پیریت، کالکوپیریت و بورنیت تشکیل می‌دهند. به‌علاوه، بخش اعظم کانه‌های فاز اصلی کانه‌زایی به دلیل قرار گرفتن در پهنه اکسیدان-سوپرژن از بین رفته و کانی‌های ثانویه مس نظیر کالکوسیت، کوولیت، ملاکیت و کریزوکولا به جای آنها تشکیل شده‌اند. داده‌های میانبراهای سیال نیز، دمای بین ۱۴۵ تا ۲۱۷ درجه سانتی‌گراد و شوری بین ۳/۷۳ تا ۹/۸۴ درصد وزنی معادل NaCl و عمق ۳۹۰ متر را نشان می‌دهند. ترکیب داده‌های دمای همگن شدن، شوری سیال و مطالعات کانی‌شناسی بیانگر این مطلب است که مکانیسم اصلی ته‌نشینی کانه‌ها، مخلوط شدن دو سیال جوی و ماگمایی می‌باشد. در نهایت، بر پایه ویژگی‌های زمین‌شناسی، کانی‌شناسی، ساخت و بافت کانسنگ و داده‌های حاصل از میانبراهای سیال و همچنین مقایسه آنها با کانسارهای اپی‌ترمال مشابه می‌توان نتیجه گرفت که سامانه رگه‌ای آبگاره در یک محیط اپی‌ترمال با سولفیداسیون پایین تشکیل شده است.

کلیدواژه‌ها: کانی‌سازی، زمین‌شیمی، میانبراهای سیال، مس رگه‌ای، آبگاره.

* نویسنده مسئول: راضیه مهابادی

E-mail: mohabadi@chmail.ir

۱- پیش‌نوشتار

با نگرشی کلی به کانسارهای اقتصادی مس دنیا، می‌توان بیشترین فلززایی مس ایران را در تشریری و به‌ویژه در الیگو-میوسن دنبال کرد (حسینی دینانی و باقری، ۱۳۹۱). از این رو حاشیه شمالی پهنه ساختاری-رسوبی ایران مرکزی در تشریری شاهد فعالیت‌های ماگمایی بسیار گسترده‌ای بوده که در نتیجه آن، نوار آتشفشانی-رسوبی طرود-چاه‌شیرین با روند شمال شرقی-جنوب غربی در منطقه طرود شکل گرفته است. نخستین مطالعات زمین‌شناسی در این ناحیه توسط Huber and Stocklin (1959) انجام شده است که شروع تکاپوهای ماگمایی تشریری را به لوتسین (ائوسن میانی) نسبت می‌دهند (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). این نوار به‌طور چیره از سنگ‌های آذرین مزوزوئیک پسین تا تشریری ساخته شده است. بر پایه مطالعات هوشمندزاده و همکاران (۱۳۵۷) اوج فعالیت ماگمایی در این مجموعه طی ائوسن میانی تا احتمالاً بالایی رخ داده است که اسکلت اصلی ارتفاعات حد فاصل طرود-چاه‌شیرین را تشکیل می‌دهد (رشیدنژاد عمران، ۱۳۷۱). واحدهای زمین‌شناسی منطقه به ترتیب فراوانی شامل ۱) توف، لاپیلی توف، خاکسترهای ریولیتی و به‌صورت فرعی مارن و ماسه‌سنگ، ۲) گدازه و سنگ‌های آذرآواری با ترکیب آندزیت و آندزیت-بازالت و ۳) داسیت، ریوداسیت و توده‌های نفوذی اسیدی نیمه‌عمیق می‌باشد (مهرابی و قاسمی سیانی، ۱۳۸۹). به‌علاوه، این مجموعه سنگی توسط توده‌های نفوذی زیادی به سن ائوسن-پسین-الیگوسن قطع شده است که به نوعی بیانگر تأثیر فاز زمین‌ساختی پیرنه بر روی این منطقه می‌باشد (رشیدنژاد عمران، ۱۳۷۱). به‌نظر می‌رسد که کلیه تحولات زمین‌شناسی این ناحیه توسط دو گسل امتدادلغز اصلی انجیلو در شمال و طرود در جنوب با راستای شمال شرقی-جنوب غربی کنترل می‌شود (مهرابی و همکاران، ۱۳۹۳). بدیهی است که این نوار به دلیل قرار گرفتن بر روی کمربند فلززایی چاه‌شیرین-سبزوار-تایباد (آقناباتی، ۱۳۸۳)، میزبان رخدادها و ذخایر معدنی بی‌شماری، به‌ویژه رگه‌های فلزات پایه احتمالاً با منشأ اپی‌ترمال است که پتانسیل بالای کانه‌زایی و اهمیت اقتصادی آن را نشان می‌دهد.

از بین این رخدادها می‌توان به کانسار گندی (Au-Ag-Pb-Cu-Zn)، ابوالحسنی (Pb-Zn-Cu-Ag-Au)، چشمه‌حافظ (Pb-Zn-Cu-Ag-Au)، چاه‌موسی (Cu-Ag) و دارستان (Cu-Au) اشاره نمود. از این رو، کانسار مس آبگاره به‌عنوان بخش کوچکی از این منطقه فلززایی می‌تواند از نظر ذخیره مس بسیار حائز اهمیت باشد. این کانسار در ۱۴۰ کیلومتری جنوب غرب شاهرود و ۲۶ کیلومتری شمال غرب طرود با مختصات جغرافیایی "۱۴/۸۳' ۲۸" تا "۲۳/۳۶' ۳۱" عرض شمالی و "۳۴/۵۴' ۴۰" تا "۴۴' ۰۸" طول شرقی، واقع شده است. امروزه با پیشرفت روش‌های آزمایشگاهی و به‌کارگیری روش‌های نوین از جمله مطالعه سیالات درگیر با اطمینان بیشتری می‌توان در مورد منشأ و نحوه تشکیل کانسارها به بحث و بررسی پرداخت. لذا در این مقاله سعی شده است تا با استفاده از داده‌های حاصل از این مطالعات، منشأ و نوع سیالات مؤثر در کانه‌زایی این کانسار بررسی گردد.

۲- روش مطالعه و آماده‌سازی نمونه‌ها

پس از گردآوری و ارزیابی اطلاعات پیشین در رابطه با کانسار آبگاره، به‌منظور درک صحیح رخداد فرآیندهای مختلف کانه‌زایی و دگرسانی گرمایی، پس از پیمایش در طول ستون چینه‌ای و بررسی تغییرات ریخت‌شناختی از افق‌های معدنی و سنگ دیواره دگرسان شده، نمونه‌برداری شد. در این راستا، برای شناخت بهتر تغییرات افق‌های کانه‌دار و غیر کانه‌دار و ارتباط آنها با یکدیگر، ۲۹ مقطع نازک و ۲۸ مقطع صیقلی تهیه و مطالعه گردید. همچنین ۵ نمونه از رخنمون‌های سنگی برای تجزیه شیمیایی به روش XRF و ICP-MS (جدول ۱) و ۷ نمونه به روش XRD به آزمایشگاه شرکت مواد معدنی زرآرما فرستاده شد. علاوه بر این، برای دسترسی به تحلیل‌های دقیق‌تر، سعی گردید از نتایج آنالیزهای شیمیایی صورت گرفته (به روش ICP-MS در آزمایشگاه شرکت مواد معدنی زرآرما) توسط شرکت زمین‌پویان فرآز آسیا نیز استفاده شود (جدول ۲). جهت مطالعه میانبراهای سیال نیز ۴ نمونه مقطع دوبرصیقل از نمونه‌های کوارتز همراه

تحقیقاتی زمین‌شناسی اقتصادی و میانبارهای سیال دانشگاه صنعتی شاهرود صورت پذیرفت. دقت و صحت استاندارد این دستگاه در دامنه حرارتی ۱۹۶- تا ۶۰۰+ درجه سانتی‌گراد، ± 0.2 تا ± 0.6 درجه سانتی‌گراد است.

با ماده معدنی تهیه شد. میانبارهای سیال اولیه با اندازه ۲ تا ۷ میکرون با استفاده از Stage گرمایش - انجماد مدل MDSG600 ساخت شرکت Linkam، به منظور مطالعه پارامترهای مورد نیاز از قبیل تعیین شوری، چگالی و سایر خصوصیات در آزمایشگاه

جدول ۱- نمونه‌های تجزیه شده از سنگ‌های دارای رخنمون در منطقه معدنی (اکسیدهای اصلی به روش XRF (Wt %) و ICP-MS (ppm).

sample	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total	Ba	Ce	Cs	Cu	Dy	Eu
L2-12	66.16	0.53	14.34	3.79	0.05	0.89	2.5	1.9	5.8	0.16	3.9	95.94	624	47	4.8	38	2.8	0.77
L1-7	50	0.97	16.6	7.25	0.18	3	10.8	2.9	1.6	0.28	6.8	93.04	310	38	2.3	70	3.39	1.09
L2-3	64.21	0.54	15.62	3.46	0.08	0.65	3.9	2.5	5.6	0.16	3.3	96.6	849	44	6.9	120	2.92	0.92
L1-1	67.21	0.63	13.43	4.94	0.1	1.2	1.71	1.9	5	0.16	3.5	96.15	583	50	3.7	1572	2.93	0.76
L3-1	65.47	0.55	15.87	3.63	0.06	1.37	2.18	3.2	5	0.15	2.6	97.33	664	52	2.6	75	3.01	0.88
sample	Hf	K	La	Lu	Nb	Nd	P	Pb	Pr	Rb	Sm	Sr	Th	Ti	U	Y	Yb	Zr
L2-12	3.14	40825	23	0.26	8.9	18.5	559	19	4.7	109	3.7	165.2	9.39	3087	1.8	16.4	1.8	118
L1-7	2.98	11337	18	0.32	8.4	18.9	1111	43	4.4	26	4	587.6	4.41	5488	1.18	17.3	2.7	115
L2-3	2.11	30577	20	0.31	9	17.6	594	24	4.5	95	3.7	269.7	7.47	3060	2.3	16.1	1.9	85
L1-1	5.12	41312	21	0.34	10.3	17.5	593	19	4.5	117	3.4	266.7	9.94	3058	3	16.8	2.3	190
L3-1	3.59	33839	24	0.32	10.9	19.3	613	28	5.1	99	3.8	413.5	10.6	3011	2.6	17	2.1	131

جدول ۲- نمونه‌های تجزیه شده از مغزه‌های حفاری در منطقه معدنی به روش ICP-MS (ppm).

