



سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و منشأ احتمالی افقهای سنگ آهن اولیتی کم‌عیار در سازند لشکرک، البرز شرقی

منصوره مقصودلو محلی و بهنام شفیعی بافتی*

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

دریافت: 1392/8/7، پذیرش: 1393/12/20

چکیده

افقهای آرژلبیتی دارنده اوئیدهای آهن، از سازند لشکرک البرز شرقی (اردوسین زیرین - میانی) و بر اساس توالی کاملاً آواری کم‌ژرفا و بدون حضور سنگهای آتشفشانی واقع شده‌اند. هماتیت و شاموزیت کانیهای آهن‌دار اصلی هستند و گوتیت و گلاکونیت در مقدار جزئی شناسایی شدند. افقهای مورد بررسی، با میانگین 21 درصد وزنی آهن در گروه سنگ آهنهای اولیتی کم‌عیار رده‌بندی شده‌اند. آهن مورد نیاز برای تشکیل اوئیدهای آهن در مناطق مورد بررسی، از آب دریای معمولی در دسترس قرار گرفته است و این آهن می‌تواند به‌صورت ذرات آواری همراه با رسها، از هوازدگی و فرسایش سنگهای شیلی و از خشکیهای مجاور به دریا حمل شود. بالا بودن میزان پتاسیم و سیلیکا در افقهای اولیت آهن، حضور زیرکن، کوارتز و کانیهای رسی در داخل اوئیدها و همچنین در زمینه این سنگها ضمن تأیید این الگو، نقش رسهای آهن‌دار را در پیدایش اوئیدهای اولیه شاموزیتی در محیطی با pH=5-9 و Eh اکسیدان متوسط - ضعیف با اهمیت نشان داده است. فراوان بودن اوئیدهای هماتیتی نسبت به گوتیتی، اوئیدهای متراکم و بیضی‌شکل و رخداد فراوان رگه‌های کلسیتی قطع‌کننده اوئیدها به فرآیند دیاژنز و تبدیل شاموزیت و گوتیت به هماتیت نسبت داده شده است.

واژه‌های کلیدی: آهن اولیتی، هماتیت و شاموزیت، توالی پیش‌رونده، سازند لشکرک، البرز شرقی

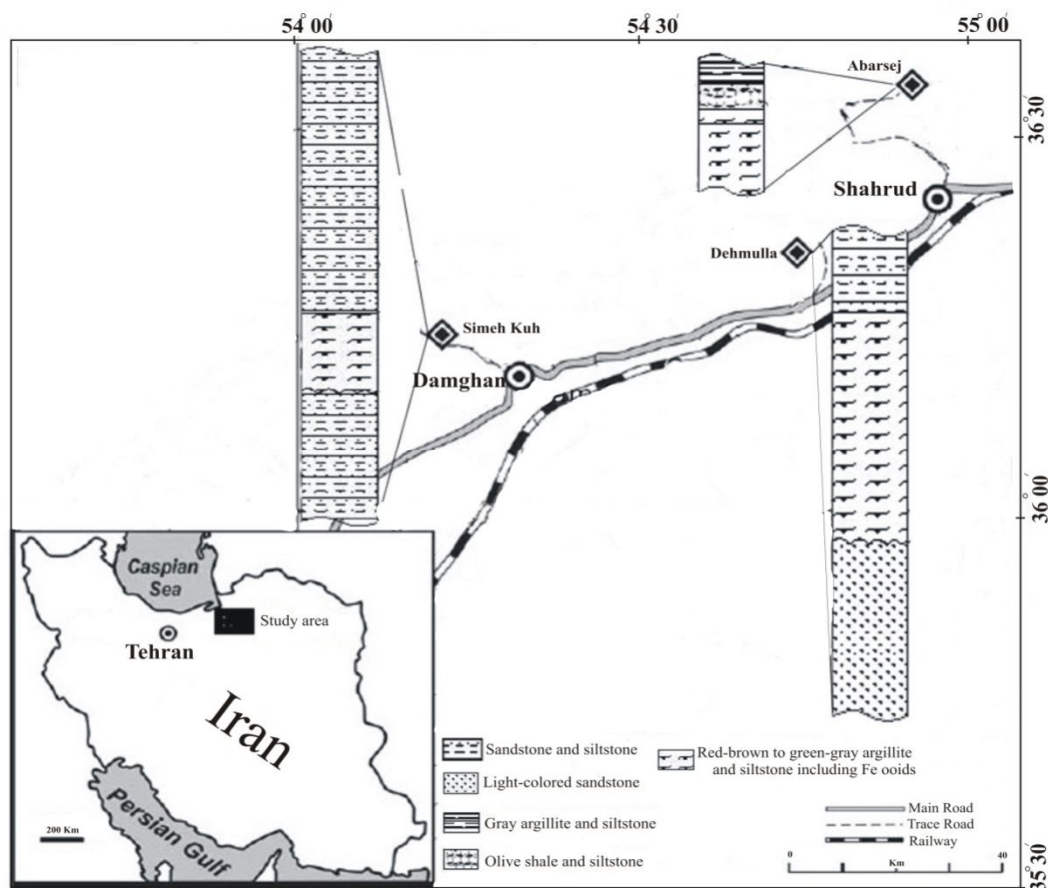
مقدمه

نهشته شده‌اند (Yang and Taylor, 1989; Taylor, 1992). در ایران افقهای رسوبی دارنده اوئید آهن از سنگهای پالئوزوئیک ایران ابتدا در ناحیه طبس (سازند شیشتو در کوههای شتری، ایران مرکزی) و در دامنه جنوبی البرز شرقی (سازند خوش‌ییلاق در شمال شاهرود) گزارش شده است (Stocklin et al., 1965; Ahmadzadeh Heravi et al., 2000; Hosseini-Nezhad, 2000; Hosseini-Nezhad et al., 2007; Khanebad et al., 2007). دارای اوئید آهن در سازند لشکرک (اردوسین زیرین - میانی) در البرز شرقی در شمال شاهرود (منطقه ابرسج)، جنوب‌غرب شاهرود (منطقه ده ملا) و شمال‌غرب دامغان (منطقه سیمه‌کوه) نیز شناسایی شده است (Ghobadi Pour et al., 2011b) (شکل 1). در این پژوهش، افقهای جدید از دید کانی‌شناسی و زمین‌شیمی مورد بررسی قرار گرفته‌اند و با بهره‌گیری از نتایج این بررسیها، پیدایش افقهای کم‌عیار از

سنگهای رسوبی که بیش از 5 درصد حجمی اوئید و به‌طور میانگین 15 تا 21 درصد وزنی آهن کل (TFeO) داشته باشند، سنگ آهنهای اولیتی نامیده شده‌اند (Petranek and Van Houton, 1997; Young, 1989; Mucke and Farshad, 2005). اوئیدهای آهن به‌صورت کروی و بیضوی‌شکل هستند و کمتر از 2 میلی‌متر قطر دارند و دارای لایه‌بندی متحدالمرکز منظمند. پیروئیدها دانه‌های مشابه اوئیدها با قطر بیشتر از 2 میلی‌متر هستند (Young, 1989). سنگ آهنهای اولیتی معمولاً کمتر در توالیهای چینه‌شناسی حضور دارند؛ اما در صورت وجود، افقهای کم‌ضخامت (معمولاً کمتر از 2 متر و گاهی تا 10 متر) را در توالیهای عمدتاً آواری و کمتر کربناته تشکیل می‌دهند؛ که در محیطهای کم‌عمق دریایی یا غیردریایی (معمولاً فلات قاره)

این افقها، مانند تغییرات سطح آب دریا، فرآیند هم‌یافت و ... مورد بحث قرار گرفته است.

آهن اوولیتی مانند منشأ آهن، شرایط و محیط انتقال و رسوب‌گذاری آهن و همچنین دیگر عوامل مؤثر در شکل‌گیری



شکل 1. نقشه بیانگر راههای دسترسی به برشهای چینه‌شناسی مناطق ابرسج، سیمه‌کوه و ده ملا (از Ghobadi Pour et al. 2011a)

Fig. 1. Map showing the roads for access to stratigraphic sections of Abarsej, Simehkuh and Dehmola areas (Modified from Ghobadi Pour et al. 2011a)

روش مطالعه

آزمایشگاه مرکزی مجتمع مس سرچشمه کرمان انجام شد. حد آشکارسازی برای عناصر اصلی 0/1 درصد وزنی و برای عناصر جزئی 5 ppm است. نتایج تجزیه شیمیایی در جدول 2 ارائه شده است. از بین نمونه‌ها، یک نمونه، با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM) در بخش کانی‌شناسی موزه ولز در بریتانیا مورد بررسی کیفی قرار گرفت (جدول 3). داده‌های کمی تجزیه شیمیایی سنگ کل و داده‌های SEM نیز مورد پردازش قرار گرفتند و پس از تلفیق، داده‌های کیفی (کانی‌شناسی) و کمی (زمین‌شیمی) با رویکرد منشأی مورد بحث و تفسیر قرار گرفتند.

در این پژوهش، پس از انجام عملیات صحرائی و بازدید از مناطق مورد بررسی، نمونه‌برداری تصادفی از افقهای آهن اوولیتی انجام شد. نمونه‌ها، به منظور انجام بررسی کانی‌شناسی به روشهای میکروسکپی و پراش پرتو ایکس (XRD) و آنالیز شیمیایی (XRF) آماده‌سازی شدند. در این رابطه، تعداد 10 عدد مقطع نازک- صیقلی تهیه شد. 15 عدد نمونه سنگ کل مورد آنالیز پراش پرتو ایکس قرار گرفتند (جدول 1). تجزیه شیمیایی 15 عدد نمونه سنگ کل نیز به روش XRF برای اکسیدهای عناصر اصلی و به روش ICP-ES برای عناصر جزئی (V, Sc, Pb, Ni, Cu, Cr, Co, Ce, La, Y) در

جدول 1. کانی‌شناسی نمونه‌های آهن اوولیتی از مناطق ابرسج، سیمه‌کوه و ده ملا بر پایه نتایج پراش پرتو ایکس

Table 1. Mineralogy of oolitic iron samples from Abarsej, Simehkuh and Dehmola areas based on XRD results

Section area	Sample No.	XRD Mineralogy
SimehKuh	SFO-1	Hematite > Quartz > Hydroxylapatite > Chamosite > Muscovite > Montmorillonite > Geothite
	SFO-2	Calcite > Hematite > Quartz > Muscovite
	SFO-3	Hematite > Quartz > Chamosite > Montmorillonite > Muscovite
	SFO-4	Hematite > Quartz > Glauconite > Greenalite > Fluorapatite > Calcite > Muscovite > Montmorillonite
	SFO-5	Hematite > Quartz > Glauconite > Chamosite > Montmorillonite > Illite
Abarsej	AFO-1	Calcite > Hematite > Quartz > Chamosite > Muscovite
	AFO-2	Calcite > Quartz > Hematite > Clinochlore > Calcite > Anatase > Albite
	AFO-3	Calcite > Hematite > Quartz > Chamosite > Muscovite
	AFO-4	Calcite > Hematite > Quartz > Chamosite > Montmorillonite > Rutile > Muscovite
	AFO-5	Calcite > Hematite > Quartz > Albite > Illite > Chamosite
Dehmola	DFO-1	Calcite > Hematite > Quartz > Anatase > Rutile
	DFO-2	Calcite > Hematite > Quartz > Anatase
	DFO-3	Calcite > Hematite > Quartz > Anatase > Muscovite > AlO ₁₀ (OH) ₂
	DFO-4	Calcite > Hematite > Anatase > Quartz > Glauconite
	DFO-5	Calcite > Hematite > Anatase > Quartz > Muscovite

جدول 2. غلظت عناصر اصلی (درصد وزنی) و جزئی (ppm) در نمونه‌های آهن اوولیتی از مناطق ابرسج، سیمه‌کوه و ده ملا

Table 2. Concentration of major (wt.%) and trace elements (ppm) in oolitic iron samples from Abarsej, Simehkuh and Dehmola areas

Section area	Abarsej					Simeh kuh			Dehmulla			
Sample No.	AFO-1	AFO-2	AFO-3	AFO-4	AFO-5	SFO-1	SFO-2	DFO-1	DFO-2	DFO-3	DFO-4	
SiO ₂	14.42	16.67	14.2	15.21	10.75	16.81	14.66	13.09	10.85	26.47	12.5	
TiO ₂	0.62	0.56	0.54	0.57	0.45	2.18	1.73	1.48	146	2.21	1.65	
Al ₂ O ₃	10.4	10.89	10.12	10.42	8.88	13.43	11.43	11.63	10.8	14.73	11.63	
TFeO	11.21	8.85	10	11.84	10.21	25.56	41.49	25.99	23.57	48.12	23.68	
MnO	0.4	0.23	0.36	0.32	0.3	0.08	0.07	0.1	0.1	0.03	0.1	
MgO	0.88	0.96	0.83	0.96	0.82	0.64	0.53	0.62	0.6	0.7	0.62	
CaO	33.77	33.45	34.5	32.99	37.22	28.88	21.61	30.43	33.4	1.71	22.26	
Na ₂ O	0.14	0.19	0.22	0.17	0.13	-	-	0.08	-	0.27	-	
K ₂ O	1.23	1.18	1.07	1.13	0.826	2.34	1.74	1.8	1.72	2.01	1.84	
P ₂ O ₅	0.15	0.19	0.19	0.17	0.11	0.12	0.13	0.15	0.18	0.45	0.01	
Pb	11	9	12	12	12	68	28	26	43	25	27	
Cu	34	21	17	17	16	5	2	2	2	3	3	
Ni	33	42	45	53	21	109	14	14	12	15	16	
Co	9	10	9	10	7	42	10	9	11	9	9	
Cr	144	90	102	114	103	436	42	64	63	64	44	
V	148	123	150	163	93	364	162	297	286	215	162	
Sc	17.1	14.7	15.4	15.3	11.7	21.3	21.4	24.8	15	17.4	21.4	
Y	36	26	31	28	30	44	31	42	33	38	43	
La	19	14	16	15	18	37	22	29	18	21	27	
Ce	49	49	49	44	46	84	22	26	22	30	31	
Yb	4.2	3.4	4.1	4.1	3.8	7.7	4.7	5.5	5.3	5.1	5.2	

جدول 3. غلظت (درصد وزنی) عناصر اصلی با استفاده از میکروسکپ الکترون روبشی در نمونه SFO-1 از برش سیمه‌کوه

Table 3. Concentration of major elements (wt.%) using SEM in SFO-1 sample from Simehkuh section

Points	TiO ₂	Al ₂ O ₃	TFeO	MnO	CaO	K ₂ O	P ₂ O ₅	V ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃
Line Spectrum(1)	2.09	3.07	66.17	0.08	1.82	1.3	1.24	0.14	0.02
Line Spectrum(2)	2.54	2.71	69.75	0.14	1.64	1.28	0.65	0.11	0.01
Line Spectrum(3)	2.13	3.54	71.1	0.1	0.25	1.58	0.24	0.09	0.04
Line Spectrum(4)	2.63	2.86	75.17	0.14	0.14	1.1	0.16	0.11	0.04
Line Spectrum(5)	2.96	2.05	78.14	0.14	0.12	0.94	0.12	0.08	0.05
Line Spectrum(6)	3.05	1.54	81.64	0.18	0.13	0.62	0.15	0.09	0.05
Line Spectrum(7)	2.06	0.79	69.55	0.15	0.12	0.98	0.07	0.13	0.01
Line Spectrum(8)	0.72	15.03	25.93	0.14	0.65	3.97	0.32	0.01	0.03
Line Spectrum(9)	3.31	1.61	84.57	0.17	0.09	0.54	0.12	0.09	0.05
Line Spectrum(10)	2.63	3.8	78	0.1	0.13	1.48	0.17	0.1	0.02
Line Spectrum(11)	2.35	5.91	71.68	0.12	0.22	2.31	0.36	0.15	-0.01
Line Spectrum(12)	1.64	11.21	48.55	0.15	0.27	4.76	0.32	0.11	0.03
Line Spectrum(13)	3.02	4.02	76.76	0.12	0.15	1.7	0.27	0.06	0.02
Line Spectrum(14)	3.06	9.77	57.48	0.08	0.25	3.49	0.27	0.06	0.02
Line Spectrum(15)	1.11	1.69	24.99	0.05	34.56	0.63	13.91	0	0.01

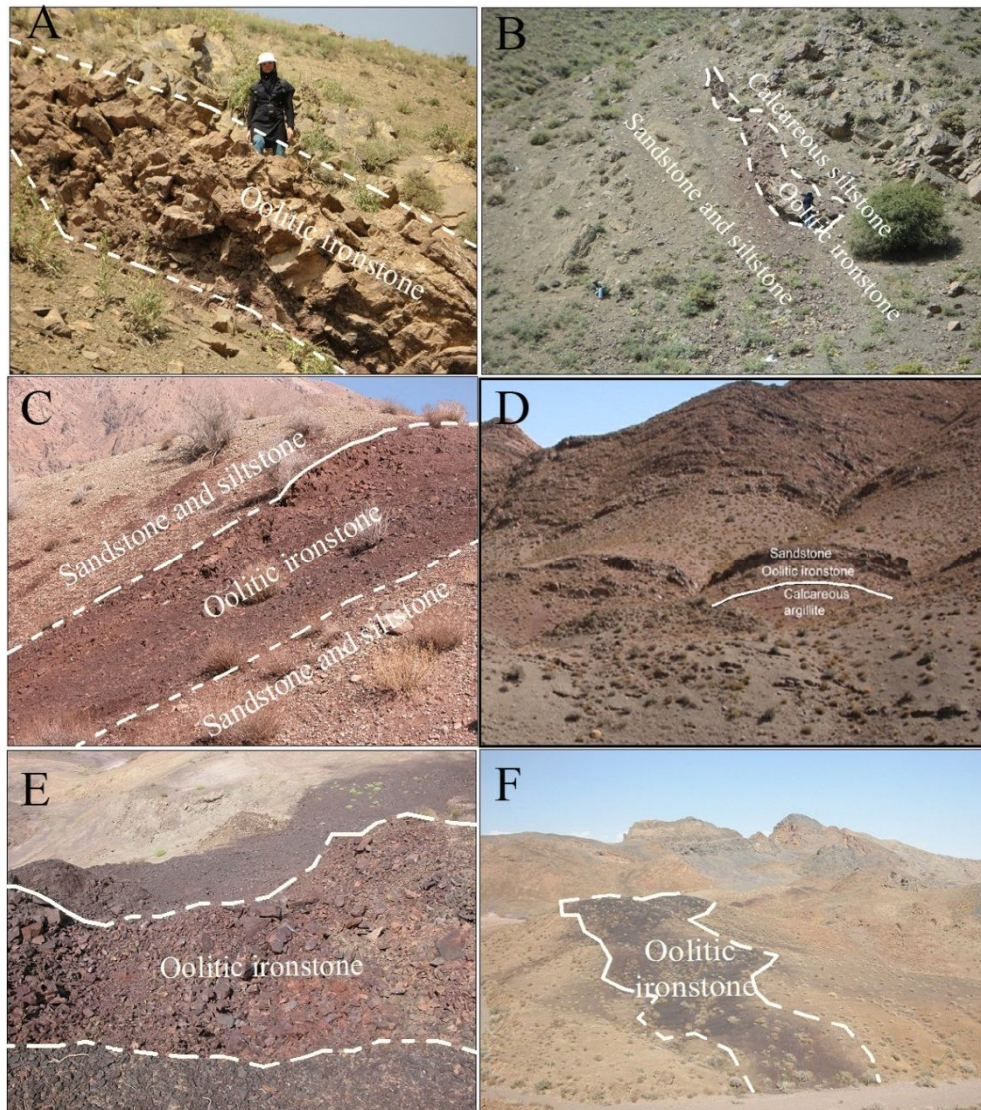
موقعیت زمین‌شناسی افق‌های دارای اووئید آهن در مناطق

مورد بررسی

در سه برش از سازند لشکرک در دامنه جنوبی البرز شرقی در نواحی شمال و جنوب غرب شاهرود (نواحی ابرسج و ده ملا) و شمال غرب دامغان (منطقه سیمه‌کوه) افق‌های دارای اووئیدهای آهن در قاعده سازند لشکرک به سن اردویسین زیرین - میانی قرار دارد. در برش ابرسج (با مختصات جغرافیایی 33° 36' شمالی و 52° 54' شرقی، 3-4 کیلومتری غرب روستای ابرسج و 20 کیلومتری شمال شاهرود)، افق‌های یادشده شامل سنگ‌های آرژیلیتی آهکی براکیوپوددار به رنگ قرمز متمایل به قهوه‌ای هستند و بر روی سیلتستون‌های سبز متمایل به خاکستری قرار گرفته‌اند (Ghobadi Pour et al., 2011b) و در بالا توسط شیل‌های زیتونی - سیلتستون پوشیده شده‌اند (Mousavi and Ashrafi, 2007) (شکل A-2 و B).

در برش ده ملا (با مختصات جغرافیایی 21° 36' شمالی و 44° 54' شرقی در شمال روستای کلات‌ملا، 15 کیلومتری جنوب غربی شاهرود)، این افق شامل سنگ‌های آرژیلیتی متمایل به قهوه‌ای فسیل‌دار است؛ که بر روی ماسه‌سنگ‌های

خاکستری فسیل‌دار قرار گرفته‌اند و در بالا توسط ماسه‌سنگ و سیلتستون سبز زیتونی بدون فسیل پوشیده شده‌اند (Ghobadi Pour et al., 2011b) (شکل C-2 و D). در برش سیمه‌کوه (با مختصات جغرافیایی 12° 36' شمالی و 13° 54' شرقی در 13 کیلومتری شمال غربی دامغان و 55 کیلومتری غرب ده ملا)، این افق شامل سنگ‌های کوارتزی قرمز تا سیاه‌رنگ است که بر روی واحد سیلتستون با طبقات نازک‌لایه آهک آرژیلیتی و در زیر سیلتستون و ماسه‌سنگ سبز تا خاکستری متمایل به قهوه‌ای تیره فسیل‌دار قرار گرفته است (Ghobadi Pour et al., 2011b) (شکل E-2 و F). ضخامت برون‌زد افق‌های دارای اوولیت آهن در منطقه ده ملا، بیشتر از مناطق ابرسج و سیمه‌کوه است (Ghobadi Pour et al., 2011a). با توجه به زمان تشکیل افق اووئید آهن‌دار در نواحی مورد بررسی که همگی مربوط به اردویسین زیرین - میانی هستند، افق مزبور یک افق هم‌زمان در البرز است و می‌تواند به‌عنوان یک لایه کلیدی در منطقه محسوب شود.



شکل 2. تصاویری از افق‌های آهن اوولیتی در سه برش چینه‌شناسی از ابرسج (A و B: دید به سمت شمال‌غرب)، ده ملا (C و D: دید به سمت شمال) و سیمه‌کوه (E و F: دید به سمت شمال‌شرق).

Fig. 2. Images of oolitic iron horizons in three stratigraphic sections from Abearsej (A-B; view to the northwest), Dehmola (C-D; view to the northward) and Simehkuh (E-F; view to the northeastward)

داده‌ها و نتایج
بررسی‌های کانی‌شناسی

مشاهدات میکروسکوپی به‌منظور شناخت ویژگی‌های بافتی این سنگ آهن‌ها نشان داد که: الف) افق‌های آرژیلیت کربناته مورد بررسی عمدتاً از اووئید تشکیل شده‌اند و پیزوئیدها بسیار کمتر حضور دارند (شکل 3-A)؛ ب) اووئیدها به‌طور کلی حدود 25 تا 65 درصد حجمی نمونه‌های مورد بررسی را به‌خود اختصاص داده‌اند و درصد حجمی باقی‌مانده سنگها از زمینه دانه‌ریز، سیمان دانه متوسط تا دانه درشت، خرده

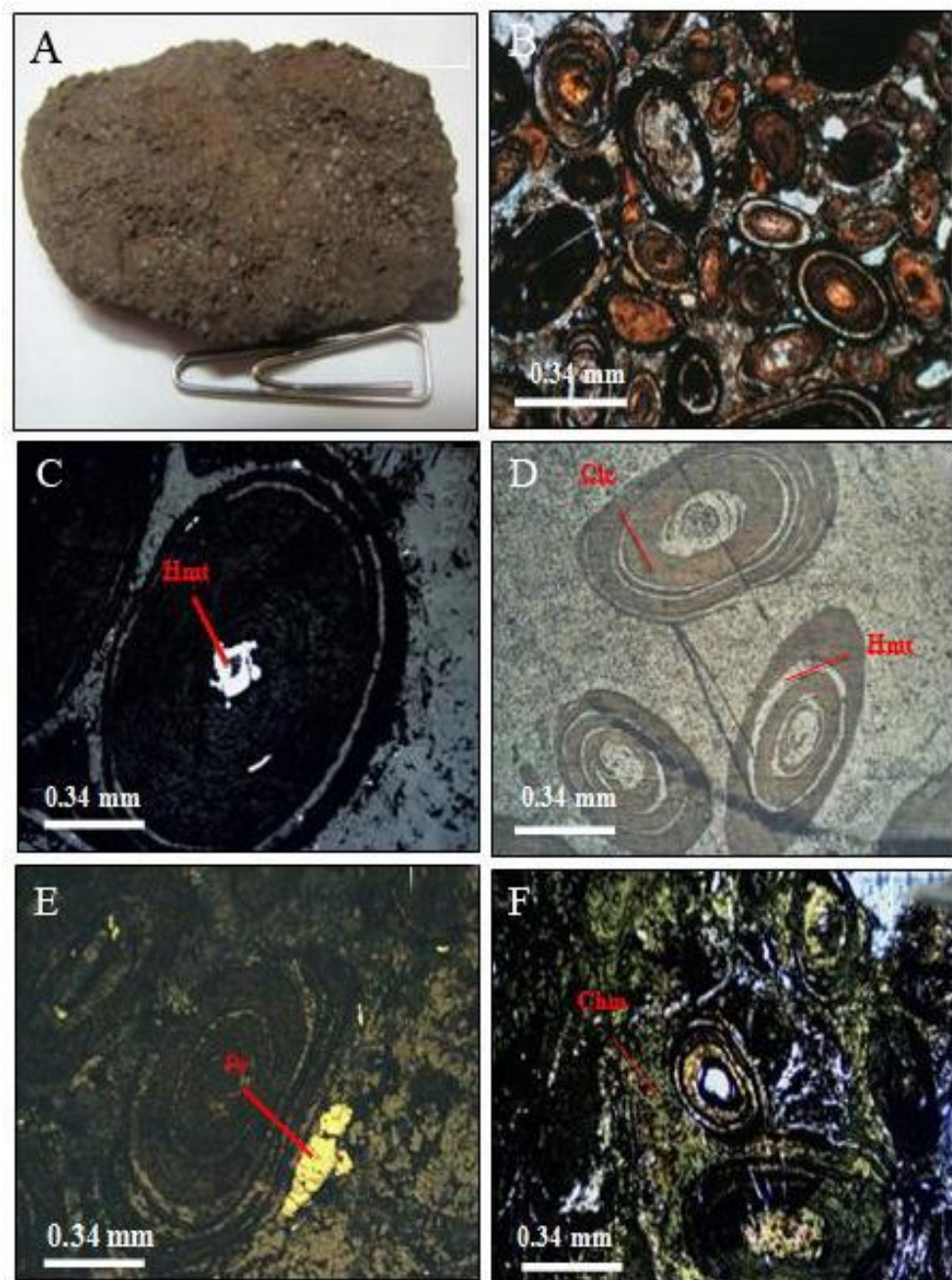
قطعات و پوسته صدفها و مقدار بسیار کمتری خرده‌سنگ و رگه‌چه‌های ثانویه تشکیل شده است؛ پ) اووئیدها عمدتاً شکل‌های بیضوی و پهن شده دارند (شکل 3-B) و تعدادی نیز دارای شکل‌های کروی و شبه کروی (با حاشیه‌های نیمه کروی) با جورشدگی خوب تا متوسط هستند؛ ت) عمده اووئیدهای بررسی شده دارای نواربندی با هسته مرکزی بودند (شکل 3-3) و تعداد کمی از اووئیدها ساده و بدون هسته‌اند؛ ث) اووئیدهای دارای نواربندی، عمدتاً نوارهای هم‌مرکز با تناوبی از نوارهای تیره و روشن با ضخامتهای متفاوت، اما با رشد