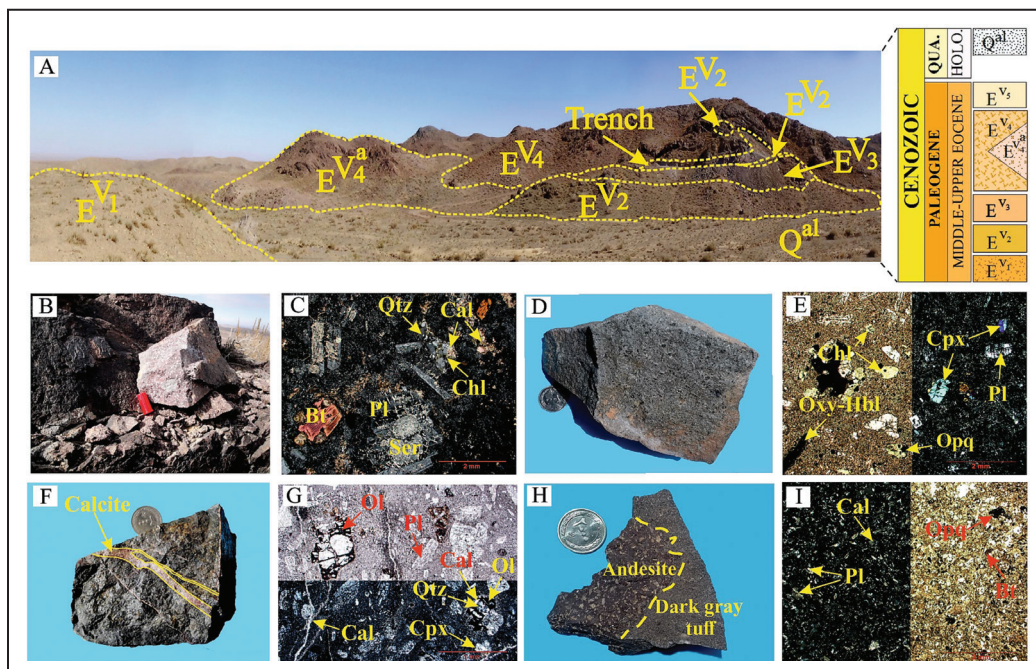
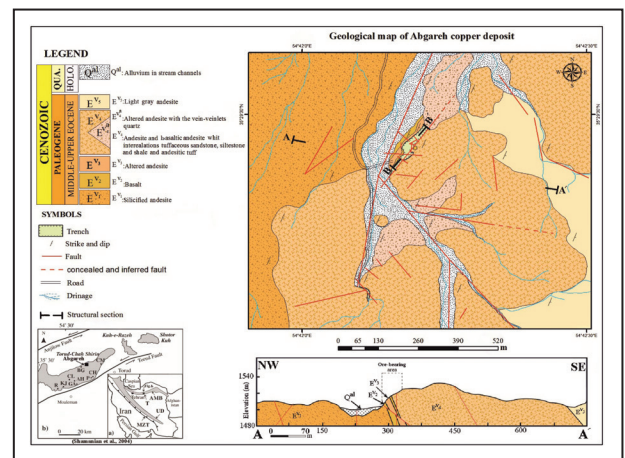
Sample	Cu	Ag	Fe	S	Sb	Pb	Zn	Al	As	Ca	Co	Cr	K	Mg	Mn	Mo	Na	Ni
BH1-0-5	13888	10.5	25768	109	1.34	24	45	74462	8.3	22312	4	18	56236	3930	489	1.9	7284	6
BH1-4-7	3894	10.7	24839	50	1.32	25	36	73223	6.6	19278	5	12	56052	3822	517	1.78	9371	6
BH1-7-15	7516	8.1	24282	87	1.38	23	41	77328	8.1	25802	5	9	59167	4017	521	1.89	6798	5
BH1-15-20	15858	15.4	22440	72	1.4	22	45	67149	8.7	22244	4	9	52911	3672	504	1.63	6663	4
BH1-20-25	9595	22.4	23944	58	1.28	26	39	71545	7.7	18327	5	11	54990	3679	377	1.89	9905	5
BH1-25-28	10932	6.4	23266	37.5	1.35	25	51	67762	26.1	16773	5	10	47495	3777	637	1.97	7168	4
BH1-28-31	21419	21.5	25389	3891	1.23	26	44	70661	5.1	10482	4	11	40489	3703	347	2.06	25972	5
BH1-31-34	6263	8.4	24367	324	1.3	114	66	72190	13.3	25732	8	22	43522	5021	479	1.9	9730	9
BH2-0-4	21342	47.2	23996	162	1.35	30	36	61265	15.3	13700	2	10	50129	3242	458	2.41	8246	4
BH2-4-8	18559	19.9	22908	107	1.41	29	35	61622	8.3	14661	3	9	49173	3373	433	2.19	7908	4
BH2-8-16	251	1.8	21840	436	1.09	212	47	72497	13.7	21691	7	11	42464	5349	476	1.34	14620	6
BH2-17-21	4470	9.4	22117	627	1.09	182	59	70807	6.6	25432	6	12	63952	3848	524	1.25	7741	6
BH2-21-27	7146	7.3	24259	1666	1.31	185	50	79301	8.9	22470	8	13	62881	4940	491	1.52	12041	6
BH2-27-33	8652	12.3	18468	1232	1.22	532	69	79033	28.4	14930	11	11	48884	3776	442	1.46	18344	5
BH2-33-37	5003	4.1	20500	505	1.4	36	53	79098	6.4	21093	5	10	52161	3632	468	1.45	17478	5
BH2-37-43	441	4.1	24250	64	1.52	42	53	81275	18.2	22601	6	12	52057	3517	513	1.59	17090	6
BH3-2-7	9165	13.2	22032	37.5	1.36	61	35	70823	34.9	14771	5	10	46464	4272	933	1.62	20335	5
BH3-7-13	14086	24.5	21074	172	1.21	24	46	69029	12	20186	3	13	52537	3334	462	2.08	11379	5
BH3-13-18	8466	16.2	19741	1410	1.34	29	40	67830	11.8	16646	5	9	47121	3734	311	1.72	14914	5
BH3-18-25	9107	14.9	24402	93	1.46	31	56	70414	17	29199	3	9	49546	4184	565	2.21	11115	4
BH4-0-6	9096	50.1	25905	231	1.38	44	53	62478	17.7	29961	10	22	41677	6235	897	1.78	8160	8
BH4-6-13	9774	8.4	20553	53	1.24	22	45	69867	25.1	22501	4	12	46807	3608	495	1.74	9217	5
BH4-13-21	8519	15.8	35994	2188	1.41	340	304	67034	8.2	32152	22	67	21787	16740	812	1.55	20061	25
BH4-21-23	21220	37.7	27919	1111	1.22	40	82	63292	11.7	36708	9	50	32959	8058	779	1.62	11849	16
BH4-23-25	2342	3.5	43231	1825	1.26	226	264	75088	12.7	55834	25	86	14679	17379	1216	1.26	23251	28
BH5-0-5	3875	20.7	22523	193	1.08	19	29	74242	7.2	12316	5	10	59956	4388	441	1.56	12816	5
BH5-5-10	10581	11.8	24371	90	1.04	22	42	80596	12.2	14384	5	9	53782	4133	414	1.5	13413	6
BH5-10-15	6637	18.2	23707	152	1.04	16	39	77837	7.4	16920	5	11	51285	3805	394	1.28	15804	6
BH5-15-22	34453	48.3	23963	962	1.02	253	95	65873	6.5	23192	6	9	41832	5051	643	1.67	6377	4
BH5-22-30	18222	41	22722	202	0.88	117	59	73313	5	23191	5	11	45874	4272	589	1.53	10470	5
BH6-0-5	8370	19.8	20142	172	1.04	22	43	69716	13.8	16056	4	10	58293	4680	449	1.53	13286	6
BH6-5-10	8600	17.2	23006	64	0.94	25	35	78683	9.3	13065	4	10	52379	3997	382	1.58	14232	6
BH6-10-15	6470	10	25464	95	1.1	44	52	77242	6.5	23701	5	12	41118	5039	576	1.38	16275	6
BH6-15-20	10852	21.5	21334	809	0.94	27	47	63652	4	23538	5	10	46011	4661	637	1.52	8390	6

۳- واحدهای زمین‌شناسی و ژنز کانسار

جانشین شده و در مواردی نیز توسط رگه‌های تأخیری کلسیت قطع شده‌اند (شکل‌های ۲-B و C). سنگ‌های آندزیت بازالتی در نمونه‌دستی به رنگ سبز خاکستری، اکثراً همراه با سنگ‌های آندزیتی دیده می‌شوند که تفکیک آنها از یکدیگر بر روی نقشه زمین‌شناسی عملاً امکان‌پذیر نیست. تنها تفاوت این سنگ‌ها نسبت به سنگ‌های آندزیتی وجود درشت‌بلورهای کلینوپیروکسن (از نوع اوژیت) است (شکل‌های ۲-D و E). بازالت‌ها در منطقه از گسترش محدودتری نسبت به واحدهای دیگر برخوردار هستند. همچنین، رگه-رگچه‌های کلسیت در امتداد درزه‌ها و شکستگی‌های موجود در این سنگ‌ها به خوبی قابل مشاهده است که نشان‌دهنده فعال بودن چرخه هیدروترمالی بعد از تشکیل بازالت‌ها می‌باشد (شکل‌های ۲-F و G). سنگ‌های آذرآواری (کریستال‌توف) نیز در بخش‌هایی از محدوده معدنی، دیده می‌شوند که بر حسب ترکیب شیمیایی و شدت دگرسانی از خاکستری تیره تا قرمز متغیر می‌باشند (شکل‌های ۲-H و I).

محدوده مورد مطالعه از نظر زمین‌شناسی در ورقه ۱/۱۰۰۰۰۰ معلم‌ان (اشراقی و جلالی، ۱۳۸۵) واقع شده است که در حقیقت، بخش کوچکی از منطقه متالوژنی طرود محسوب می‌شود. بررسی‌های انجام شده در خصوص سنگ میزبان کانسار، مؤید وجود گدازه‌های آندزیتی، آندزیت بازالتی و بازالت به همراه رخنمون‌های کوچکی از سنگ‌های آذرآواری (کریستال‌توف) است (شکل‌های ۱ و ۲-A). بارزترین واحدهای سنگی این محدوده معدنی متعلق به اتوسن میانی-بالایی هستند که در مناطق هموار توسط رسوبات عهد حاضر پوشیده شده‌اند. سنگ‌های آندزیتی با مورفولوژی برجسته، هم‌روند و هم‌شیب با واحد بازالتی، بخش اعظم منطقه را به خود اختصاص داده‌اند که کانه‌زایی اقتصادی منطقه نیز در درون این سنگ‌ها رخ داده است. علاوه بر این، در مناطقی که دگرسانی گرمایی بر این سنگ‌ها تحمیل شده، درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز توسط سرسیت‌های ریزبلور در مرکز و حاشیه

شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس محدوده معدنی و نیم‌رخ عرضی آن (براساس تصاویر ماهواره‌ای Google Earth و برداشت‌های صحرایی). مبنای سنی واحدهای سنگی میزبان در منطقه براساس نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ معلم‌ان (اشراقی و جلالی، ۱۳۸۵) می‌باشد.