متغیر است. علت این تغییرات گسترده در غلظت آهن، ناشی از حضور غالب یا کمبود کانیهای آهن‌دار در نمونه‌هاست؛ که در نتایج حاصل از پراش پرتو ایکس و همچنین بررسیهای میکروسکوپی قابل مشاهده است. میزان CaO و SiO_2 در آرژیلیت‌های کربناته مورد بررسی به ترتیب از 2 تا 37 درصد وزنی و 11 تا حداکثر 37 درصد وزنی متغیر است، که در محدوده غلظتی سیلیکا و کلسیم سنگ‌آهنهای اوولیتی قرار می‌گیرند (شکل 5). میزان آلومینیوم در آرژیلیت‌های کربناته مورد پژوهش، تغییرات نسبتاً محدودی از میزان پایین Al_2O_3 (از 8 تا 15 درصد وزنی) را مشابه سنگهای شیلی پوسته زمین نشان می‌دهد و آرژیلیت‌های کربناته مورد بررسی، از میزان TiO_2 بالایی (از 0/45 تا حداکثر 2/21 درصد وزنی) در مقایسه با سنگهای رسوبی رایج پوسته زمین (شیل، کربنات و ماسه‌سنگ) برخوردارند که با حضور کانیهای روتیل و آناتاز در نمونه‌های مورد بررسی (جدول 1) قابل تأیید است (شکل 5). میانگین غلظت این اکسیدها در نمونه‌های مورد پژوهش، با غلظت این عناصر در سنگهای رسوبی رایج در پوسته زمین و بازالت‌ها (شکل 6) نشان داد؛ که میزان آهن (TFeO)، CaO ، Al_2O_3 ، P_2O_5 ، TiO_2 و K_2O نسبت به ماسه‌سنگها غنی‌شدگی نشان می‌دهند، درحالی‌که SiO_2 ، Na_2O و MgO تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در مقایسه با بازالتها، این نمونه‌ها از نظر میزان CaO ، TiO_2 و K_2O غنی‌شدگی و از نظر میزان Al_2O_3 ، SiO_2 ، P_2O_5 ، Na_2O و MgO تهی‌شدگی نشان می‌دهند. این نمونه‌ها در مقایسه با کربنات‌ها از نظر محتوی CaO ، Al_2O_3 ، SiO_2 ، P_2O_5 ، TiO_2 و K_2O غنی‌شدگی و از نظر محتوی CaO و MgO تهی‌شدگی نشان می‌دهند. در مقایسه با شیل‌ها نیز از نظر CaO ، TFeO ، CaO ، TiO_2 و K_2O غنی‌شدگی و از نظر Al_2O_3 ، SiO_2 ، MgO و Na_2O تهی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل 6). به‌طور کلی، غلظت بالای آهن، کلسیم، آلومینیوم، پتاسیم و تیتانیوم در نمونه‌های مورد بررسی در مقایسه با سنگهای رسوبی رایج پوسته زمین ناشی از حضور فراوان کانیهای اکسید آهن (هماتیت و گوتیت)، رسهای آهن‌دار (شاموزیت، گلاکونیت)، کلسیت و کانیهای روتیل و آناتاز در این نمونه‌هاست (جدول 1).

مقارن اطراف یک هسته مرکزی نشان می‌دهند (شکل 3-D)؛ (ج) از نظر کانی‌شناسی، کانیهای آهن‌دار، شاموزیت و همتایت کانیهای اصلی و عمده آهن تشکیل‌دهنده اووئیدها در این افقها هستند؛ گوتیت، پیریت و گلاکونیت به میزان بسیار جزئی حضور دارند (شکل‌های 3-E و 4-B) و سیدریت غایب است؛ (چ) کانی آهن‌دار اصلی این افقها در منطقه ابرسج و سیمه‌کوه بیشتر شاموزیت است؛ اما در برش ده ملا، همتایت بیشتری با شاموزیت همراه است (شکل 3-C)؛ (ح) این کانیها در زمینه‌ای بدون ساخت مشخص متشکل از شاموزیت و کلسیت ریزدانه (شکل 3-F)، تا دانه‌های درشت از کوارتز آواری، زیرکن و خرده اجزا و پوسته فسلیها شناور هستند و گاه توسط کلسیت اسپاری متوسط تا درشت‌دانه سیمانی و گاه قطع شده‌اند؛ (خ) مونت‌موریلونیت، ایلیت و آناتاز به میزان فرعی تا بسیار جزئی حضور دارند؛ (د) ترکیب غالب اووئیدهای ساده عمدتاً، شاموزیتی و کلسیتی است (شکل 4-A، B و C) که در برش ابرسج و سیمه‌کوه شناسایی شدند؛ (ذ) تعداد کمی از اووئیدهای ساده با ترکیب همتایتی به‌ویژه در برش ده ملا حضور دارند؛ (ر) اووئیدهای دارای نواربندی هم مرکز از نوارهای تیره و روشن با ترکیب متناوب همتایت-کلسیت، همتایت-گوتیت، و کلسیت-شاموزیت تشکیل شده‌اند؛ (ز) در اووئیدهای با نواربندی هم مرکز و رشد متقارن، ترکیب هسته را خرده پوسته صدفها، کلسیت، قطعات تخریبی (کوارتز آواری، سیلیکای بی‌شکل، کانی فلزی، خرده‌سنگ) تشکیل داده‌اند (شکل 4-D، E و F)؛ (ژ) برخی اووئیدها با درز و شکستگیهای پر شده از کلسیت قطع شده بودند و کلسیت گاه به داخل اووئیدها راه یافته بود (شکل 4-F و 4-E)؛ (س) بر اساس بررسی میکروسکپ الکترونی روبشی بر روی یک نمونه اووئید از برش سیمه‌کوه (SFO-1) تعدادی زیرکن به‌صورت ریز و درشت و تعدادی کوارتز تخریبی مشاهده شد (شکل 4-H و 4-G).

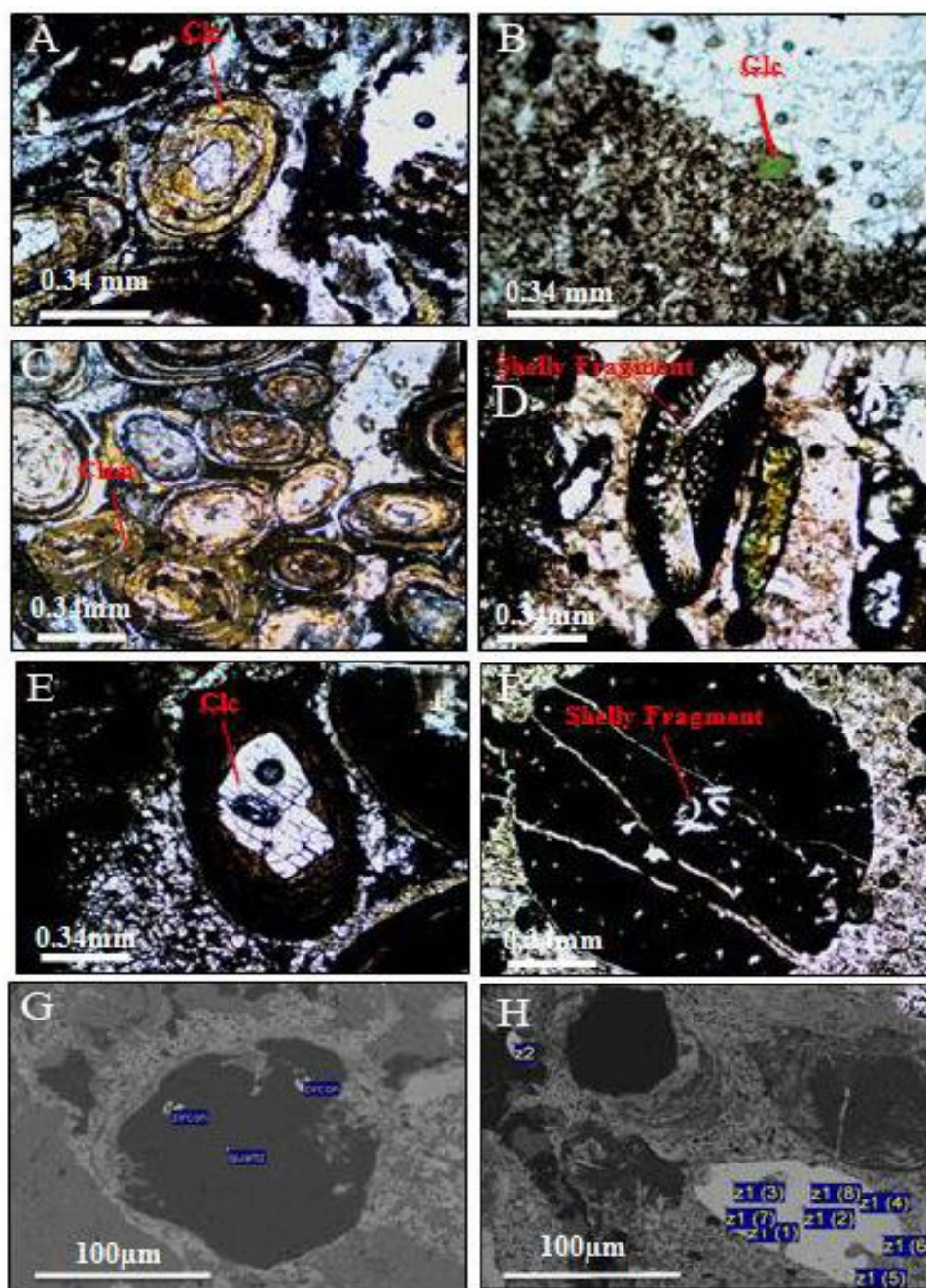
زمین‌شیمی

بر پایه بررسی غلظت اکسیدهای عناصر اصلی، عیار آهن (درصد وزنی TFeO) در نمونه‌های بیانگر افقهای آرژیلیت کربناته مورد بررسی، از حداقل 8 (منطقه ابرسج، نمونه AFO-2) تا حداکثر 48 درصد وزنی (منطقه ده ملا، نمونه DFO-3) با عیار میانگین آهن حدود 21 درصد وزنی



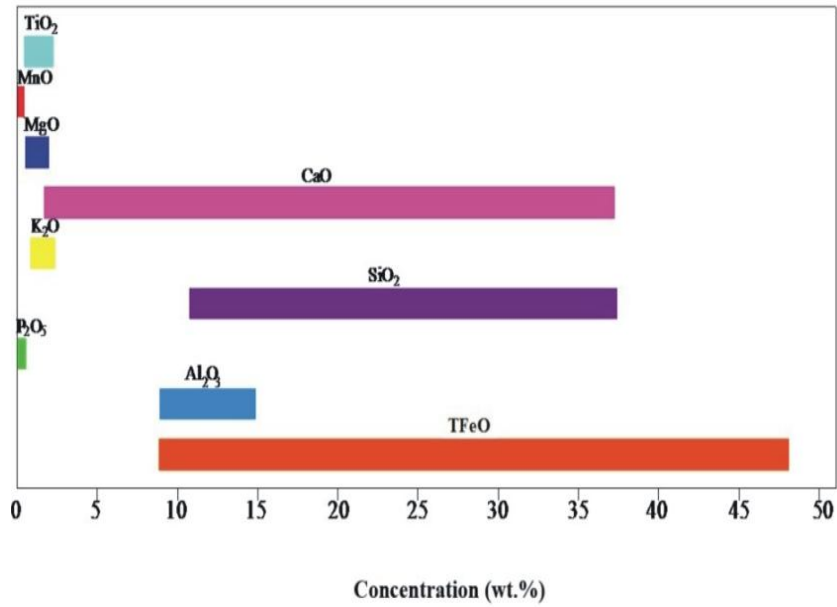
شکل 3. ویژگی‌های بافتی افق‌های اووئیدهای آهن، A: نمونه دستی سنگ آهن اووئیدی از نمونه برش ده ملا، B: اووئیدهای بیضوی و پهن‌شده از نمونه برش سیمه‌کوه (نور عبوری xpl)، C: هسته هماتیته در نمونه برش ابرسج (نور انعکاسی، ppl)، D: نواریندی با هسته مرکزی و نواریندی متحدالمرکز از نمونه برش ده ملا (نور xpl)، E: ذرات پیریت در زمینه سنگ اووئید آهن در نمونه برش ابرسج (نور انعکاسی، ppl)، F: زمینه کلسیتی و شاموزیتی در نمونه برش ده ملا (نور عبوری، xpl). علائم اختصاری کانیه‌ها: Clc= کلسیت، Hmt= هماتیت، Py= پیریت، Chm= شاموزیت