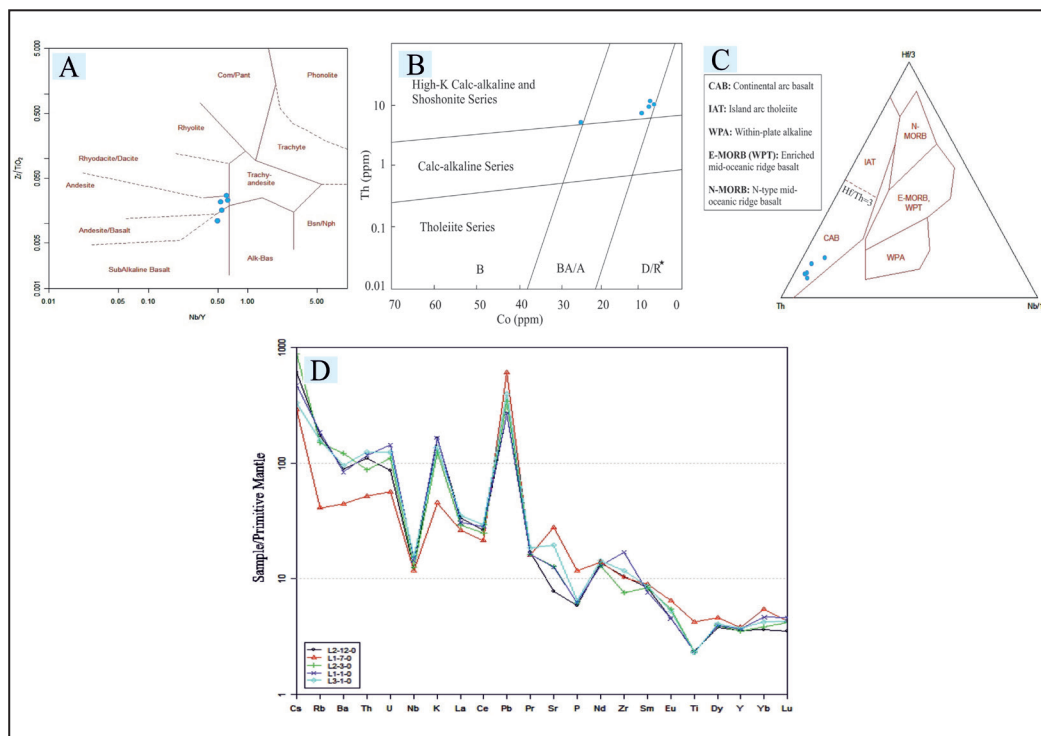
شکل ۲- A) دورنمایی از موقعیت رخنمون‌های سنگی میزبان کانه‌زایی در کانسار آبگاره (زاویه دید به سمت شمال شرق)؛ B) تصویر نمونه‌دستی آندزیت؛ C) تصویر میکروسکوپی از سنگ‌های آندزیتی و دگرسانی پلاژیوکلاز به سرسیت (XPL)؛ D) تصویر نمونه‌دستی آندزیت بازالتی؛ E) تصویر میکروسکوپی از آندزیت بازالتی و کلریتی شدن اوژیت‌ها (تصویر سمت راست XPL و تصویر سمت چپ PPL)؛ F) تصویر نمونه‌دستی از سنگ بازالتی به همراه رگه-رگچه‌های کلسیت؛ G) تصویر میکروسکوپی از بازالت و ایدنگزیتی شدن کانی اولوین (تصویر بالا PPL و تصویر پایین XPL)؛ H) تصویر نمونه‌دستی از توف خاکستری تیره با ترکیب آندزیتی همراه با قطعات آندزیت؛ I) تصویر میکروسکوپی از توف خاکستری تیره و اجزای تشکیل دهنده آن (تصویر سمت راست PPL و تصویر سمت چپ PI). (XPL=پلاژیوکلاز، Bt=بیوتیت، Ol=اولوین، Cpx=کلینوپیروکسن، Cal=کلسیت، Chl=کلریت، Qtz=کوارتز، Oxy-Hbl=اکسی‌هورنبلند، Opq=کانی‌های کدر، Ser=سرسیت).

است. به علاوه، بلورهای هورنبلند، اکسیدهای آهن و منگنیت و همچنین آپاتیت این عناصر را در خود جای می‌دهند که تشکیل و جدایش این کانی‌ها از مذاب نیز در تهنی‌شدگی‌ها از این عناصر بی‌تأثیر نیست (غفاری، ۱۳۸۹). در کل با توجه به مطالب ارائه شده و همچنین نتایج حاصل از مطالعات سنگ‌شناسی و صحرایی، می‌توان گفت که منشأ ماگمای سازنده سنگ‌ها از ذوب‌بخشی گوه گوشته‌ای واقع در بالای ورقه اقیانوسی فرورونده و تا حدودی متاسوماتیسم شده تحت تأثیر محلول‌های آزاد شده از لیتوسفر فرورونده در پهنه‌های فرورانش است که ضمن تبلور تفریقی، با عبور از پوسته قاره‌ای تا حدودی متحمل آلاش پوسته‌ای شده است.

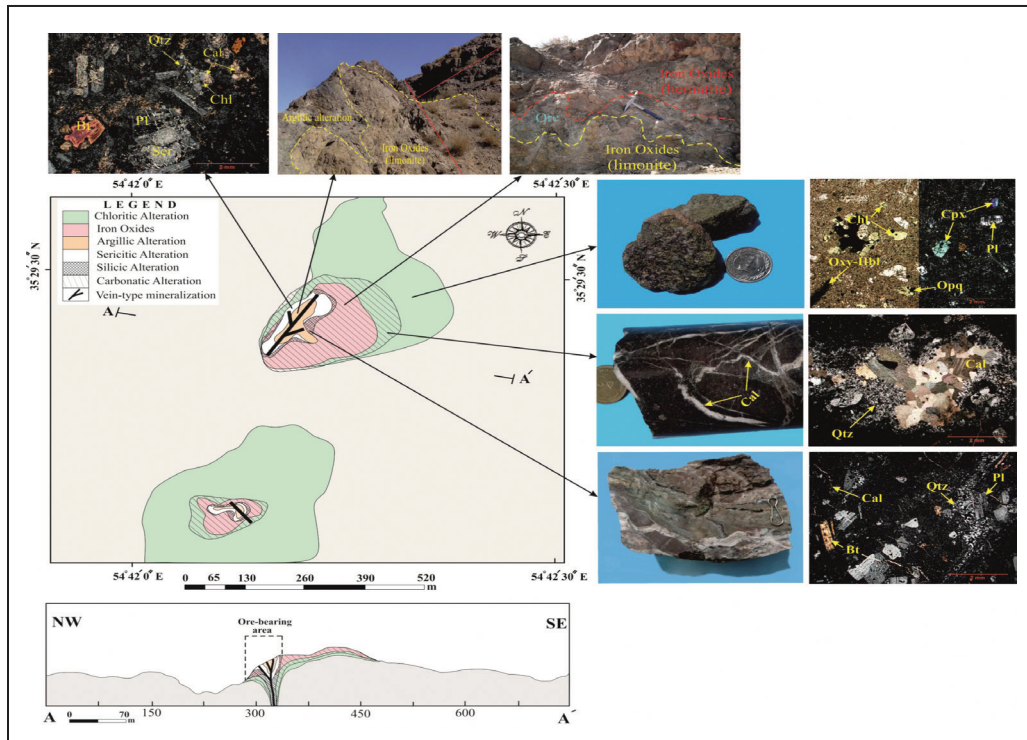
۴- دگرسانی گرمایی منطقه مورد مطالعه

فعالیت سیال‌های گرمایی کانه‌ساز در محدوده معدنی آبگاره، منجر به شکل‌گیری دگرسانی‌های مختلفی در سنگهای میزبان ماده معدنی، در زمان تشکیل کانسار، شده است. با توجه به رخداد کانه‌زایی در منطقه مورد مطالعه، ۶ نوع دگرسانی مجزا، از جمله سریستی، سیلیسی، آرژیلیتی حدواسط، کربناتی، کلریتی و آغشتگی به اکسیدهای آهن در ارتباط با تشکیل رگه و کانه‌زایی صورت گرفته، شناسایی شد (شکل ۴). براساس نتایج این مطالعه، دگرسانی‌های سریستی، سیلیسی و آرژیلیتی حدواسط با نزدیک شدن به رگه‌ها افزایش می‌یابند که در اغلب کانسارهای گرمایی در ارتباط با شکستگی‌ها و فضاها خالی تشکیل می‌شوند. براساس نتایج حاصل از آنالیز XRD دگرسانی آرژیلیتی حدواسط با اجتماعی از کانی‌های کوارتز، مونتموریونیت و ایلیت به‌عنوان فاز اصلی مشخص شد که کانی‌های آلپیت، کلسیت، هماتیت و کلریت نیز کم‌ویش آنها را همراهی کرده‌اند. با فاصله گرفتن از رگه‌های کانه‌دار، دگرسانی‌های کربناتی و کلریتی، دگرسانی‌های غالب در منطقه می‌باشند. به علاوه، فرآیند اکسایش ثانویه کانی‌های سولفیدی اولیه به‌ویژه پیریت و کالکوپیریت (با چیرگی کانی هماتیت) در کنار پهنه‌های کانی‌سازی و همراه با دیگر پهنه‌های دگرسانی در سطح دیده می‌شود که با افزایش عمق به شدت کاهش می‌یابد.

جهت بررسی درستی نام‌گذاری سنگ‌های منطقه مورد مطالعه براساس مشاهدات میکروسکوپی، نمودار Zr/TiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳- A). با توجه به این نمودار طیف ترکیبی سنگ‌های دربرگیرنده کانسار آبگاره گرایش به سمت سنگ‌های با ترکیب بازالت و آندزیت نشان می‌دهند که با نتایج سنگ‌شناسی مطابقت دارند. بر اساس نمودار Th در مقابل Co (Hastie et al., 2007) سنگ‌های مورد مطالعه در محدوده سری کالک‌آلکانل پتاسیم بالا و شوشونیتی قرار می‌گیرند (شکل ۳- B). برای تعیین موقعیت تکنونیک منطقه مورد مطالعه، نمودار Wood (1980) استفاده شد. براساس این نمودار سنگ‌های منطقه آبگاره در گستره کمان قاره‌ای (CAB) قرار می‌گیرند (شکل ۳- C) که احتمالاً در ارتباط با فرورانش یک ورقه اقیانوسی به زیر پوسته قاره‌ای تشکیل شده‌اند. برای شناخت بهتر ویژگی‌های سنگ‌های آتشفشانی مورد مطالعه، داده‌های به‌هنجار شده نسبت به گوشته اولیه (Sun and Mcdonogh, 1989)، مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۳- D). این نمودار نسبت به عناصری مانند Cs، Sr، U، Th، K، Pb غنی‌شدگی نشان می‌دهد که بنا به نظر Davidson (1996) این غنی‌شدگی، ناشی از آلودگی گوه گوشته‌ای به رسوبات و مواد سطحی از طریق پوسته اقیانوسی فرورونده بوده است. قابل ذکر است که غنی‌شدگی از عناصر Sr، Pb و K حاکی از منشأ گرفتن از گوشته غنی‌شده در نرخ ذوب کم و دخالت پوسته قاره‌ای در تکوین ماگمای مولد سنگ‌های منطقه می‌باشد. به علاوه، غنی‌شدگی این سنگ‌ها نسبت به Cs نیز نشانه متاسوماتیسم منشأ در اثر سیال‌های آزاد شده از لیتوسفر اقیانوسی در حال فرورانش است. در ضمن این نمودار از عناصری مانند P، Ti، Nb و Ba تهنی‌شدگی قابل توجهی را نشان می‌دهد. از آنجا که عناصر Ti و Nb در بخش‌های پوسته‌ای زمین اندک هستند؛ بنابراین آلاش ماگما با مواد پوسته‌ای در تشکیل سنگ‌های مشتق شده از گوه گوشته در طول صعود و جایگیری در سطوح بالا سبب ایجاد بی‌هنجاری منفی در نمونه‌ها شده است که این بی‌هنجاری منفی بیانگر انحلال کمتر این عناصر در سیالات انتقال‌دهنده



شکل ۳- نمودارهای زمین‌شیمیایی سنگ‌های آذرین منطقه: (A) موقعیت سنگ‌های آتشفشانی کانسار در نمودار دوتایی Zr/TiO_2 در برابر Nb/Y (Winchester and Floyd, 1977) که بیشتر نمونه‌ها در محدوده آندزیت و کمتر در محدوده بازالت قرار می‌گیرند؛ (B) نمودار Th در برابر Co (Hastie et al., 2007) و موقعیت سنگ‌ها در قلمرو سری کالک‌آلکانل پتاسیم بالا و شوشونیتی؛ (C) نمودار مثلثی Wood (1980) و موقعیت نمونه‌ها در گستره کمان قاره‌ای (CAB)؛ (D) الگوی به‌هنجار شده عناصر نسبت به گوشته اولیه (Sun and Mcdonogh (1989) و نمایش بی‌هنجاری مثبت عناصر ناسازگار سنگ‌دوست با شعاع یونی بزرگ (LILE) و بی‌هنجاری منفی عناصر ناسازگار با شدت میدان بالا (HFSE).