Fig. 3. Textural characteristics of oolitic iron horizons, A: Hand-specimen of oolitic ironstone from sample of Dehmola section, B: Ellipsoidal ooides of sample from Simehkuh section (Transmitted light, XPL), C: Hematitic core in sample from Abarsej section (Reflected light, PPL), D: Banding with central core and centered banding in sample from Dehmola section, E: Pyrite particles in groundmass of oolitic ironstone from samples of Abarsej section (Reflected light, PPL), F: Calcitic and shamositic groundmass in sample from Dehmola section (Transmitted light, XPL), Abbreviations for minerals: Clc= Calcite, Hmt= Hematite, Py= Pyrite, Chm=Chamosite



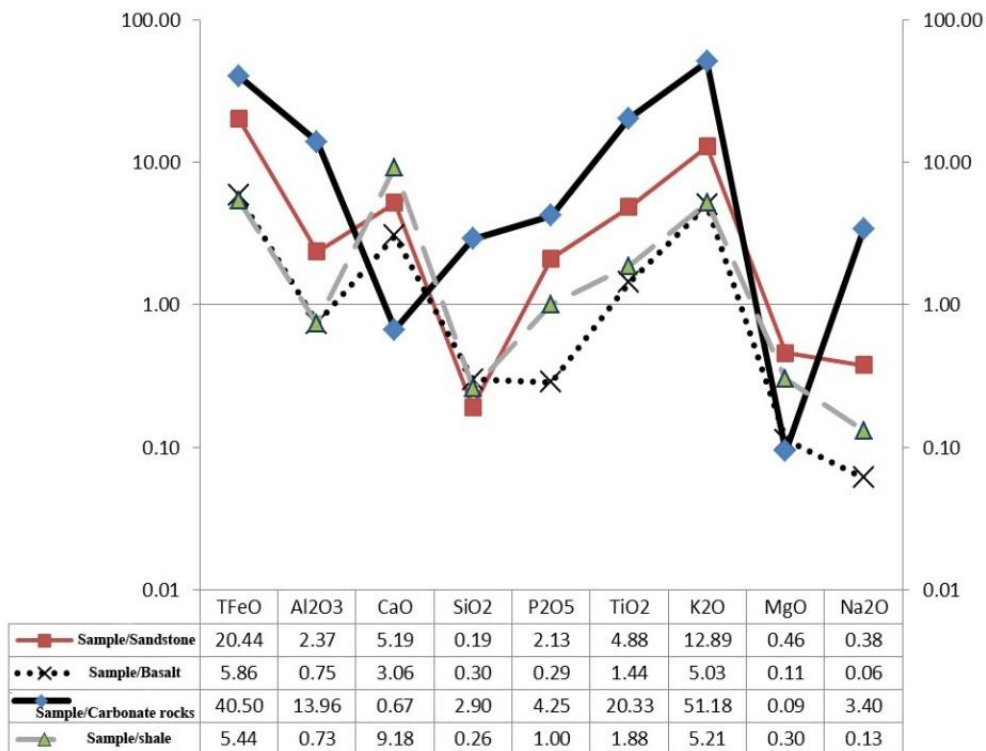
شکل 4. A: اووئید کلسیتی در نمونه برش ابرسج (نور عبوری، B: گلاکونیت در زمینه نمونه برش سیمه‌کوه (نور عبوری، ppl)، C: اووئید شاموزیتی در نمونه برش سیمه‌کوه (نور عبوری، xpl)، D, E, F: خرده‌های فسیلی و کلسیت به‌عنوان هسته اووئید هماتیتی و درز و شکستگی‌های پرشده از کلسیت که اووئید را قطع کرده‌اند. در نمونه برش ده ملا (نور عبوری، ppl)، G, H: شناسایی دانه‌های زیرکن و کوارتز تخریبی در نمونه SFO-1 از برش سیمه‌کوه با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی (SEM). علائم اختصاری کانیه‌ها: Clc = کلسیت، Glc = گلاکونیت، Chm = شاموزیت

Fig. 4. A: Calcitic oolite in sample of Abarsej section (Transmitted light, XPL), B: Glauconite in groundmass of sample from Simehkuh section (Transmitted light, PPL), C: Shamositic ooid of sample from Simehkuh section (Transmitted light, XPL), D-E-F: Fossil fragments and calcite as core of hemetitic ooid and fractures filled by calcite cutting ooid in samples from Dehmola section (Transmitted light, PPL), G-H: Recognition of zircon and detrital quartz in SFO-1 from Simehkuh section using SEM. Abbreviations for minerals: Clc= Calcite, Glc= Glauconite, Chm=Chamosite



شکل 5. دامنه غلظت عناصر اصلی در افق‌های آهن اوولیتی مناطق ابرسج، ده ملا و سیمه‌کوه

Fig. 5. Concentration range of major elements in oolitic iron horizons of Abarsej, Dehmola and Simehkuh areas



شکل 6. مقایسه میانگین نسبت غلظت عناصر اصلی در نمونه‌های اوولیت آهن از مناطق ابرسج، ده ملا و سیمه‌کوه به میانگین غلظت این عناصر در سنگ‌های رسوبی و بازالتی رایج پوسته زمین (داده‌های شیل، ماسه‌سنگ، کربنات‌ها و بازالت از Mason and Moore, 1982)

Fig. 6. Comparing the mean ratio of major elements concentrations in oolitic iron samples from Abarsej, Dehmola and Simehkuh areas with common sedimentary and basaltic rocks in earth crust (Data of shale, sandstone, carbonates and basalt derived from Mason and Moore, 1982)

شماره SFO-1) از مرکز به سمت حاشیه آن (شکل 8-A؛ نقطه‌های شماره 1 تا 15) به کار گرفته شده است. بر پایه داده‌های حاصل از تجزیه کمی اووئید از مرکز به سمت حاشیه اووئید، روند تغییرات غلظت آهن با دیگر عناصر به‌ویژه کلسیم، فسفر، آلومینیوم و پتاسیم مشابه نیست و در نقاطی که میزان آهن روند افزایشی را نشان داده است، دیگر عناصر، روند کاهشی را آشکار کرده‌اند (شکل 8-B). به‌طور کلی، میزان آهن از مرکز اووئید تا لامینه‌های میانی (نقطه شماره 7) افزایش می‌یابد؛ اما بعد از یک کاهش قابل ملاحظه در میزان آهن (نقطه شماره 8؛ 25/93 درصد وزنی) و بعد از یک افزایش چشم‌گیر ناگهانی (نقطه شماره 9؛ 84/57 درصد وزنی)، روند کاهشی را به سمت لامینه‌های بیرونی (حاشیه) طی می‌کند. در مقابل، فسفر روند بدون تغییری را از مرکز به سمت حاشیه دنبال می‌کند؛ اما در لامینه بیرونی جایی که میزان آهن افت شدیدی پیدا می‌کند (نقطه شماره 15؛ 24/99 درصد وزنی) بر میزان فسفر افزوده می‌شود که در این نقطه بیشترین مقدار فسفر (13/91 درصد وزنی) گزارش شده است. بر پایه نتایج پراش پرتو ایکس، هیدروکسی آپاتیت $[Ca_5(PO_4)_3(OH)]$ در نمونه مورد بررسی شناسایی شده است (جدول 1). میزان کلسیم نیز در بیشتر نقاط به سمت حاشیه روند کاهشی داشته، اما در لایه بیرونی که آهن، کمترین مقدار را نشان می‌دهد، بیشترین میزان کلسیم (34/56 درصد وزنی) گزارش شده است. در خصوص پتاسیم نیز مقادیر، نوسان دارد و حداکثر مقدار آن در نقطه شماره 12 (4/76 درصد وزنی) دیده می‌شود (شکل 8-B). این روندهای نامشابه بین آهن با دیگر عناصر، همبستگی منفی بین غلظت آهن لامینه‌ها با غلظت عناصر بالا را نشان می‌دهد (شکل 8-C) که می‌تواند بازتابی از تفاوت در کانی‌شناسی لامینه‌ها باشد.

بحث

ارتباط بین ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و کانی‌شناسی

تلفیق نتایج حاصل از بررسی‌های کانی‌شناسی و زمین‌شیمیایی نشان می‌دهد؛ که غلظت غیرعادی از آهن در افق‌های آرژیلیت کربناته مورد بررسی نسبت به سنگ‌های رسوبی رایج در پوسته زمین (شیل، ماسه‌سنگ و آهک) با حضور متوسط تا نسبتاً زیاد اووئیدهای آهن با ترکیب اکسیدها و رس‌های آهن‌دار (هماتیت، گوتیت و شاموزیت) در نمونه‌ها مرتبط است. بر پایه

بر اساس بررسی دامنه و میانگین غلظت عناصر جزئی (V)، (Sc، Ni، Cu، Cr، Co، Ce، La، Y، Yb) در نمونه‌های مورد بررسی در مقایسه با غلظت این عناصر در سنگ‌های رسوبی رایج و همچنین بازالت در پوسته زمین نشان داد که دامنه غلظت عناصر هم‌خانواده زمین‌شیمیایی کبالت (Co)، کروم (Cr)، نیکل (Ni)، اسکاندیوم (Sc) و وانادیوم (V) در این نمونه‌ها در مقایسه با سنگ‌های رسوبی رایج در پوسته زمین، علاوه بر این که تغییرات غلظت بسیار زیادی را منعکس می‌کند؛ غلظت غیرعادی از عناصر یادشده را در نمونه‌های مورد بررسی در مقایسه با سنگ‌های رسوبی رایج پوسته زمین نشان می‌دهد. میزان غلظت برای کبالت از 7 ppm تا 42 ppm، کروم از 42 ppm تا 436 ppm، نیکل از 12 ppm تا 109 ppm، اسکاندیوم از 11/70 ppm تا 24/80 ppm و وانادیوم از 93 ppm تا 364 ppm متغیر است که این غلظت‌ها به‌ویژه برای عناصر نیکل، کروم و وانادیوم مشابه با میزان غلظت عناصر یادشده در سنگ‌های آذرین مافیک (بازالت) و شیل‌هاست.

بر پایه غلظت آهن (TFeO)، افق‌های آهن اووئیدی مورد بررسی، به دو گروه زمین‌شیمیایی قابل گروه‌بندی هستند (شکل 7):

1) سنگ‌آهن‌های اووئیدی فقیر از آهن (برش ابرسج): در این گروه، غلظت آهن کمتر از 23 درصد وزنی است که از 8/85 تا حداکثر 11/84 درصد وزنی متغیر است، میزان منیزیوم و کلسیم در این گروه بالا و به ترتیب از 0/82 تا 0/96 درصد وزنی و 32/99 تا 37/22 درصد وزنی متغیر است و میزان TiO_2 در این گروه پایین و بین 0/45 تا 0/62 درصد وزنی متغیر است.

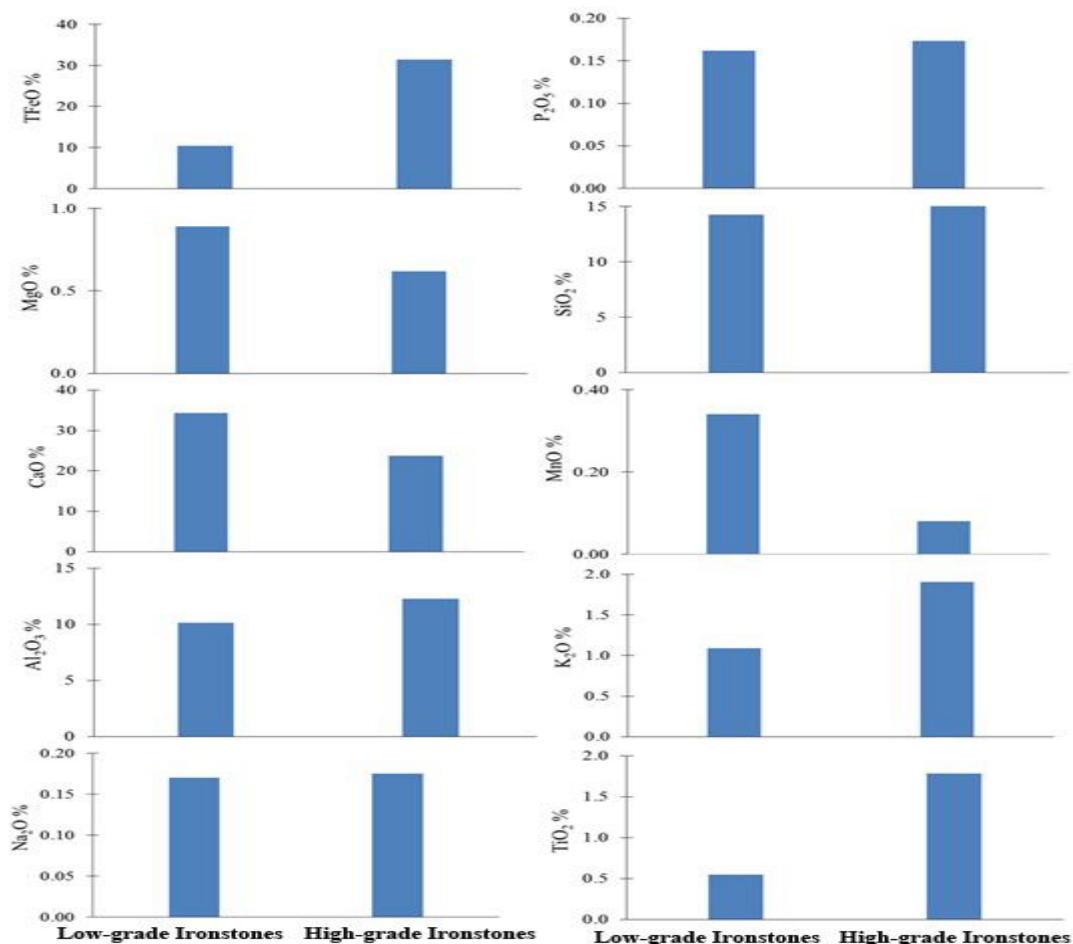
2) سنگ‌آهن‌های اووئیدی غنی از آهن (برش ده ملا و سیمه‌کوه): این گروه بیش از 23 درصد وزنی آهن دارند و حداکثر آن به 48/12 درصد وزنی می‌رسد، مقدار MgO در این گروه از 0/03 تا 0/1 درصد وزنی متغیر است؛ که نسبت به گروه فقیر از آهن، بسیار کمتر است؛ اما محتوی TiO_2 آنها از 1/46 تا 2/21 متغیر است؛ که غنی‌تر از گروه قبلی است.