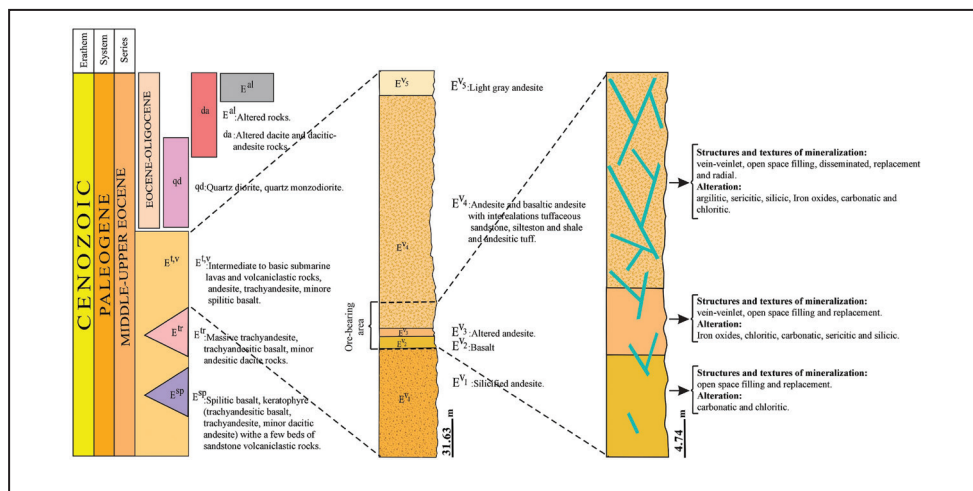


شکل ۴- نمایی کلی از پهنه‌بندی دگرسانی به همراه نیم‌رخ عرضی آن در کانسار مس آبگاره، بر پایه مشاهدات صحرائی، مطالعات میکروسکوپی و داده‌های حاصل از آنالیز پراش پرتو ایکس (XRD).

۵- کانه‌زایی مس در محدوده معدنی آبگاره

شکستگی‌هایی تأثیر پذیرفته است که در بخش‌های نزدیک کانه‌زایی، به صورت شبکه‌ای نامنظم ولی مترکم، فضای لازم را جهت نفوذ محلول‌های گرمایی فراهم آورده‌اند و سبب تشدید فرآیندهای کانه‌زایی و دگرسانی در سنگ‌های منطقه، به‌ویژه در سنگ‌های آندزیتی شده است (شکل ۵).

با توجه به عملکرد شدید نیروهای تکتونیکی تحت تأثیر دو گسل اصلی انجیلو در شمال و طرود در جنوب، کانه‌زایی فراوان و متنوع‌تری را در منطقه شاهد هستیم که با ایجاد گسل‌ها، درزه‌ها و شکستگی‌ها، شرایط را برای برقراری چرخه سیالات گرمایی فراهم کرده‌اند. ساختمان زمین‌ساختی محدوده نیز از یک سری گسل‌ها و



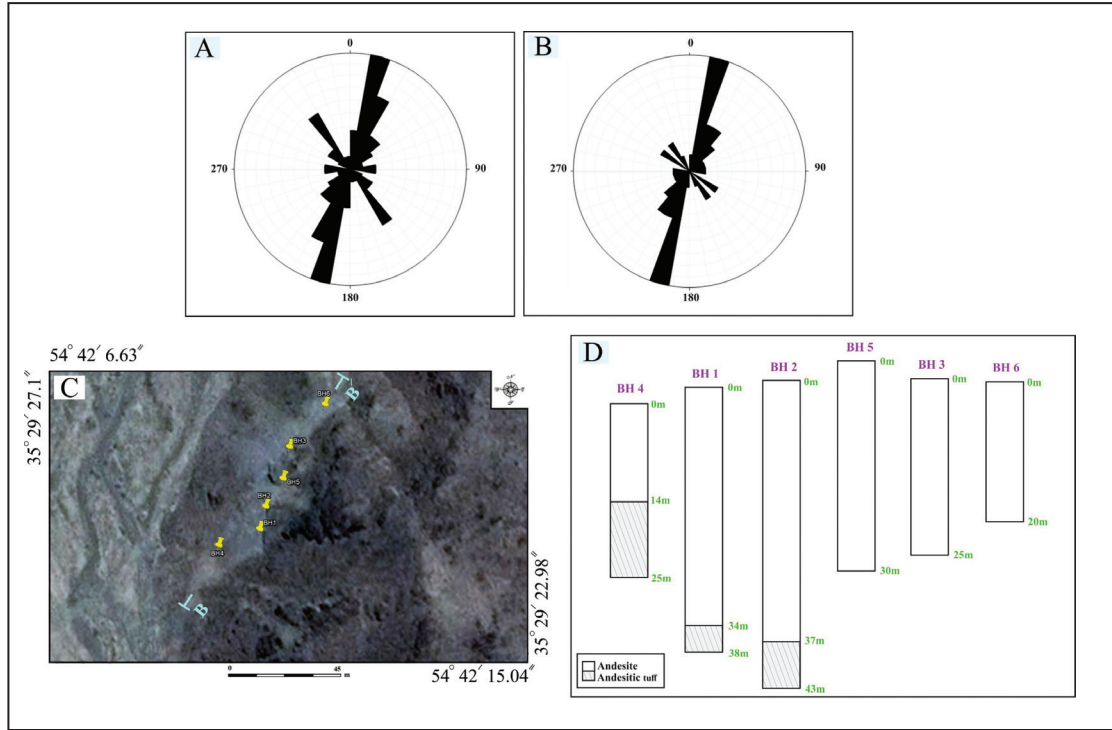
شکل ۵- ستون چینه‌شناسی عمومی از واحدهای سنگی اتوسن میانی-بالایی در منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان) به همراه ستون چینه‌شناسی محدوده معدنی آبگاره (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی بزرگ‌مقیاس آبگاره) و موقعیت کانه‌زایی صورت گرفته.

به متر از کلی ۱۸۱ متر به صورت شیب‌دار و یا قائم در فواصل مختلف، با عمق‌های ۲۰ تا ۴۳ متری در واحد میزبان (E⁴), حفاری گردید (شکل ۶- C). طبق شکل ۶- D از سطح به عمق، جنس سنگ‌های منطقه از آندزیت به سمت توف آندزیتی تغییر ماهیت می‌دهد. با توجه به مطالعات صورت گرفته (شکل ۷) در نتیجه عملکرد فرآیند هوازدگی و تأثیر اکسیژن و آب بر کانی‌های درون‌زاد (پیریت، کالکوپیریت و بورنیت)، کانی‌های

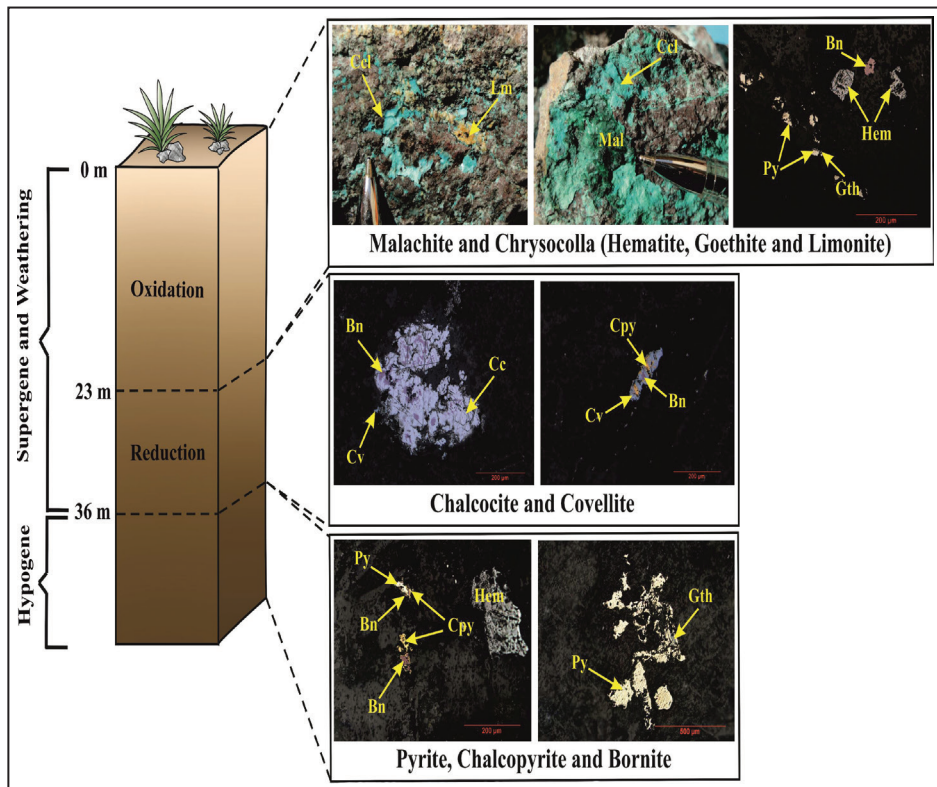
بر پایه نتایج نمودار گل‌سرخ، دو سیستم گسلی با روند NE-SW و NW-SE در منطقه قابل تشخیص است (شکل ۶- A) که بیشتر کانه‌زایی‌ها در امتداد گسل‌های با روند NE-SW شکل گرفته و به نحوی از روند عمومی منطقه تبعیت می‌کنند (شکل ۶- B). ناگفته نماند که معدن‌کاری قدیمی نیز به صورت حفاریاتی در راستای گسل‌های منطقه انجام شده است. بعد از مشخص شدن پهنه‌های کانی‌سازی، حدود ۶ گمانه اکتشافی در بخش شمالی منطقه آبگاره،

نقش به‌سزایی در ایجاد سیال اسیدی و گسترش زون اکسیدان در منطقه دارد. با افزایش عمق و گذر از عمق ۲۳ متری تا حدود ۳۶ متری، در اثر برخورد سیالات جوی با کانی‌های سولفیدی نظیر کالکوپیریت و بورنیت، کانی‌سازی بیشتر شامل کالکوسیت و مقدار کمی کوولیت به‌صورت پرکننده فضاهای خالی و جانیشنی می‌باشد.