بررسی میکروسکپ الکترونی روبشی

این روش، به‌منظور شناسایی ترکیب و تغییرات شیمیایی عناصر اصلی یک نمونه اووئید از برش سیمه‌کوه (در نمونه

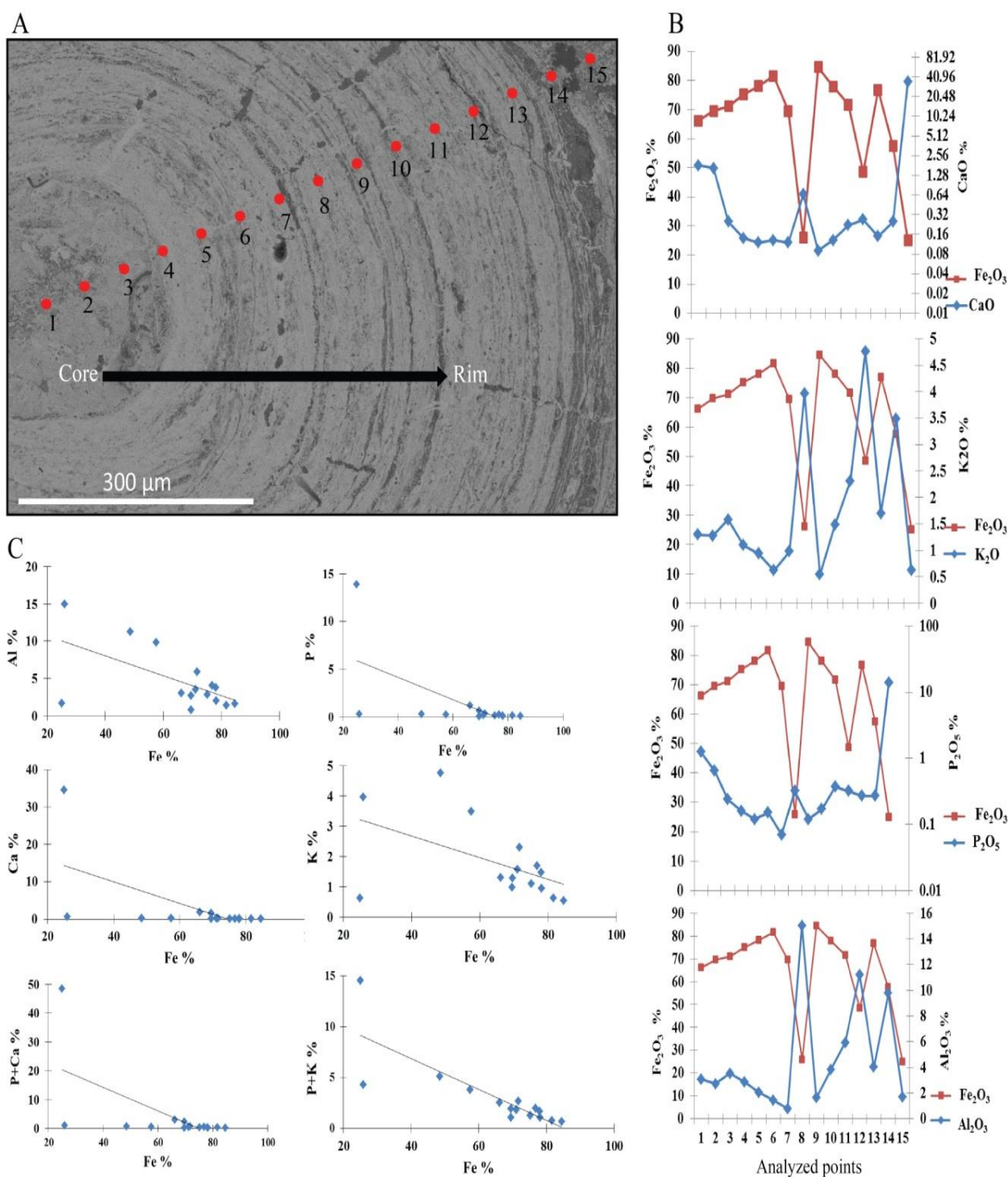
می‌تواند با حضور رسهای آهن‌دار مانند شاموزیت و کوارتز تخریبی در آنها قابل توجیه باشد. حضور فراوان کلسیت به‌عنوان تشکیل‌دهنده اووئیدها و همچنین به‌صورت سیمان بین اووئیدها در نمونه‌های مورد پژوهش، غلظت زیاد کلسیم (CaO) در افقهای آرژیلیت کربناته را باعث شده است و از این دید، افقهای مورد بررسی در گروه اولیت‌های آهن غنی از کلسیم هستند. بالا بودن میزان TiO_2 افقهای آرژیلیت کربناته در مقایسه با سنگهای رسوبی رایج پوسته زمین می‌تواند با حضور کانیه‌های روتیل و آناتاز در نمونه‌های مورد بررسی قابل توجیه باشد. همبستگی منفی بین غلظت آهن لامینه‌ها با غلظت سایر عناصر (آلومینیوم، پتاسیم، کلسیم و فسفر) بازتابی از تفاوت در کانی‌شناسی لامینه‌هاست.

غلظت آهن، منیزیوم و کلسیم، نمونه‌ها در دو گروه سنگ‌آهنهای اولیتی فقیر از آهن (منطقه ابرسج) و غنی از آهن (مناطق ده ملا و سیمه‌کوه) تقسیم‌بندی می‌شوند که گروه اول غنی از شاموزیت و کلسیت و گروه دوم غنی از هماتیت و کلسیت هستند. عیار میانگین 21 درصد وزنی آهن برای افقهای آرژیلیت کربناته مورد بررسی با حداقل عیار میانگین آهن معرفی شده برای سنگ‌آهنهای اولیتی دیگر نواحی دنیا (21/4 درصد وزنی TFeO؛ Young, 1989; Petranek and Van Houton, 1997) مطابقت دارد و بر این اساس افقهای یادشده در مجموع در گروه سنگ‌آهنهای اولیتی کم‌عیار طبقه‌بندی می‌شوند؛ که بدون ارزش اقتصادی هستند. مقدار نسبتاً بالای سیلیکا (SiO_2) و تا حدودی آلومینیوم (Al_2O_3) در افقهای آرژیلیت کربناته مورد بررسی



شکل 7. میانگین غلظت عناصر اصلی در سنگ‌آهنهای اولیتی عیار پایین و عیار بالا برای مناطق ابرسج، ده ملا و سیمه‌کوه

Fig. 7. The mean values of major elements in low-and-high-grade oolitic ironstones for Abarsej, Dehmola and Simehkuh areas



شکل 8. A: مسیر نقاط تجزیه کمی با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی در نمونه اووئیدی از برش سیمه‌کوه (SFO-1). B: مقایسه تغییرات غلظت عناصر اصلی از مرکز (نقطه 1) به سمت حاشیه در یک نمونه اووئید مورد بررسی با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی. C: ارتباط غلظت آهن با دیگر عناصر در یک نمونه اووئید مورد بررسی با استفاده از میکروسکپ الکترونی روبشی.

Fig. 8. A: Analytical point pathway by SEM in oolite sample from Simehkuh section (SFO-1 sample), B: Comparing the major elements concentrations from center (point 1) toward rim in studied oolite sample by SEM, C: Relationships between Fe values and other elements in studied oolite sample by SEM.

پیدایش

با بهره‌گیری از نتایج بررسیهای کانی‌شناسی و زمین‌شیمی افقهای آرژیلیت کربناته در این پژوهش، که ویژگیهای سنگ‌آهنهای اولیتی کم‌عیار را به نمایش گذاشته‌اند، برخی جنبه‌های پیدایشی آنها مانند منشأ آهن، شرایط و محیط انتقال و رسوب‌گذاری آهن و همچنین دیگر عوامل مؤثر در شکل‌گیری این افقها همانند تغییرات سطح آب دریا، فرآیند هم‌پافتی مورد بحث قرار گرفته است که در ادامه ارائه شده است.

منشأ آهن

برای تشکیل کانسارهای رسوبی آهن همانند کانسارهای اولیتی، به حضور آهن به میزان کافی در محیط رسوب‌گذاری نیاز است که برای این حضور منابع گوناگونی را مطرح می‌کنند:

1- مستقیماً از طریق فعالیتهای آتشفشانی زیردریایی (Sturesson et al, 2000)؛ دوره اردوئیسین در تاریخ زمین توسط فعالیت آتشفشانی گسترده اطراف اقیانوسها با میزان بالای خاکستر و دیگر مواد آتشفشانی آواری که در حوضه‌ها (به‌ویژه در اروپا) نهشته شده‌اند، مشخص می‌شود (Sturesson, 2003). این دوره زمانی منطبق بر اوج تشکیل سنگ‌آهنهای اولیتی به‌ویژه در اروپا (بخشهای شمالی گندوانا) بوده است (Young, 1989).

2- هوازدگی و فرسایش سنگهای آهن‌دار موجود در خشکی (بازالت) و حمل آن به حوضه رسوبی (Siehl and Thein, 1989)؛ فعالیتهای آتشفشانی، علاوه بر آهن باعث خروج میزان زیادی گاز CO_2 و افزایش آن در اتمسفر می‌شود و از این طریق به گرم و مرطوب شدن آن کمک می‌کند. سطح بالای CO_2 در اتمسفر طی اردوئیسین - سیلورین و ژوراسیک، به عنوان عاملی برای افزایش سرعت هوازدگی و فرسایش و در نتیجه آزاد شدن آهن از سنگهای قاره‌ای پیشنهاد شده است (Maynard, 1983).

3- تأمین بیشترین آهن مورد نیاز از آب دریای معمولی هم از خشکی (از طریق رودخانه) و هم از آبهای ژرف‌تر حوضه‌های دریایی محدود توسط جریانهای فراچاهنده (Maynard, 1983; Petranek and Van Houton, 1997).

بر پایه ستون چینه‌شناسی مناطق مورد بررسی، قدیمی‌ترین رخنمون از سنگهای بازالتی در این مناطق متعلق به سازند

غیررسمی سلطان میدان (Jenny, 1977) یا نکارمن (Sharabi, 1991) به سن اردوئیسین پایانی - سیلورین آغازین (Ghavidel-Syooki et al., 2011) است که از نظر موقعیت چینه‌شناسی بر روی سازند لشکرک به سن اردوئیسین زیرین - میانی قرار می‌گیرند. معادل سازند سلطان میدان در فاصله‌ای دورتر به سمت شرق، سازند قلی (بجنورد) است که دارای بازالت زیردریایی با ساخت بالشی، آگلومرا و مقدار کمی ماسه‌سنگ قهوه‌ای هم‌زمان با پیدایش کافت مسؤول زایش تتیس کهن (پالئوتتیس) است (Lasemi, 2000; Lasemi, 1998). بنابراین، نبود گزارش سنگهای بازالتی در زیر سازند لشکرک در مناطق مورد بررسی، مسأله‌ای است که معرفی بازالت‌های درون‌قاره‌ای را به‌عنوان سنگ مادر احتمالی افقهای اوئید آهن مورد مطالعه با مشکل مواجه می‌کند. عیار میانگین پایین آهن در این افقها، می‌تواند تأییدی بر دخالت نداشتن ماگماتیسزم بازالتی به دلیل نبود آن در این منطقه، در آن دوره زمانی در پیدایش افق آرژیلیتی واجد اوئید آهن باشد. بالا بودن میزان پتاسیم و سیلیکا در افقهای آرژیلیتی کربناته مورد بررسی همراه با حضور زیرکن، روتیل و کوارتز آواری، به‌عنوان کانیهای مقاوم در داخل اوئیدها و همچنین در زمینه این سنگها و حضور کانیهای رسی در آنها با سرچشمه گرفتن بخشی از آهن از فرسایش سنگهای قاره‌ای با غلظت معمولی آهن از خشکیهای مجاور حوضه رسوبی مطابقت دارد. شباهت غلظت عناصر فرعی در افقهای مورد بررسی به سنگهای شیلی پوسته زمین نقش این سنگها را برای تأمین آهن دریا و شکل‌گیری اولیت‌های اولیه با ترکیب شاموزیتی را با اهمیت جلوه می‌دهد (Guerrak, 1987).