محیط اکسیدان از جمله مالاکیت و کریزوکولا به همراه اکسید و هیدروکسیدهای آهن (هماتیت، گوتیت و لیمونیت) در درون درزه و شکاف‌های سنگ میزبان به شکل شبکه نامنظم رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضای خالی تشکیل شده‌اند. ذکر این نکته ضروری است که تخریب پیریت تحت شرایط اکسیدان در مجاورت با سیال جوی



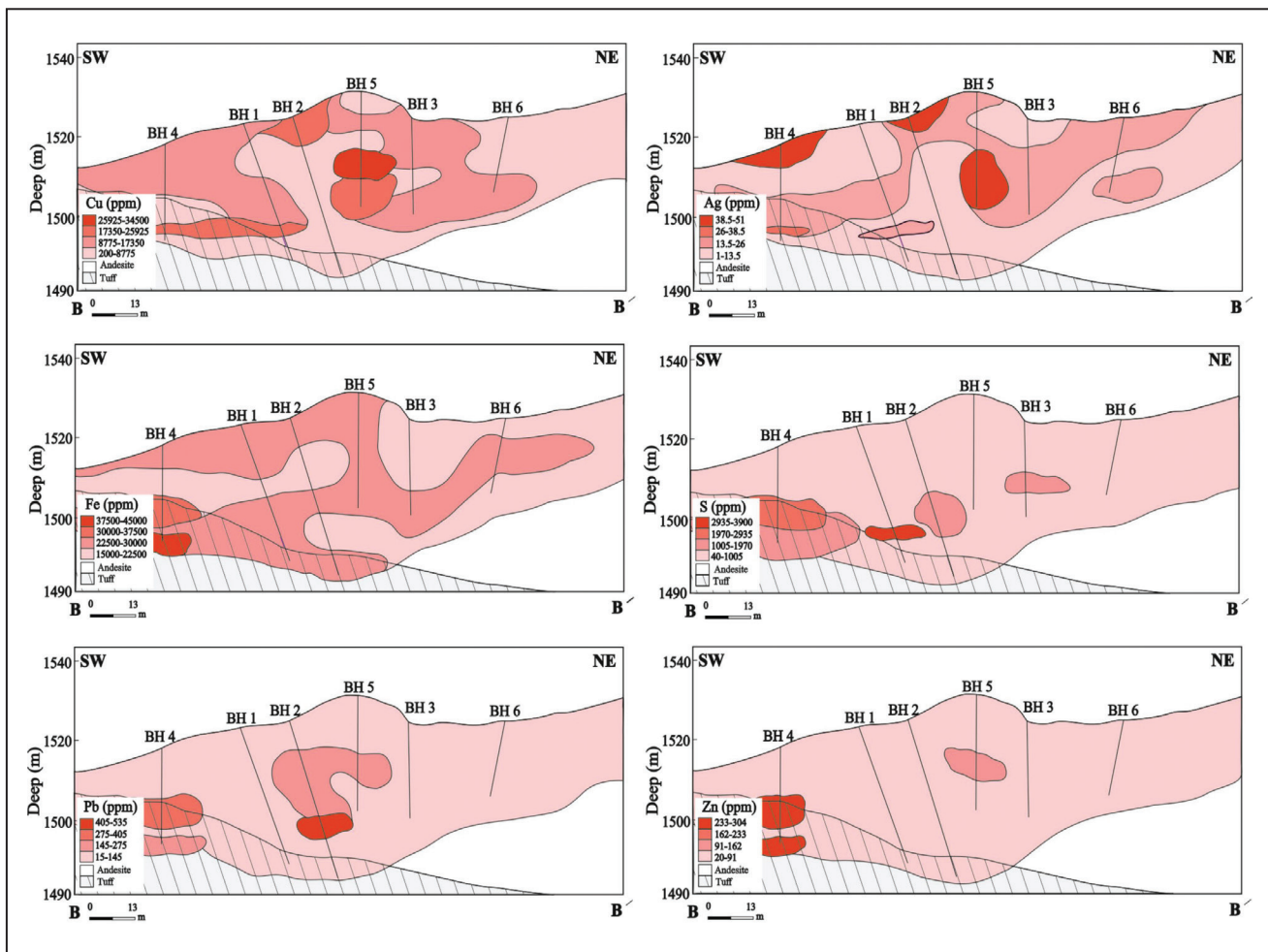
شکل ۶- (A) نمودار گل‌سرخ‌های فراوانی گسل‌ها؛ (B) نمودار گل‌سرخ‌های فراوانی رگه‌های کانهدار در کانسار مس آبگاره؛ (C) محل حفر گمانه‌های اکتشافی بر روی تصویر ماهواره‌ای (Google Earth)؛ (D) لاگ زمین‌شناسی گمانه‌های اکتشافی.



شکل ۷- مدل شماتیکی از افق‌های مختلف کانه‌زایی به همراه کانی‌های شاخص هر کدام (بر اساس اطلاعات گمانه‌های اکتشافی)
 (Py = پیریت، Cpy = کالکوپیریت، Bn = بورنیت، Cc = کالکوسیت، Cv = کوولیت، Mal = مالاکیت، Ccl = کریزوکولا، Hem = هماتیت، Gth = گوتیت، Lm = لیمونیت).

نقره به صورت مستقل در کانسارهای مورد مطالعه مشاهده نشده است، ولی حضور نقره در کانه‌زایی‌های مس با ماهیت مشابه در دنیا امری متداول است. از طرفی، هم‌روند با این افزایش، گوگرد نیز افزایش می‌یابد که وجود کانی‌های سولفیدی مس و آهن در عمق، در افزایش آن مؤثر است. رخداد شست‌وشوی اسیدی و هوازدگی باعث خروج گوگرد از ساختمان کانی‌ها و کاهش میزان گوگرد در مناطق سطحی شده است. این کمبود با تبدیل کانه‌های پیریت و کالکوپیریت به اکسیدها و هیدروکسیدهای آهن در ارتباط می‌باشد که حاکی از غالب بودن شرایط اکسیداسیون در سطح است. مس ارتباط نزدیکی با آهن نشان نمی‌دهد و میزان آن کاهش می‌یابد که این نشان‌دهنده تفاوت‌های فضایی میان این عناصر است. لازم به ذکر است که جانشینی کالکوسیت سوپرژن سبب کاهش آهن و بورنیت در اعماق سبب افزایش همزمان آهن و مس نیز باقی‌مانده و کالکوپیریت و بورنیت در اعماق سبب افزایش همزمان آهن و مس نیز شده است. بالا بودن میزان آهن در بخش‌های سطحی را نیز می‌توان به تبدیل کانی‌های سولفیدی به اکسید و هیدروکسیدهای آهن نسبت داد. Zn و Pb نیز دارای همبستگی مثبت با یکدیگر هستند و تغییرات مشابهی از خود نشان می‌دهند. بیشترین میزان فراوانی این دو عنصر در بخش‌هایی است که مس دارای حداقل فراوانی باشد. به عبارتی، تحرک پذیری بالای Zn و Pb سبب شده که با افزایش مس میزان آنها نیز کاهش یابد. قابل ذکر است که این عناصر در pH بالا دارای توانایی مهاجرت پایینی هستند.

در این افق آثاری از کانیهای پیریت، کالکوپیریت و بورنیت به صورت باقی‌مانده مشاهده می‌شود. از عمق ۳۶ متری به بعد کانه‌زایی به صورت هیپوزن می‌باشد که اغلب به شکل دانه‌پراکنده در زمینه سنگ میزبان (آندزیت) و باطله (کوارتز و کلسیت) مشاهده می‌شود. قابل ذکر است که در توالی پاراژنتیک کانی‌سازی سولفیدی، پیریت اولین کانی تشکیل شده توسط محلول‌های گرمابی در برخورد با کانی‌های مافیک (نظیر بیوتیت و پیروکسن) می‌باشد. این کانی به صورت دانه‌پراکنده و پرکننده فضاهای خالی و همچنین هم‌رشد با کالکوپیریت و بورنیت مشاهده می‌شود. با توجه به مطالب مطرح شده، بافت رگه-رگچه‌ای، شکافه‌پرن، شعاعی، جانشینی و دانه پراکنده از جمله عمده‌ترین بافت‌های مشاهده شده در رخداد کانه‌زایی منطقه به شمار می‌روند که در این میان بافت‌های رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و جانشینی، دیرزاد بودن فرآیند کانی‌سازی در منطقه آبگاره را نشان می‌دهند. افزون‌بر آن پس از کانی‌سازی، رگه-رگچه‌هایی تأخیری از نوع کلسیت در سنگ میزبان رخ داده است. براساس نتایج حاصل از آنالیز ICP-MS در ۶ گمانه اکتشافی، الگوی پراکندگی برخی عناصر از جمله Cu، Fe، S، Pb، Zn نسبت به جوانب و عمق مشخص گردید (شکل ۸). در میان عناصر مرتبط با کانسنگ، نقره به سبب همبستگی بالای با مس، همرا با افزایش میزان مس، نیز افزایش نشان می‌دهد. قابل ذکر است که نقره و مس تمایل کالکوفیلی قوی دارند (Agangi and Reddy, 2016). اگر چه کانی‌های حاوی



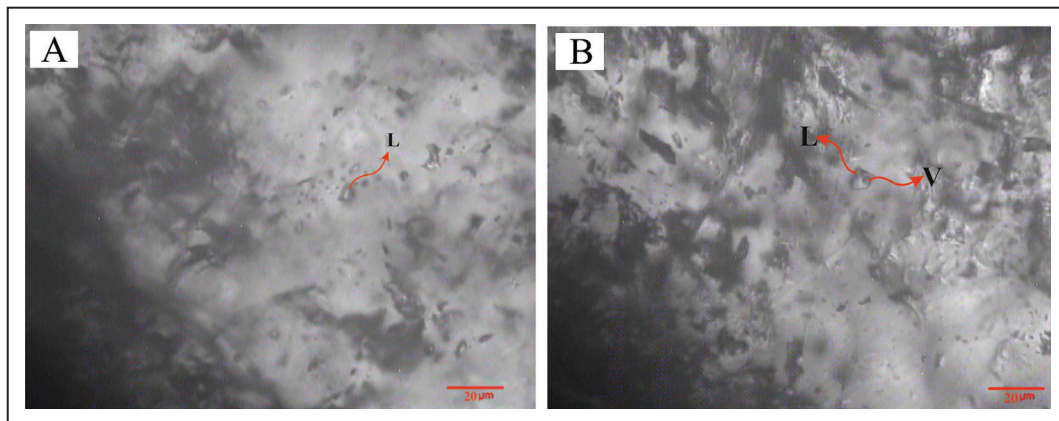
شکل ۸- میزان تغییرات تعدادی از عناصر نسبت به جوانب و عمق در نیم‌رخ عرضی از محل گمانه‌های اکتشافی (براساس داده‌های ICP-MS حاصل از مغزه‌های حفاری).

۶- میانبرهای سیال

۶-۱. مورفولوژی و پتروگرافی میانبرهای سیال

حجم میانبر سیال را اشغال کرده است. در همین راستا نمونه‌ها ابتدا تا زیر نقطه انجماد سرد و سپس گرم شدند و دمای ذوب آخرین قطعه یخ (T_{mice}) و دمای همگن شدن (T_H) ثبت گردید (جدول ۳). براساس مطالعات انجام شده بر روی نمونه‌ها، میانگین دمای همگن شدن در مجموعه میانبرهای سیال از ۱۴۵ تا ۲۱۷ درجه سانتی‌گراد و میزان T_{mice} بین ۲/۲- تا ۷- به دست آمد. قابل ذکر است که با استفاده از دمای نهایی ذوب یخ می‌توان به میزان شوری سیال پی برد؛ لذا در نمونه‌های مطالعه شده، درجه شوری میانبرهای سیال از ۳/۷۳ تا ۹/۸۴ درصد وزنی معادل نمک طعام تغییر می‌کند.

جهت تکمیل مطالعات زمین‌شناسی و همچنین شناخت ماهیت فیزیکوشیمیایی سیال کانه‌ساز و بررسی تغییرات دمایی و شیمی آن در طی تشکیل کانسار، از رگه- رگچه‌های کوارتز همراه با کانه‌زایی، مقاطع دوبرصیفیل تهیه شد. براساس رده‌بندی ارائه شده توسط Shepherd et al. (1985)، دو نوع میانبر سیال تک‌فازی مایع (L) و دو فازی مایع-گاز (L+V; Liquid rich) در نمونه‌های مورد مطالعه شناسایی شد (شکل ۹). به منظور اجتناب از هر گونه خطا، بیشتر میانبرهای سیال دو فازی مایع-گاز جهت مطالعات ریزدماسنجی مورد استفاده قرار گرفت که در این نوع میانبرها، فاز گازی تنها حدود ۱۰ تا ۳۵ درصد



شکل ۹- (A) میانبرهای سیال تک‌فازی مایع (L)؛ (B) میانبرهای سیال دو فازی مایع-گاز با محتوای فاز غالب مایع (L+V; Liquid rich).

جدول ۳- نتایج مطالعات ریزدماسنجی (میکروتومتری) سیالات درگیر بر روی نمونه‌های کوارتز در کانسار مس آبگاره.

N	Size (μm)	Type	Origin	T_{mice} (°C)	T_e (°C)	T_H (°C)	Salinity (Wt % NaCl)
۱	۷	L+V	P	-۲.۲	-۳۰	۱۵۴	۳.۷۳
۲	۶	L+V	P	-۶	-۳۰	۱۸۳	۸.۶۹
۳	۷	L+V	P	-۴.۴	-۳۰	۱۷۲	۷.۲۲
۴	۶	L+V	P	-۵.۵	-۳۰	۱۹۶	۸.۷۵
۵	۶	L+V	P	-۳.۲	-۳۰	۱۴۵	۵.۳۹
۶	۵	L+V	P	-۷	-۳۰	۲۱۷	۹.۸۴

۶-۲. نتایج و تفسیر میانبرهای سیال

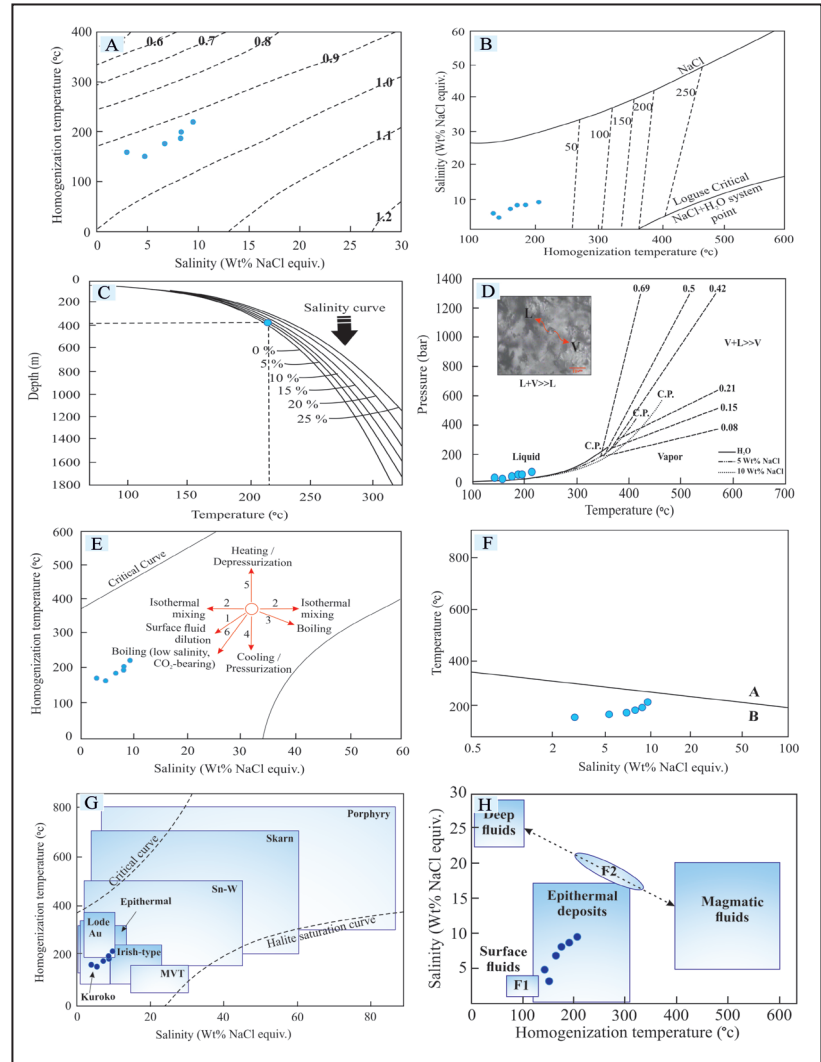
سردشدگی و مخلوط شدن با آب‌های سرد جوی را مسئول تحولات ایجاد شده در سیال دانست (شکل ۱۰-E). بنا به نظر Wilkinson (2001) سرد شدن اهمیت ناچیزی در ته‌نشست مقادیر قابل توجهی مواد معدنی در یک حجم محدود از سنگ، به سبب نبود شیب زمین‌گرایی زیاد در محیط‌های پوسته‌ای دارد. لذا روندهای سردشدگی و رقیق‌شدگی در این کانسار را می‌توان نشانه ورود آب‌های سرد سطحی به درون سامانه در نظر گرفت. از طرفی جهت تعیین نوع لیگاند‌های مؤثر در حمل فلزات از نمودار (Large (1989) استفاده شد (شکل ۱۰-F). با توجه به این‌که نمونه‌های مورد مطالعه غالباً دارای دما و شوری پایین هستند؛ تمامی نمونه‌ها در بخش لیگاند‌های بی‌سولفیدی قرار گرفتند. براساس درصد شوری و دمای همگن شدن سیالات درگیر موجود در نمونه‌های مورد مطالعه و همچنین نمودار دمای همگن شدن-شوری سیالات درگیر طراحی شده توسط Wilkinson (2001)، میانبرهای سیال مورد مطالعه در محدوده اپی‌ترمال قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-G). به منظور تعیین منشأ سیال

با توجه به روند تغییرات شوری نسبت به دمای همگن‌شدگی (Bodnar, 1983)، چگالی سیالات مؤثر در سامانه‌های کانه‌زایی در محدوده بین ۰/۹ تا ۱ gr/cm³ قرار می‌گیرند (شکل ۱۰-A)، و فشار حاکم در طی تشکیل کانسنگ در کانسار مس آبگاره کمتر از ۵۰ بار اندازه‌گیری شد (شکل ۱۰-B؛ Ramdohr, 1980). به علاوه طبق نمودار Hass (1971)، حداقل عمق به دام افتادن میانبرهای سیال ۳۹۰ متر برآورد شد (شکل ۱۰-C). با مشاهده تغییرات فشار نسبت به دمای همگن‌شدگی در نمودار ارائه شده توسط Al-Hwaiti et al. (2010) و همچنین عدم وجود میانبرهای دو فازی غنی از گاز، عدم رخداد فرآیند جوشش در این کانسار را تأیید می‌کند (شکل ۱۰-D). هر چند با توجه به این مطالب شواهد قطعی از رخداد پدیده جوشش در منطقه به دست نیامد؛ ولی با این حال حضور مسکوویت ریزدانه (سریست) و ایلیت در نزدیکی رگه‌ها نشان می‌دهد که احتمالاً جوشش محدودی در منطقه مورد مطالعه رخ داده باشد. براساس نمودار ارائه شده توسط Wilkinson (2001)، می‌توان فرآیند

شوری و دمای پایین تر است که این ویژگی می تواند معرف سیالاتی باشد که توسط آب های جوی و یا در اثر تأثیر همین آب های جوی بر روی سیالات ماگمایی حاصل شده اند. بنابراین سیالات بیشتر از سطح منشأ گرفته اند که در اعماق گردش کرده و سیالاتی با شوری و دمای پایین ایجاد کرده اند.

کانی سازی در منطقه آبگاره و همچنین مشخص کردن سهم هر کدام از سیالات، از نمودار ارائه شده توسط (Esteban-Arispe et al., 2016) مورد استفاده قرار گرفت (شکل ۱۰-H). با ترسیم داده های حاصل از مطالعات ریزدماسنجی میانبارهای سیال بر روی این نمودار، می توان نتیجه گرفت که سیالات مؤثر در کانی سازی، سیالی با

شکل ۱۰- A) نمودار دما- شوری جهت تعیین چگالی محلول های NaCl+H₂O اشباع از بخار (Bodnar, 1983)؛ B) نمودار تعیین فشار بخار محلول براساس دمای همگن شدن و میزان شوری (Ramdohr, 1980)؛ C) تعیین عمق به دام افتادن میانبارهای سیال در منطقه مورد مطالعه (Haas, 1971)؛ D) نمودار فشار- دما جهت تعیین میانبارهای غنی از بخار و مایع به همراه منحنی جوشش (سامانه NaCl+H₂O با شوری 5 Wt% NaCl)؛ E) نمودار دمای همگن شدن- شوری جهت تعیین عوامل مؤثر در تکامل سیال و ته نشین مواد معدنی (Wilkinson, 2001)؛ F) نمودار Large (1989) جهت تعیین لیگاندهای احتمالی حمل فلزات در کانسار مورد مطالعه (A: لیگاندهای کلریدی، B: لیگاندهای سولفیدی)؛ G) نمودار دمای همگن شدن در برابر درجه شوری میانبارهای سیال و تعیین تیپ احتمالی (Wilkinson, 2001)؛ H) نمودار درجه شوری- دمای همگن شدن جهت تعیین منشأ سیال به دام افتاده (Esteban-Arispe et al., 2016).



۷- مقایسه کانسار آبگاره با چند کانسار و اندیس اپی ترمال در جهان و ایران

با سولفیداسیون پایین وجود دارد. قابل ذکر است که از مقایسه با کانسارهای اپی ترمال با سولفیداسیون بالا پرهیز شده است؛ زیرا از نظر دما، شوری و عمق تشکیل و همچنین دگرسانی و کانی های تشکیل شده، نقاط مشترکی میان کانسار آبگاره و این نوع کانسارها دیده نمی شود. کانسارهای اپی ترمال با سولفیداسیون پایین با حضور کانی های آدولاریا و سریسیت و همچنین کالسدون، کلسیت، ایلیت یا ایلیت- اسمکتیت در نزدیکی یا درون رگه ها و عدم حضور آلونیت و کائولینیت اولیه مشخص و توسط سیالات فقیر از گوگرد و احیایی (HS⁻ و H₂S) با pH تقریباً خنثی، شوری پایین و با منشأ جوی حاصل می شوند.

کانسارهای اپی ترمال به عنوان دسته مهمی از کانه زایی گرمایی به موازات پهنه های فرورانش حاشیه قاره ها و جزایر قوسی تشکیل می شوند (Sillitoe and Hedenquist, 2003). طبقه بندی های مختلفی برای کانسارهای اپی ترمال وجود دارد که در حال حاضر دو نوع کانی سازی با عنوان سولفیداسیون بالا و سولفیداسیون پایین به رسمیت شناخته شده است. کانسارهای اپی ترمال با سولفیداسیون بالا به عنوان کانسارهای Au و Cu مشخص می گردند. در حالی که کانسارهای اپی ترمال با سولفیداسیون پایین معمولاً مانع کانی سازی Cu نمی شوند ولی فلزاتی نظیر Au و Ag و همچنین فلزات پایه (Zn و Pb) به همراه مقادیر کمتری Se، As، Sb، و Hg در این کانسارها بیشتر شناخته شده اند (Zhong et al., 2017). تمامی ویژگی هایی که در مورد کانسار مس آبگاره در بخش های قبلی بیان شد، موجب گردید که به منظور مقایسه و تعیین نوع کانه زایی و مدل زایشی ذخیره مس آبگاره، به مطالعه و مقایسه کانی سازی در این کانسار با کانسارهای اپی ترمال با سولفیداسیون پایین پرداخته شود (جدول ۴). همان طور که مشاهده می کنید، نزدیکی و همپوشانی آشکاری میان محدوده دما و شوری کانسار آبگاره با محدوده کانسارهای اپی ترمال

۸- مدل و عوامل مؤثر بر تشکیل کانسار

جهت درک بهتر نحوه رفتار سیالات گرمایی و همچنین نحوه تجمع و تشکیل ذخیره از سیال کانه دار در کانسار آبگاره، مدل پیشنهادی به صورت شماتیک در (شکل ۱۱) ارائه گردید. همان طور که در بخش های قبلی اشاره شد جایگیری سیالات و شکل گیری رگه های کانه دار ارتباط مستقیمی با حضور گسل های متعدد