جغرافیا و اقلیم دیرینه

توزیع زمانی سنگ‌آهنها در دوره‌های با اقلیم گرم و مرطوب مرتبط بوده است (Hallam, 1985). این نوع اقلیم ممکن است تأمین آهن را از خشکی از طریق هوازدگی رخنمونهای سنگی با غلظت معمولی از آهن و یا از اقیانوس، توسط جریانهای فراچاهنده از طریق بالا رفتن سطح آب دریا افزایش داده باشد (Brass et al., 1982). ارتباط بین توزیع سنگ‌آهنهای اولیتی و سطح آب دریا در حوضه‌های دریایی فانروزوئیک نشان داده است؛ که تشکیل سنگ‌آهنها مربوط به اولین و دومین بال‌آمدگی سطح آب دریای فانروزوئیک، یعنی در دوره‌های اردوئیسین - دونین و ژوراسیک - پالئوژن رخ داده

قاره‌ای با غنای نسبتاً بالا از آهن (مانند بازالت‌ها) مناسب نبوده است. در زمان اردوئیسین در بیشتر مناطق شمال و شمال شرق گندوانا (البرز و ایران مرکزی) شرایط دریایی ژرف وجود داشته است (Lasemi, 1998; Lasemi, 2000). حضور ساختمانهای رسوبی همانند و همچنين، چرخه‌های بی‌شمار توربیدیتی کامل و ناقص در این سنگها، نشان دهنده آن است که سنگهای اردوئیسین البرز شرقی عمدتاً در دریایی نسبتاً ژرف به‌وسیله جریان‌های توربیدیتی¹ و توده‌ای² در محیط بادزنهای زیردریایی³ و دشت حوضه‌ای نهشته شده‌اند (Lasemi, 1998). با این تفسیرها، به نظر می‌رسد که آرژیلیت‌های کربناته دارای اووئید آهن، اساساً در محیط آبهای ژرف و با پیش‌روی دریا و در زمانی که سطح آب دریا نسبتاً بالا بوده است، شکل گرفته‌اند (Ghobadi Pour et al., 2011b).

است (Van Houten and Bhattacharyya, 1982; Young, 1989; Van Houten and Hou, 1990; Young, 1992) و آنها معمولاً در طی فانروزوئیک در مناطق استوایی و پایین‌تر از نیمه استوایی متمرکز شده بودند (Flugel, 2010). در دوره اردوئیسین، سطح آب دریا در بخشهای اولیه هر آشکوب از این دوره در بالاترین حد خود بوده است که طی این دوره‌های زمانی سنگ‌آهنهای اوولیتی بیشترین گسترش را داشته‌اند.

گستره البرز بزرگ فعلی در دوره اردوئیسین زیرین در موقعیت زمین‌ساختی حاشیه غیرفعال شمالی گندوانا در عرضهای جغرافیایی معتدله نیم‌کره جنوبی قرار داشته است که بیانگر حاکمیت آب و هوای معتدل سرد بر این منطقه و در آن دوره است (Young, 1992; Hamdi, 1996; Lasemi, 1998; Lasemi, 2000; Stampfli and Borel, 2004; Ghobadi Pour, 2006; Popov et al., 2008). بنابراین، شرایط اقلیمی (گرم و مرطوب) برای هوازگی شدید سنگهای



شکل 9. موقعیت جغرافیایی و زمین‌ساخت دیرینه البرز (AL)، لوت (LT) و سنندج-سیرجان (SS)، به‌عنوان حاشیه غیرفعال شمالی ابرقاره گندوانا در دوره اردوئیسین زیرین (از Stampfli and Borel 2004)

Fig. 9. Paleo-geographic and Paleo-tectonics of Alborz (AL), Lut (LT) and Sanandaj-Sirjan (SS) as Northern passive margin of Gondwana supercontinent during early Ordovician (from Stampfli and Borel 2004)

اقیانوس تا محل رسوب‌گذاری آن را باعث شده است (Hallam, 1985). احتمالاً انتقال آهن توسط رودخانه‌ها تا رسوب‌گذاری آن، یکی از پرطرفدارترین نظریه‌های موجود است (Hallam, 1975). به‌دلیل اکسندگی بالای هواکره و

انتقال آهن

انطباق توزیع زمانی سنگ‌آهنها با دوره‌های آب و هوایی گرم و مرطوب، علاوه‌بر عرضه آهن، از هوازگی لاتریتی سنگهای قاره و انتقال آن توسط رودخانه تا حوضه، افزایش تأمین آهن از

1. Turbidity
2. Mass flow
3. Sub-marine fan

ماسه‌سنگ و سیلتستون حضور دارند که گویای پس‌روی بر روی افقهای اووئید آهن شکل گرفته در مناطق ژرف حوضه است.

به‌طور گزینشی، برخی از تئوری‌های مطرح شده در مورد تشکیل اووئیدهای آهن در کنسارهای آهن رسوبی به شرح زیر خلاصه شده است (Bubenicek, 1983):

1- آهنی شدن اووئیدهای آراگونیتی اولیه توسط محلولهای کانه‌زای غنی از سیلیکا و آهن در طی هم‌یافت (Cayeux, 1922; Sorby, 1957; Kimberley, 1978)

2- ته‌نشینی شیمیایی مستقیم اکسیدهای آهن اطراف یک هسته در آبهای متلاطم و تشکیل اووئیدها در نتیجه هو یافت از رشد ژل آهن‌دار اطراف برخی هسته‌های اولیه (Bichelonne and Angot, 1939; Illing, 1954; Caillere and Kraut, 1954; Carozzi, 1960; Bubenicek, 1968)

3- تشکیل اولیه و درجای اووئیدها به‌صورت کانیه‌های با محتوای کم آهن (کائولینیت، برتیرین، کلریت، شاموزیت و سیدریت) و تحول آنها به لیمونیت، گوتیت و هماتیت طی اکسایش در مرحله انتقال مجدد با ته‌نشین شدن آواری اووئیدهای اکسیده شده و همچنین تغییر کانی‌شناسی آنها به‌واسطه هم‌یافت (Illing, 1954; Bhattacharyya, 1983; Bubenicek, 1983; Van Houten and Purucker, 1984; Maynard, 1986). در همین راستا، شکل 10 الگویی است که تبدیل اووئیدهای شاموزیتی به گوتیتی و سرانجام هماتیتی و همچنین تحرک عناصر مهم را طی هم‌یافت اووئیدها نشان می‌دهد. طی هم‌یافت، اووئیدهای شاموزیتی به هماتیت تبدیل می‌شوند که به شسته شدن بسیاری از عناصر مانند سیلیسیوم، آلومینیوم، کلسیم، منیزیم و فسفر همراه با فرایندهای آب‌زدایی منجر می‌شود. میزان کلسیت ثانویه نیز کاهش پیدا می‌کند و توسط اکسیدها و اکسی هیدروکسیدهای آهن جای‌گزین می‌شود (Stureson, 1988).

با توجه به محیط رسوب‌گذاری عمیق برای افقهای آرژیلیت دارای اووئید آهن در مناطق مورد بررسی و حضور شاموزیت به همراه مونتموریلونیت و ایلیت در آنها، به‌ویژه در برش ابرسج و سیمه‌کوه، ارتباط منشأی بین تشکیل شاموزیتها از تبدیل کانیه‌های رسی در مناطق عمیق و همچنین تبدیل این شاموزیت‌های اولیه به گوتیت و سپس هماتیت طی فرآیند

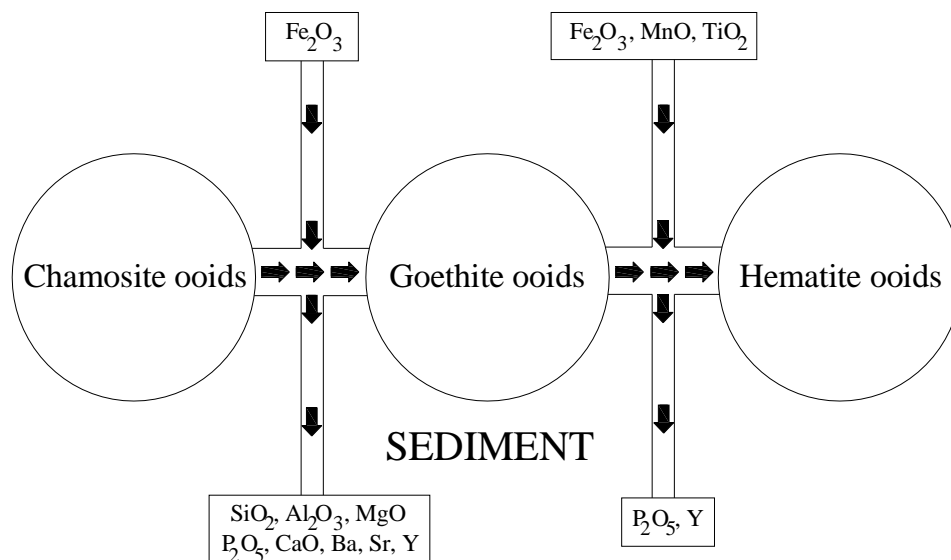
آب‌کره فانروزوئیک مقدار خیلی کمی آهن می‌تواند به‌صورت محلول واقعی حمل شود و تقریباً تمام آهن محلول در رودخانه‌ها به‌صورت مخلوطی از مواد کلوئیدی و اکسیدی حمل شده است (Boyle et al., 1977). در همین زمینه، اعتقاد بر این است که تحت شرایط اکسیدان، آهن می‌تواند به‌صورت ذرات آواری در ساختار رسها یا به حالت پوشش روی ذرات رسی (جذب سطحی کلوئیدهای رسی) نیز حمل شده باشد (Carroll, 1958; James, 1966; Young, 1989; Young, 1992; Mucke and Farshad, 2005). بالا بودن میزان پتاسیم و سیلیکا در افقهای آرژیلیتی کرناته مورد بررسی همراه با حضور زیرکن، روتیل و کوارتز آواری، به‌عنوان کانیه‌های مقاوم در داخل اووئیدها و همچنین در زمینه این سنگها و همچنین حضور کانیه‌های رسی در آنها با انتقال آهن از هوازدگی و فرسایش سنگهای شیلی از خشکیهای مجاور به‌صورت ذرات آواری و همچنین به شکل جذب سطحی به حوضه رسوبی مطابقت دارد. فراوانی شاموزیت در افقهای مورد مطالعه نقش رسها را در پیدایش این افقها با اهمیت جلوه می‌دهد.

محیط رسوبی، رسوب‌گذاری و شکل‌گیری اووئیدهای آهن

به لحاظ چینه‌شناسی، افقهای آرژیلیتی دارای اووئیدهای آهن مورد بررسی در برشهای ده ملا، سیمه‌کوه و ابرسج در انتهای توالیهای پس‌رونده فرعی داخل دوره‌های اصلی پیش‌روی یا پس‌روی واقع شده‌اند (Maynard, 1983). بررسی توالی چینه‌شناسی در دو برش سیمه‌کوه و ده ملا نشان می‌دهد که رسوب‌گذاری در این توالیها با ماسه‌سنگ و سیلتستون آغاز شده و نشان‌دهنده محیطهای نزدیک ساحلی یا فلات قاره با پایین‌ترین سطح آب دریاست (Ghobadi Pour et al., 2011a) اما در برش ابرسج، ماسه‌سنگ و سیلتستون قاعده‌ای مشاهده نشده که اگر بر اثر فرسایش از بین نرفته باشد می‌تواند بیانگر یک دوره خروج از آب و وقفه در رسوب‌گذاری باشد. به سمت بالای توالی در هر سه برش، پیش‌روی بر روی آواریهای کم ژرفا باعث رسوب‌گذاری افقهای آرژیلیتی و سیلتستونی فسیل‌دار دارای اووئید آهن شده است؛ که نشان‌دهنده ژرف‌شدگی حوضه است. در مقایسه با برش ده ملا، در توالی سیمه‌کوه بر روی افق اووئید آهن رسوبات ضخیم‌تری مربوط به بخشهای کم‌ژرفاتر حوضه مانند