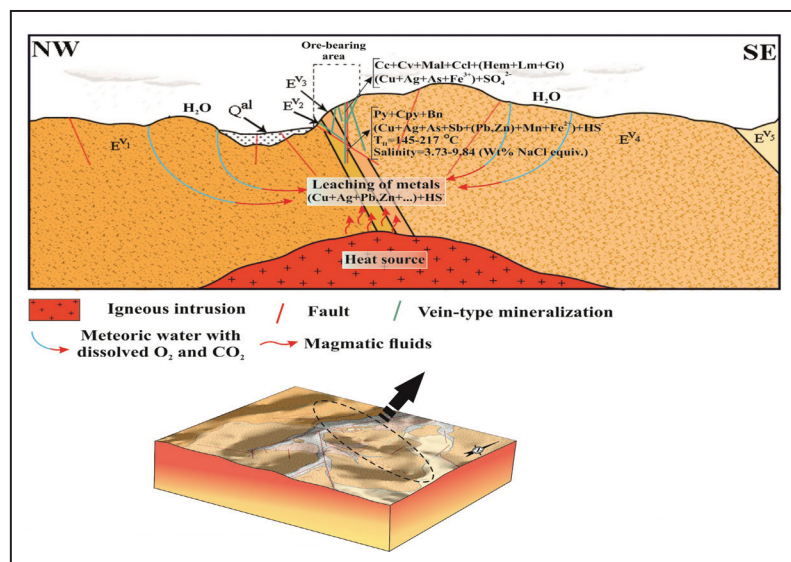
کانی‌های مذبور شده و در مناطق غنی‌شده سوپرژن، به صورت کالکوسیت یا کولیت نهشته و یون‌های آهن نیز به فاز محلول وارد می‌شوند. به علاوه، مالاکیت و کریزوکولا نیز از آب‌های رقیق‌تر و دارای مس کمتر، یا توسط PCO_2 پایین‌تر، در محیط اکسیدان به صورت رگه-رگچه‌ای، پرکننده فضاهای خالی و شعاعی شکل گرفته‌اند.

۹- نتیجه‌گیری

با توجه به ماهیت آتشفشانی-رسوبی توالی میزبان در منطقه طرود و همچنین براساس مطالعات صورت گرفته به نظر می‌رسد که کانسار مس آبگاره در پهنه کمان ماگمایی مرتبط با فروانش حاشیه قاره‌ای تشکیل شده است. با توجه به گستردگی رویداد دگرسانی‌ها، می‌توان چنین در نظر گرفت که سیال‌های گرمایی فعال شده، در طی تزریق توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق به درون واحدهای میزبان، فلز مس و عناصر همبسته آن را از واحدهای میزبان شسته و پس از چرخش در واحدهای سنگی و حرکت به سوی بالا، در امتداد گسل‌ها و درزه و شکستگی‌های مجموعه‌ای از سنگ‌های آتشفشانی با ترکیب غالب آندزیتی به صورت رگه-رگچه‌ای و پرکننده فضاهای خالی نهشت داده‌اند. بررسی میانبراهای سیال و همچنین ارتباط بین داده‌های دما (۱۴۵-۲۱۷ درجه سانتی‌گراد) و شوری (۳/۷۳-۹/۸۴) معادل درصد وزنی (NaCl) در این کانسار نشان می‌دهد که رخداد کانه‌زایی مس در نتیجه آمیختگی سیال‌های گرمایی با سیال‌های جوی در عمق حداقل ۳۹۰ متر رخ داده است. لذا با توجه به داده‌ها و مشاهدات صورت گرفته می‌توان این گونه استنباط کرد که رقیق‌شدگی، کاهش درجه حرارت و جوشش محدود از پارامترهای اصلی شکل‌گیری کانسار مس آبگاره باشند. شواهد زمین‌شیمیایی حاکی از آن است که کانسار آبگاره علاوه بر مس از نظر نقره نیز از پتانسیل نسبتاً خوبی برخوردار می‌باشد. اگرچه کانی‌های حاوی نقره به صورت مستقل در کانسارهای مورد مطالعه مشاهده نشده است، لذا انتظار می‌رود که این عنصر در شبکه کانی‌های دیگر از جمله کالکوپیریت و کالکوسیت قرار گرفته باشد؛ زیرا این کانی‌ها میزبان خوبی برای این عنصر به‌شمار می‌روند. در کل تلفیق یافته‌های زمین‌شناسی و سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، دگرسانی، زمین‌شیمیایی و مقایسه آن با کانسارهای اپی‌ترمال بیانگر این مطلب است که رگه‌ها و مجموعه کانی‌های دگرسانی گرمایی مشاهده شده در منطقه مورد مطالعه قابل قیاس با کانسارهای اپی‌ترمال سولفید پایین می‌باشد. بدیهی است که با توجه به کانی‌سازی‌های متنوع در نوار طرود-چاه‌شیرین، چنین مطالعاتی می‌تواند راه‌گشای پروژه‌های اکتشافی آتی در منطقه و نواحی مشابه هم‌جوار باشد.

و همچنین درزه و شکستگی‌های فراوان در منطقه دارد که زمینه را برای نفوذ سیال‌های کانه‌ساز فراهم کرده‌اند. به علاوه درصدی از این گسل‌ها و شکستگی‌ها بعد از کانه‌سازی تشکیل و گسترش یافته‌اند که نقش مؤثری در اکسیداسیون کانه‌ها و توسعه پهنه‌های اکسیدی در بخش فوقانی کانسار داشته‌اند. از طرفی، تخلخل و نفوذپذیری بالای سنگ‌های آذرآواری نیز در حرکت این سیالات بی‌تأثیر نبوده‌اند. با توجه به تنوع و گستردگی دگرسانی‌ها و حضور دایک‌های مرتبط با توده‌های نفوذی در پیرامون منطقه مورد مطالعه، به نظر می‌رسد که حرارت مورد نیاز برای چرخش محلول‌های گرمایی در کانسار آبگاره، در طی تزریق توده‌های نفوذی نیمه‌عمیق به درون واحدهای میزبان، فراهم شده است. این توده‌ها به‌عنوان منشأ اصلی فلزات نقش مؤثری ندارند. بررسی میانبراهای سیال در کانسار آبگاره نشان می‌دهد که آمیختگی آب‌های ماگمایی با آب‌های جوی حاوی دی‌اکسید کربن و اکسیژن هواکره، ضمن کاهش دمای سیال کانه‌ساز نقش بسیار مؤثری در شکل‌گیری رگه‌های کانه‌دار در منطقه داشته و از طرفی سبب افزایش pH و کاهش درجه شوری (از طریق رقیق شدن) نیز شده‌اند. کانی‌شناسی و نوع دگرسانی‌های رایج (از جمله دگرسانی سیرسیتی) در اطراف رگه‌ها، نبود آلونیت و شوری پایین سیال، همگی حاکی از ماهیت کمی قلیایی تا نزدیک به خنثی محلول کانه‌ساز است که حاوی HS^- و CO_2 می‌باشد. گدازه‌ها و توف‌ها در منطقه حاوی مقادیر فراوانی کانی‌های سیلیکاته ناپایدار مانند پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت و پیروکسن هستند که همه آنها مقادیری مس و دیگر فلزات غیر آهنی درون شبکه خود دارند (Agangi and Reddy, 2016). مس و دیگر فلزات موجود در این کانی‌ها توسط سیالات گرمایی، از شبکه آنها آزاد و در سیال کانه‌ساز به صورت محلول وارد و حمل می‌شوند. با توجه به مطالعات صورت گرفته می‌توان رخداد و تحول کانه‌زایی مس در منطقه را در دو مرحله در نظر گرفت؛ (۱) مرحله گرمایی اولیه و (۲) مرحله غنی‌شدگی ثانویه و اکسایش. در ابتدا آب‌های سطحی اکسیژن‌دار پس از نفوذ به اعماق و ترکیب با آب‌های ماگمایی دما بالا، در شرایط fS2 بالا منجر به تشکیل پیریت در مراحل اولیه کانی‌سازی می‌شوند. با افزایش غلظت مس، کانی‌هایی نظیر کالکوپیریت و بورنیت شکل می‌گیرند. در پی افزایش اختلاط سیالات با یکدیگر و تغییر ماهیت سیالات و محیط ته‌نشست، مرحله دوم کانه‌زایی یعنی سوپرژن و هوازدگی رخ داده است. در منطقه اکسایش، برخورد سیالات اکسیدان با پیریت باعث تجزیه این کانی به سولفات فریک و اسیدسولفوریک می‌گردد که سبب می‌شود تا آب‌های جوی بتوانند فلزهای کانسنگ‌ها را حل کنند و در نتیجه باعث تشکیل کانی‌های هماتیت، لیمونیت و یا گوتیت در نزدیکی سولفیدهای مس شوند. در شرایط احیایی، برخورد سیالات جوی با کانی‌های سولفیدی نظیر پیریت، کالکوپیریت و بورنیت، مس موجود در محلول جانشین آهن در

شکل ۱۱- نمای شماتیک از الگوی تشکیل و نحوه کانه‌زایی صورت گرفته در محدوده معدنی آبگاره.



جدول ۴- مقایسه برخی از ویژگی‌های کانسار آبگاره با کانسارهای اپی ترمال سولفیداسیون پایین در سایر نقاط جهان و ایران.

ویژگی‌های شاخص	آبگاره (جنوب دامغان)	Arzular (شمال شرق ترکیه)	Lago Fontana (جنوب غرب آرژانتین)	Yueyang (جنوب شرق چین)	نیگویه (غرب استان قزوین)	دارستان (جنوب-جنوب شرق دامغان)
سنگ میزبان و همراه	آندزیت، آندزیت بازالتی، بازالت و توف	بازالت-آندزیت	آندزیت، آندزیت بازالتی، بازالت، توف و سنگ‌های رسوبی (ماسه سنگ و کنگلومرا)	باتولیت گرانیتی	توف، ریوداسیت و آندزیت-آندزیت بازالت	آندزیت و توف برش آندزیتی و داسیتی
سن	ائوسن میانی- بالایی	ائوسن	ژوراسیک زیرین- کرتاسه	ژوراسیک زیرین- میانی	ائوسن	ائوسن میانی
کانی‌شناسی کانسنگ	پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت و کریزوکولا	گالن، اسفالریت، پیریت، کالکوپیریت، تتراهدردیت، طلای طبیعی، سینابر، آرسنوپیریت و استینیت	پیریت، گالن، کالکوپیریت، هماتیت، آرسنوپیریت، روتیل، کالکوسیت، کوولیت، سروزیت، طلا و نقره طبیعی	پیریت، کالکوپیریت، یورنیت، گالن، اسفالریت، کالکوسیت، الکتروم، نقره و طلای طبیعی	مگنتیت، پیریت، کالکوپیریت، بورنیت، گالن، اسفالریت، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، سروزیت، هماتیت و گوتیت	کالکوپیریت، پیریت، طلا، کالکوسیت، کوولیت، مالاکیت، آرزوریت، اسپیکولاریت و هیدروکسیدهای آهن
کانی‌های باطله	کوارتز، کلسیت و ژپس	کوارتز، کلسیت و ژپس	کوارتز و کلسیت	کلسیت، کوارتز- آدولاریا و آپاتیت	کوارتز و کلسیت	کوارتز و کلسیت
دگرسانی‌های مرتبط با کانه‌زایی	سیلیسی، آرزولیتی حدواسط، سریسیتی، کربناتی، کلریتی و اکسیدهای آهن	آرزولیتی، سیلیسی و اکسیدهای آهن	سیلیسی، سریسیتی، آرزولیتی و پروپیلیتی	سریسیتی و آدولاریا- کربنات	سیلیسی، آرزولیتی، سریسیتی و پروپیلیتی	سیلیسی، آرزولیتی و کلریتی- پروپیلیتی
دما و شوری	$T_h=145-217^{\circ}C$ Salinity=3.73-9.84 (Wt%NaCl)	$T_h=130-295^{\circ}C$ Salinity=4.3-12.4 (Wt%NaCl)	$T_h=180-325^{\circ}C$ Salinity=1.7-4.2 (Wt%NaCl)	$T_h=184-379^{\circ}C$ Salinity=0.4-7.6 (Wt%NaCl)	$T_h=133-312^{\circ}C$ Salinity=0.3-5.5 (Wt%NaCl)	$T_h=252-375^{\circ}C$ Salinity=9.5-24.3 (Wt%NaCl)
عمق کانی‌سازی	۳۹۰ m	۱۵۰۰-۵۰۰ m	۶۰۰ m	۵۲۷-۴۴۸ m	۱۳۰۰-۲۰۵ m
منبع	تحقیق حاضر	Akaryalı and Tüysüz, 2013	Lanfranchini et al., 2013	Zhong et al., 2017	آفاجانی مرسا و همکاران، ۱۳۹۵	راستاد و همکاران، ۱۳۷۹ Mehrabi et al., 2015