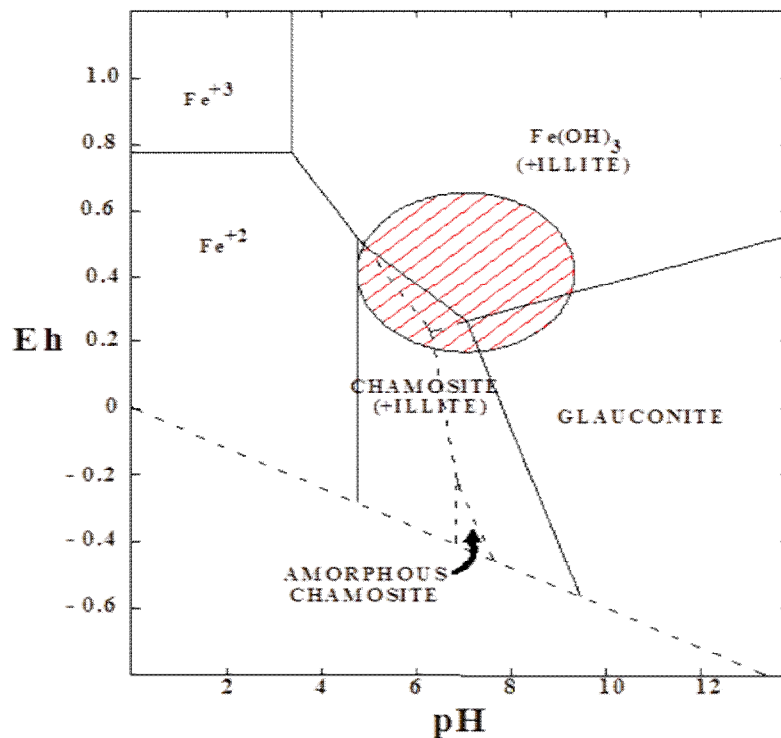
همچنین حضور اووئیدهای آهن با نواربندی متناوب و متحدالمرکز از هماتیت، شاموزیت و کلسیت، ضمن این‌که غلظت بالای ذرات معلق را در محیطهای رسوبی نشان می‌دهد بیانگر تغییرات شیمیایی محیط تشکیل آنها در طی رسوب‌گذاری اووئیدها تا مراحل سنگ‌شدگی این افقهاست و می‌تواند با کنترل عرضه سیلیکا، آلومینیوم و کلسیم به محیط تشکیل این تغییرات، کانی‌شناسی را ایجاد نماید (Maynard, 1983; Champetier et al., 1987). از شواهد قوی برای دخالت فرآیند هم‌یافت در تبدیل کانیایی اووئیدهای آهن می‌توان به رخداد فراوان از ریزشکستگیهای پرشده از کلسیت که اووئیدها را قطع کرده‌اند، تغییر شکل اووئیدها از کروی به بیضوی و همچنین حضور احتمالی کانی مختلط مگمیت-مگنتیت (Champetier et al., 1987; Dreesen, 1989) در نمونه‌های مورد بررسی اشاره کرد. علاوه‌بر این فرآیندهای اولیه، تغییر و تبدیل کانی‌شناسی اووئیدهای آهن اولیه مانند هماتیت و شاموزیت به گوتیت ثانویه در اثر فرآیند اکسیداسیون سطحی این افقها می‌تواند عامل دیگری برای تغییر ترکیب کانی‌شناسی و عیار آهن در این افقها باشد. با توجه به این تفسیرها، روشن است که تشکیل کانیهای اووئید آهن فرآیندی ساده و یک مرحله‌ای نیست؛ بلکه پدیده‌ای پیچیده و در برگیرنده فرآیندهای متعدد است.

سنگ‌شدگی در برش ده ملا محتمل است. علاوه‌بر این، رخداد معمول شاموزیت، کمبود گلاکونیت و پیریت و غیاب سیدریت در این افقها نشان می‌دهد؛ که تغییر در مؤلفه‌های کنترل‌کننده‌ای مانند Eh, pH, ژرفا و دما می‌تواند کنترل‌کننده کانی‌شناسی اووئیدهای آهن در افقهای مورد مطالعه باشد (Maynard, 1983; Maynard, 1986). با توجه به کانی‌شناسی غالب اووئیدهای آهن در مناطق مورد بررسی، محیط تشکیل افقهای آرژبلت دارای اووئید آهن در مناطق مورد بررسی، محیطی با pH بین 5 تا 9 و Eh اکسیدان متوسط - ضعیف بوده است (شکل 11). ظاهراً میزان اکسندگی محیط برای تشکیل افقهای میزبان اووئید آهن در سه برش مورد پژوهش مشابه نبوده است. عمدتاً ترکیب شاموزیتی اووئیدهای آهن در برش ابرسج و سیمه‌کوه، شرایط محیط تشکیل آنها را اکسیدان ضعیف - احيایی متوسط نشان می‌دهد، درحالی‌که در برش ده ملا به دلیل حضور هماتیت و فراوانی کمتر شاموزیت، محیط اکسیدان متوسط بوده است. به‌طور کلی، حضور هماتیت و کمبود گوتیت در اووئیدهای آهن مورد بررسی می‌تواند به فرآیند آب‌زدایی ناشی از فرآیند سنگ‌شدگی این رسوبات و تبدیل گوتیت به هماتیت مربوط باشد که به‌طور معمول، در دمای 80 درجه سانتی‌گراد رخ می‌دهد (Hodych et al., 1984). این تبدیل می‌تواند مطابق الگوی ارائه شده در شکل 10 صورت گرفته باشد.



شکل 10. تبدیل اووئیدهای شاموزیتی به هماتیتی با واسطه اووئیدهای گوتیتی از طریق تحرک عناصر در طی هم‌یافت (از Sturesson, 1988)

Fig. 10. Conversion of shamositic ooids to hematitic ones with goethite mediate via mobilization of elements during diagenesis (from Sturesson, 1988a)



شکل 11. شرایط pH و Eh تشکیل افق‌های آهن اوولیتی مناطق ابرسج، ده ملا و سیمه‌کوه (با تغییرات از Maynard, 1983; Maynard, 1986)

Fig. 11. Eh-pH conditions (hachured area) for formation of oolitic iron horizons in Abarsej, Dehmola and Simehkuh areas (modified from Maynard, 1983; Maynard, 1986)

در سیلورین به‌ویژه در آمریکا و کانادا بوده است (Mucke and Farshad, 2005). ویژگی‌های چینه‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی افق‌های آهن اوولیتی اردویسین در سازند لشکرک البرز شرقی قابل مقایسه با آهن‌های اوولیتی نوع کلینتون اما نوع کم‌عیار آن است (جدول 4). کم‌عیار بودن این افق‌ها از آهن و غنی بودن آنها از کلسیم و منیزیم که در کانی‌شناسی آنها انعکاس یافته است (کلسیت - همتایت - شاموزیت) احتمالاً به سنگ منشأ فقیر از آهن آنها در خشکی‌های مجاور مربوط می‌شود.

نتیجه‌گیری

بررسی سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی و زمین‌شیمی افق‌های آهن اوولیتی اردویسین زیرین - میانی سازند لشکرک در البرز شرقی نتایج زیر را به دنبال دارد:

1) افق‌های شامل آهن اوولیتی در برش‌های ده ملا، سیمه‌کوه و ابرسج در ترادف‌های کاملاً آواری شکل گرفته‌اند و سنگ میزبان اوولیت‌های آهن آرژیلیت کربناته و سیلتستون بوده

مقایسه افق‌های آهن اوولیتی سازند لشکرک با افق‌های آهن

اوولیتی اردویسین در جهان

اردویسین در زمان زمین‌شناسی به‌عنوان دوره‌ای مهم برای تشکیل افق‌های آهن اوولیتی بوده است؛ به‌گونه‌ای که از سراسر سرزمین‌های شمالی گندوانا و لورنتیا یعنی در اروپا (سوئد، نروژ، استونی، چک، انگلستان، اسپانیا، پرتغال)، شمال آفریقا (تونس، الجزایر، لیبی، مراکش)، آمریکای شمالی (کانادا، آمریکا) و نواحی مدیترانه (ترکیه) و شرق دور (چین شمالی) این افق‌ها گزارش شده‌اند (Maynard, 1983; Young, 1992). افق‌های سنگ آهن اوولیتی اردویسین گندوانا عمدتاً متعلق به اردویسین بالایی هستند و اردویسین زیرین (ترمادوسین) به دلیل 1- پایین‌تر بودن سطح آب دریا و 2- نبود پیش‌روی عمده نسبت به اردویسین بالایی از اهمیت بسیار کمتری برخوردار است (Maynard, 1983). از دیدگاه زمین‌شناسی اقتصادی، افق‌های آهن اوولیتی اردویسین در گروه کانسارهای آهن اوولیتی نوع کلینتون قرار می‌گیرند که از کامبرین تا دونین گزارش شده‌اند، اما اوج شکل‌گیری آنها

اوولیتی بوده است. ترادف عمودی در برشهای ابرسج و سیمه‌کوه به سمت بالا کم‌عمق شونده و پس‌رونده بوده، اما در برش ده ملا ریزشونده و پیش‌رونده بوده است.

است. افق آهن اوولیتی در برش ده ملا ضخیم‌تر از بقیه برشها بوده است.

(2) ترادف عمودی در برشهای مورد بررسی، فاقد سنگهای آتشفشانی (مافیک و فلسیک) در بالا و پایین افقهای آهن

جدول 4. خلاصه‌ای از مقایسه افقهای آهن اوولیتی سازند لشکرک با افقهای آهن اوولیتی نوع کلینتون

Table 4. Summary of comparison between oolitic iron horizons of Lashkarak and oolitic iron horizons of Clinton type

Clinton-type of oolitic iron horizons			Lashkarak Formation in Eastern Alborz (lower-middle Ordovician)	Comparative characters
Dongjeom Northern China (lower Ordovician)	Wabbana New Founland-Canada (lower Ordovician)	Clinton Appalachian-USA (Silurian)		
Sandstone	Siltstone and Sandstone	Sandstone	Carbonaceous Argillite and siltstone	Host rock composition
Detrital, Coarsing, Shallowing, Regressive upward	Detrital, Fininig, Shallowing, Transgressive upward	Detrital-Chemical, Transgressive upward	Detrital, Fining, Deepening, Transgressive-upward (Dehmola)/ Shallowing- Regressive upward (Abarsej and Dehmola)	Vertical sequence and sedimentology of sedimentary basin
Hematite>>> Goetite	Hematite>>> Goetite	Hematite>>> Goetite	Hematite>>>Goetite >>>Maghemite-Magnetite	Fe-Oxides
-	Siderite is scarce.	Siderite	Siderite is absent.	Fe-Carbonates
Glauconite-Chamosite	Chamosite	Chamosite>>> Chlorite	Chamosite>Glauconite	Fe-Silicates
-	Pyrite is scarce.	Pyrite is scarce.	Pyrite is scarce.	Fe-Sulfides
~ 40%	50% - 60%	40% - 50%	21%	% TFeO
~ 40%	50% - 60%	40% - 50%	21%	Mean TFeO %
Maynard (1983)	Sturesson (1988); Kim and Lee (2000); Sturesson et al., (2000); Sturesson (2003); Mucke and Farshad (2005)	Sturesson (1988); Kim and Lee (2000); Sturesson et al., (2000); Sturesson (2003);Mucke and Farshad (2005)	Present study	References

شاموزیت و کلسیت و گروه دوم غنی از هماتیت و کلسیت بودند.

(4) به‌طور کلی، افقهای مورد بررسی با میانگین 21 درصد وزنی آهن و غنای نسبتاً زیاد از CaO ، Al_2O_3 ، SiO_2 و TiO_2

(3) افق آهنهای اوولیتی مورد بررسی در دو گروه فقیر از آهن (برش ابرسج با غلظت آهن کمتر از 23 درصد وزنی) و نسبتاً غنی از آهن (برشهای ده ملا و سیمه‌کوه با غلظت آهن بین 23 تا 48 درصد وزنی) قابل تفکیک بودند. گروه اول غنی از

8) افقهای آهن اوولیتی اردویسین در سازند لشکرک البرز شرقی قابل مقایسه با آهنهای اوولیتی نوع کلینتون اما نوع کم‌عیار آن هستند. احتمالاً کم‌عیار بودن این افقها از آهن و غنی‌بودن آنها از کلسیم و منیزیم (کلسیت - همتیت - شاموزیت) به سنگ منشأ فقیر از آهن آنها در خشکیهای مجاور مربوط می‌شود.

قدردانی

این پژوهش، دست‌آورد پایان‌نامه کارشناسی ارشد زمین‌شناسی اقتصادی نویسنده اول مقاله است که با حمایت مالی دانشگاه گلستان، گرگان، انجام شد. نویسندگان مقاله از مجتمع مس سرچشمه کرمان برای آنالیز شیمیایی نمونه‌ها، مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران برای آنالیز XRD و همچنین از سرکار خانم دکتر قبادی‌پور برای هماهنگی انجام آنالیز میکروسکپ الکترونی روبشی در موزه ولز در بریتانیا صمیمانه سپاس‌گزاری می‌کنند. در نهایت، از سردبیر و داوران محترم مجله زمین‌شناسی اقتصادی که با ارائه نظرها و پیشنهادهای سازنده به ارتقاء کیفیت این مقاله کمک کردند، قدردانی می‌شود.

در گروه آهنهای اوولیتی کم‌عیار و بدون ارزش اقتصادی طبقه‌بندی شده‌اند.

5) از نظر کانی‌شناسی، همتیت و شاموزیت کانیهای آهن‌دار اصلی اووئیدها بوده و گوتیت و گلاکونیت در مقادیر بسیار جزئی شناسایی شدند. سیدریت مشاهده نشد و کلسیت به‌عنوان فراوانترین کانی غیرآهنی، این کانیها را به‌صورت اووئید کلسیتی، نوار کلسیتی، سیمان کلسیتی، هسته کلسیتی و همچنین رگه‌های ثانویه همراهی کرده است.

6) بالا بودن میزان پتاسیم و سیلیکا در افقهای مورد بررسی، حضور زیرکن و کوارتز آواری به‌عنوان کانیهای مقاوم در داخل اووئیدها و همچنین در زمینه این سنگها و حضور کانیهای رسی به‌عنوان شواهدی برای تأمین آهن به‌صورت ذرات آواری همراه با رسها یا به حالت پوشش روی ذرات رسی (جذب سطحی کلونیدهای رسی) از هوازدگی و فرسایش سنگهای شیلی از خشکیهای مجاور به دریا در نظر گرفته شده است.

7) فراوان بودن همتیت و کمبود گوتیت در اووئیدهای آهن، افقهای مورد پژوهش همراه با رخداد فراوان رگه‌چه‌های کلسیتی قطع‌کننده اووئیدها، اووئیدهای متراکم و بیضی شکل به فرآیند سنگ‌شدگی این رسوبات و تبدیل شاموزیت و گوتیت اولیه به همتیت ربط داده شده است.