کتابنگاری

- اشراقی، ص.ع. و جلالی، ا.، ۱۳۸۵- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ معلمان، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران.
- آفاجانی مرسا، س.، امامی، م. ه.، لطفی، م.، قلی‌زاده، ک. و قاسم‌سیانی، م.، ۱۳۹۵- منشأ رگه‌های پلی‌متال اپی ترمال در منطقه نیگویه (باختر قزوین) براساس مطالعات کانی‌شناسی، دگرسانی و میانبار سیال، فصلنامه علوم زمین، دوره ۲۵، شماره ۹۹، ص ۱۶۸-۱۵۷. DOI:10.22071/gsj.2016.40893
- آفانباتی، س.ع.، ۱۳۸۳- زمین‌شناسی ایران، چاپ اول، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ص ۶۰۸.
- حسینی دینانی، ه. و باقری، ه.، ۱۳۹۱- تعیین مرکز تقریبی کانه‌سازی و شرایط نهشت مس-طلا با استفاده از مطالعات کانه‌نگاری و میانبارهای سیال در اندیس کالجویه (جنوب غرب نائین) "مجله پترولوژی، دوره ۳، شماره ۹، ص ۳۶-۱۷. ijp.ui.ac.ir/article_16093_8d16748aec572297642c7f0c88c9b9fc.pdf
- راستاد، ا.، تاج‌الدین، ح.ع.، رشیدنژاد عمران، ن.ا. و باباخانی، ع.ر.، ۱۳۷۹- خاستگاه و پتانسیل طلا (مس) در محدوده معدنی دارستان- باغو (جنوب دامغان)، فصلنامه علوم زمین، شماره ۳۶-۳۵، ص ۶۰-۷۹. <https://www.sid.ir/fa/journal/ViewPaper.aspx?id=42185>
- رشیدنژادعمران، ن.، ۱۳۷۱- بررسی تحولات سنگ‌شناسی و ماگمایی و ارتباط آن با کانه‌سازی طلا در منطقه باغو (جنوب دامغان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت معلم.
- غفاری، م.، ۱۳۸۹- پترولوژی و ژئوشیمی توده گرانیتوئیدی ظرفند (جنوب شرق اردستان)، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم زمین، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- مهرابی، ب. و قاسم‌سیانی، م.، ۱۳۸۹- کانی‌شناسی و زمین‌شناسی اقتصادی کانسار پلی‌متال چشمه‌حافظ، استان سمنان، ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی، دوره ۲، شماره ۱، ص ۲۰-۱. <https://doi.org/10.22067/econg.v2i1.3569>
- مهرابی، ب.، قاسم‌سیانی، م. و طالع‌فاضل، ا.، ۱۳۹۳- بررسی سامانه کانه‌زایی فلزات پایه و گرانبها در محدوده‌های معدنی چشمه‌حافظ و چالو کمان ماگمایی طرود-چاه‌شیرین، فصلنامه علوم زمین، دوره ۲۴، شماره ۹۳، ص ۱۰۵-۱۱۸. DOI: 10.22071/gsj.2014.43549
- هوشمندزاده، ع.، علوی نائینی، م. و حقی‌پور، ع.، ۱۳۵۷- تحول پدیده‌های زمین‌شناسی ناحیه طرود (از پرکامبرین تا عهد حاضر)، سازمان تحقیقات زمین‌شناسی و معدنی کشور، ۱۳۸ ص.

References

- Agangi, A. and Reddy, S. M., 2016- Open-system behaviour of magmatic fluid phase and transport of copper in arc magmas at Krakatau and Batur volcanoes, Indonesia, Journal of Volcanology and Geothermal Research, 327, pp 669-686. DOI: 10.1016/j.jvolgeores.2016.10.006.

- Akaryalı, E. and Tüysüz, N., 2013- The genesis of the slab window-related Arzular low-sulfidation epithermal gold mineralization (eastern Pontides, NE Turkey), *Geoscience Frontiers*, 4(4), pp 409-421. DOI: 10.1016/j.gsf.2012.12.002.
- Al-Hwaiti, M., Zoheir, B., Lehmann, B. and Rabba, I., 2010- Epithermal gold mineralization at Wadi Abu Khushayba, southwestern Jordan- *Ore Geology Reviews*, 38(1-2), pp 101-112. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2010.07.002.
- Bodnar, R. J., 1983- A method of calculating fluid inclusion volumes based on vapor bubble diameters and PVTX properties of inclusion fluids, *Economic Geology*, 78(3), pp 535-542. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.78.3.535>.
- Davidson, J. P., 1996- Deciphering mantle and crustal signatures in subduction zone magmatism” Subduction top to bottom, pp. 251-262. <https://doi.org/10.1029/GM096p0251>.
- Esteban-Arispe, I., Velasco, F., Boyce, A. J., Morales-Ruano, S., Yusta, I. and Carrillo-Rosúa, J., 2016- Unconventional non-magmatic sulfur source for the Mazarrón Zn–Pb–Cu–Ag–Fe epithermal deposit (SE Spain), *Ore Geology Reviews*, 72, pp 1102-1115. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2015.10.005.
- Haas, J. L., 1971- The effect of salinity on the maximum thermal gradient of a hydrothermal system at hydrostatic pressure, *Economic Geology*, 66(6), pp 940-946. DOI: 10.2113/gsecongeo.66.6.940
- Hastie, A. R. Kerr, A. C. Pearce, J. A. and Mitchell, S. F., 2007- Classification of altered volcanic island arc rocks using immobile trace elements: development of the Th–Co discrimination diagram, *Journal of Petrology*, 48, pp 2341-2357. DOI:10.1093/petrology/egm062.
- Huber, H. and Stocklin, J., 1959- Geological report on the Troud-Moaleman area. N.I.O.C.
- Lanfranchini, M. E. Etcheverry, R.O. De Barrio, R. E. and Hernández, C. R., 2013- Precious metal-bearing epithermal deposits in western Patagonia (NE Lago Fontana region), Argentina, *Journal of South American Earth Sciences*, 43, pp 86-100. DOI: 10.1016/j.jsames.2013.01.005.
- Large, R. R., 1989- Gold distribution and genesis in Australian volcanogenic massive sulfide deposits and their significance for gold transport models, *Econ. Geol*, 6, pp 520-535. <https://doi.org/10.5382/Mono.06.40>.
- Mehrabi, B., Ghasemi, S. M. and Tale, F. E., 2015- Structural control on epithermal mineralization in the Troud-Chah Shirin belt using point pattern and Fry analyses, north of Iran, *Geotectonics*, 49(4), pp 320-331. DOI: 10.1134/S001685211504007X.
- Ramdohr, P., 1980- The ore minerals and their intergrowths, 2nd end” Vol. 2, *International Series in Earth Sciences*, pp 1075. DOI: 10.1016/b978-0-08-011635-8.50007-3
- Shepherd, T. J. Rankin, A. H. and Alderton, D. H., 1985- A practical guide to fluid inclusion studies- Blackie. <https://trove.nla.gov.au/version/22206800>
- Sillitoe R. H. and Hedenquist, J. W., 2003- Linkages between volcanotectonic settings, ore-fluid compositions, and epithermal precious metal deposits, *Special Publication-Society of Economic Geologists*, 10, pp 315-343. <https://societyofeconomicgeologists.org/wp-content/uploads/2013/07/SillitoeHedenquist2003SP10Galley.pdf>
- Sun, S. and McDonough, W. F., 1989- Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts : Implications for mantle composition and processes, In: Saunders, A.D., Norry, M.J., (Eds.), *magmatism in the Oceans Basins*, Geological society of London Special Publication, 42, pp 313 - 345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>
- Wilkinson, J. J., 2001- Fluid inclusions in hydrothermal ore deposits, *Lithos*, 55(1-4), pp 229-272. DOI: 10.1016/s0024-4937(00)00047-5
- Winchester, J. A. and Floyd, P. A., 1977- Geochemical discrimination of different magma series and their differentiation products using immobile elements” *Chemical geology*, 20, pp 325-343. DOI: 10.1016/0009-2541(77)90057-2.
- Wood, D. A., 1980- The application of a Th Hf Ta diagram to problems of tectonomagmatic classification and to establishing the nature of crustal contamination of basaltic lavas of the British Tertiary Volcanic Province, *Earth and planetary science letters*, 50(1), pp 11-30. DOI: 10.1016/0012-821x(80)90116-8
- Zhong, J. Chen, Y. J. Qi, J. P. Chen, J. Dai, M. C. and Li, J., 2017- Geology, fluid inclusion and stable isotope study of the Yueyang Ag-Au-Cu deposit, Zijinshan orefield, Fujian Province, China” *Ore Geology Reviews*, 86, pp 254-270. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2017.02.023

Mineralogical, geochemical and genetic aspects of mineralization in Abgareh copper deposit; typical vein-type Cu deposits

R. Mahabady^{1*} and F. Fardoost²

¹M.Sc., Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

²Ph.D., Faculty of Earth Sciences, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran

Received: 2018 December 01

Accepted: 2019 June 01

Abstract

Abgareh copper deposit located in 140 km southwest of shahrood and part of a volcanic-sedimentary Torud-Chah shirin belt that has facies in the northern edge Structural-sedimentary zones of Central Iran. Extensive and numerous alteration and mineralization were formed by volcanic and Magmatic activity in this zone from Eocene to Miocene and are mainly related to the hydrothermal cycle in this zone. Field and petrographical studies, deposit area, consist of andesite, basaltic andesite and basalt and contains less includes tuffit crystal that indicate middle–upper Eocene with with argillitic, sericitic, silicic, carbonatic, chloritic and iron oxides alterations. According to the field observations and mineralogical studies, the mineralization in the region was carried out in two stages: hypogene and supergene and weathering. Hypogen zone minerals are generally pyrite, chalcopyrite and bornite. Because of existence in oxidizing-supergene environment , nearly almost Cu-bearing minerals of the main stage of mineralization have been replaced by secondary Cu minerals such as chalcocite, covellite, malachite and chrysocolla. Fluid inclusion data shows in the temperature range from 145 to 217 °C and salinity between 3.73 and 9.84 Wt%NaCl and depths less than 390 m. On the base of a forementioned evidences, the principle deposition mechanism of ore minerals was mixing of two meteoric and magmatic fluids. The host rocks, ore mineralogy, ore structures and textures, and fluid inclusions characteristics and comparison with similar epithelial deposits indicate that the Abgareh vein system is formed in a low-sulfidation epithermal environment.

Keywords: Mineralization, Geochemistry, Fluid inclusion, Vein-type Cu, Abgareh.

For Persian Version see pages 99 to 110

*Corresponding author: R. Mahabady; E-mail: mohabadi@chmail.ir