References

- Ahmadzadeh Heravi, M., Yazdi, M. and Karimi, L., 2000. Preliminary analysis of Late Devonian conodonts from Khush-Yeilagh Formation (Mighan Section) Eastern Alborz, Iran. In: P. Cockle, G.A. Wilson, M.J. Engelbrestsen, A. Simpson and T. Winchester-Setto (Editors), Paleontology Down Under 2000, Kinross Wolaroi, Orange. Geological Society of Australia, Abstract Number 61, pp. 41.
- Bhattacharyya, D.P., 1983. Origin of berthierite in ironstones. *Clays and Clay Minerals*, 31(2): 173-182.
- Bichelon, J. and Angot, P., 1939. Le Bassin Ferrifere Lorrain. Berger-Levrault, Paris, 464 pp.
- Boyle, E.A., Edmond, J.M. and Sholkovitz, E.R., 1977. The mechanism of iron removal in estuaries. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 41(10): 1313-1324.
- Brass, G.W., Saltzman, E., Sloan, J.L., Southam, J.R., Hay, W.W., Holser, W.T. and Peterson, W.H., 1982. Ocean circulation, plate tectonics, and climate. *Climate in Earth History*, Washington National Academic Science Press, pp. 83-89.
- Bubenicek, L., 1968. Geologie des minerals de feroolithiques. *Mineralium Deposita*, 3(1): 89-108.
- Bubenicek, L., 1983. Diagenesis of iron-rich rocks. In: H. Larsen (Editor), *Diagenesis in Sediments and Sedimentary Rocks*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam, pp. 495-511.
- Caillere, S. and Kraut, F., 1954. Les gisements de fer du bassin lorrain. *Memorial Museum National History, Paris, Section. C*, 4(1).
- Carozzi, A.V., 1960. *Microscopic sedimentary petrography*. John Wiley & Sons, New York, 485 pp.
- Carroll, D., 1958. Role of clay minerals in the transportation of iron. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 14: 1 - 27.

- Cayeux, L., 1922. Les minerals de feroolithique de France. Imprimerie Nationale, Paris, 1052 pp.
- Champetier, Y., Hamdadou, E. and Hamdadou, M., 1987. Examples of biogenic support of mineralization in two oolitic iron ores-lorraine (France) and GaraDjebilet (Algeria). *Sedimentary Geology*, 51(3): 249-255.
- Dreesen, R., 1989. Oolitic ironstones as event stratigraphical marker beds within the Upper Devonian of the ArdennoRhenish Massif. In: T.P. Yong and W.E.G. Taylor (Editors), *Phanerozoic ironstones*. Geological Society of London, Special Publication, 46: 6578.
- Flügel, E., 2010. *Microfacies of Carbonate Rocks*. Springer, Berlin Heidelberg, 976 pp.
- Ghavidel-Syooki, M., Hassanzadeh, J. and Vecoli, M., 2011. Palynology and isotope geochronology of the Upper Ordovician-Silurian Successions (Ghelli and SoltanMaidan Formation) in the Khoshyeilagh area, eastern Alborz Range, northern Iran: stratigraphic and palaeogeographic implication. *Review of Palaeobotany and Palynology*, 164(3): 251-271.
- Ghobadi Pour, M., 2006. Early Ordovician (Tremadocian) Trilobites from Simeh-Kuh, Eastern Alborz, Iran. In: M.G. Basset and V.K. Deisler (Editors), *Studies in Palaeozoic palaeontology*. National Museum of Wales, *Geological Series* 25(2): 93-118.
- Ghobadi Pour, M., Mohibullah, M., Williams, M., Popov, L.E. and Tolmacheva, T.Yu., 2011a. New early ostracods from the Ordovician (Tremadocian) of Iran: Systematic, biogeographical and palaeoecological significance. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 35(4): 517-529.
- Ghobadi Pour, M., Popov, L.E., Kebriaee-Zadeh, M.R. and Baars C.H., 2011b. Middle Ordovician (Darriwilian) Brachiopods associated with the Neseuretus bio-facies, Eastern Alborz Mountains, Iran. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 42(3): 263-283.
- Guerrak, S., 1987. Metallogenesis of cratonic oolitic ironstone deposits in the Bledet Mass, Azzel Matti, Ahnetand Mouydir basins, Central Sahara, Algeria. *Geological Rundsch*, 76(8): 903-922.
- Hallam, A., 1975. *Jurassic Environments*. Cambridge University Press, Cambridge, 269 pp.
- Hallam, A., 1985. A review of Mesozoic climates. *Journal of Geological Society, London*, 142(3): 433-445.
- Hamdi, B., 1996. Precambrian-Cambrian sedimentary rocks in Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 353 pp.
- Hodych, J.P., Patzold, R.R. and Buchan, K.L., 1984. Paleomagnetic dating of the transformation of oolitic goethite to hematite in iron ore. *Canadian Journal of Earth Science*, 21(1):127-130.
- Hosseini-Nezhad S.M., 2000. Biological events in famenin stones of Meyghan area in eastern Alborz. 23th Symposium of Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Hosseini-Nezhad, S.M., Yazdi, M. and Torabi, Gh., 2007. Geochemical Characteristics of Famennian Strata in Iran (Meyghan Section) and Morocco (Bou and Mrakib Sections). *Geological Survey of Iran, Scientific Quarterly Journal of Earth Sciences*, 62(1): 63-69.
- Illing, L.V., 1954. Bahaman calcareous sands. *American Association of Petroleum, Geological Bulletin*, 38: 1-95.
- James, H.L., 1966. Chemistry of the Iron Rich Sedimentary Rocks. In: M. Fleischer (Editor), *Data of Geochemistry*. US Geological Survey, Professional Paper, 61 pp.
- Jenny, J.G., 1977. *Geologie, stratigraphi de l'Elburz oriental enter Aliabad et Shahrood, Iran*. Ph.D. Thesis, Geneve University, Geneve, Switzerland, 320 pp.
- Khanebad, M., Ashouri, A., Ghaderi, A. and Gharaee, M.H., 2007. Ooidal ironstones and their stratigraphical position in the Shishtu Formation, Howz-e-Dorah area, South East of Tabas. 11th Congress of the Geological Society, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran (in Persian with English abstract).
- Kimberley, M.M., 1978. Paleo-environmental classification of iron formations. *Economic Geology*, 73: 215-229.
- Kim, Y. and Lee, Y.I., 2000. Ironstones and green marine clays in the Dongjeom Formation (Early Ordovician) of Korea. *Sedimentary Geology*, 130(1): 65-80.
- Lasemi, Y., 1998. Sedimentary environments of Iran Ordovician rocks (Sequences simultaneously with Rift) and form a divergent margin Paleotethys. 17th Symposium of

- Geosciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Lasemi, Y., 2000. Facies analysis, Upper Precambrian and Paleozoic sedimentary environments and sequence stratigraphy of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran, 180 pp (in Persian).
- Mason, B. and Moore, C.B., 1982. Principles of geochemistry. John Wiley & Sons, New York, 343 pp.
- Maynard, J.B., 1983. Geochemistry of sedimentary ore deposits. Springer-Verlag, New York, 382 pp.
- Maynard, J.B., 1986. Geochemistry of oolitic iron ores, an electron microprobe study. *Economic Geology*, 81(8): 1473-1483.
- Mousavi, M.J. and Ashrafi, E., 2007. Lithostratigraphy, sedimentary structures and sedimentary environment of Abarsej Formation in north of Shahroud. 3th Iranian Conference of Applied Geology and Environment, Azad University, Islamshahr branch, Tehran, Iran (in Persian with English abstract).
- Mucke, A.T. and Farshad, F., 2005. Whole-rock and mineralogical composition of Phanerozoic ooidal ironstones: Comparison and differentiation of types and subtypes. *Ore Geology Reviews*, 26(2): 227-262.
- Petranek, J. and Van Houten, F.B., 1997. Phanerozoic ooidal ironstone. *Czech Geological Survey, Special Papers 7*: 70 pp.
- Popov, L.E., Ghobadi Pour, M. and Hosseini, M., 2008. Early to Middle Ordovician lingulate brachiopods from the Lashkarak Formation, Eastern Alborz Mountains, Iran. *Alcheringa: An Australasian Journal of Palaeontology*, 32(1): 1-35.
- Sharabi, M., 1991. Geologic map of Gorgan, scale 1:250000. Geological Survey of Iran.
- Siehl, A. and Thein, J., 1989. Minette type ironstones. In: T.P. Young and W.E.G. Taylor (Editors), *Phanerozoic Ironstones*. Geological Society of London, Special Publication, 46(2): 175-193.
- Sorby, H.C., 1957. On the origin of the Cleveland Hill ironstone. *Geological and Polytechnic Society, West Riding of Yorkshire Proceedings*, 3(4): 457-461.
- Stampfli, G.M. and Borel, G., 2004. [http://GIS Europe.brgm.fr/Tethyan.html](http://GIS.Europe.brgm.fr/Tethyan.html)
- Stocklin, J., Eftekharnjad, J. and Hushmand-zadeh, A., 1965. Geology of the Shotori Range (Tabasarea, East Iran). Geological Survey of Iran, Tehran, Report 3, 69 pp.
- Sturesson, U., 1988. Chemical composition of Lower Ordovician ooids from northern Oland, Sweden, and their sedimentary host matrix. *Geologiska Foreningens i Stockholm Forhandlingar*, 110(1): 29-38.
- Sturesson, U., 2003. Lower Palaeozoic iron oolites and volcanism from a Baltoscandian perspective. *Sedimentary Geology*, 159(2): 241-256.
- Sturesson, U., Heikoop, J.M. and Risk, M.J., 2000. Modern and Palaeozoic iron ooids: a similar volcanic origin. *Sedimentary Geology*, 136(1): 137-146.
- Taylor, K.G., 1992. Non-marine oolitic ironstones in the lower cretaceous Wealden sediments of southeast England. *Geological Magazine*, 129(4): 349-358.
- Van Houten, F. and Purucker, M.E., 1984. Glauconitic peloids and chamosite ooids: favourable factors, constraints, and problems. *Earth-Science Reviews*, 20 (2): 211-243.
- Van Houten, F.B. and Bhattacharyya, D.P., 1982. Phanerozoic oolitic ironstones; Geological record and facies model. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 10(4): 441-457.
- Van Houten, F.B. and Hou, H.F., 1990. Stratigraphic and palaeogeographic distribution of Palaeozoic oolitic ironstones. In: W.S. McKerrow and C.R. Scotese (Editors), *Palaeozoic Palaeogeography and Biogeography*. *Journal of Geological Society*, London, 12: 87-93.
- Yang, T.P. and Taylor, E.G., 1989. Phanerozoic Ironstone. Geological Society of London, Special Publication 46(1): 1-251.
- Young, T.P., 1989. Eustatically controlled ooidal ironstone deposition: facies relationships of the Ordovician open-shelf ironstones of Western Europe. In: T.P. Young and W.E.G. Taylor (Editors), *Phanerozoic Ironstones*. Geological Society of London, Special Publication, 46(1): 51-64.
- Young, T.P., 1992. Ooidal ironstones from Ordovician Gondwana: a review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology and Palaeoecology*, 99(3): 321-347.



Petrography, Geochemistry and Proposed Genesis of Ordovician Oolitic Iron Formation Members of the Lashkarak Formation, Eastern Alborz

Mansoor Maghsoudloo Mahalli and Behnam Shafiei Bafti*

Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

Submitted: Oct. 29, 2013

Accepted: Mar. 11, 2015

Keywords: Oolitic iron, Hematite-Chamosite, Transgressive, Lashkarak Formation, Eastern Alborz

Introduction

Oolitic iron formations are sedimentary rocks with >5 vol.% oolites and >15 wt.% iron, corresponding to 21.4 wt.% Fe₂O₃ (Young, 1989; Petranek and Van Houten, 1997; Mucke and Farshad, 2005). In Iran, new iron oolite-bearing members have been identified in the Lashkarak Formation (lower-middle Ordovician) in the Abarsej, Dehmola and Simehkuh sections, eastern Alborz (Ghobadi Pour et al., 2011). At present, the mineralogy and geochemistry of these members are not known. Consequently, research reported here was conducted to reveal the mineralogical and geochemical characteristics of Ordovician oolitic iron formation members and to discuss their genesis and economic importance.

Materials and Analyses

Field geology and sampling was carried out to collect 25 samples from the oolitic iron formation members in the Abarsej, Dehmola and Simehkuh section in eastern Alborz. Samples were prepared for polished-thin sections (n=10), XRD analysis (n=15). Whole-rock chemical analysis (n=15) by XRF for major elements and by ICP-ES for trace elements was performed by laboratories at the SarCheshmeh copper mine complex, Kerman, Iran. One sample was analyzed by SEM at the Wales Museum, UK.

Results

Microscopic studies show that the oolitic iron formation members are hosted by carbonate argillite rocks. They are mainly composed of oolites rather than pisoliths (small bodies somewhat larger and more irregular than oolites),

whereas oolites have mainly ellipsoidal forms and locally spherical shapes. Most (6) oolites show banding with a central core. Simple oolites without a core are scarce. Mineralogically, oolites are mainly chamositic and hematitic in composition; goethite, pyrite and glauconite occur in traces and siderite is absent. Quartz, calcite and zircon are accessory minerals which are present in the groundmass. Geochemically, TFeO % of the oolitic iron formation horizons ranges from 8 to 48 % with an average of 21%. The CaO content ranges from 2 to 37% and SiO₂ from 11 to 37 %. Based on TFeO % content, oolitic iron formation horizons are divided into two geochemical groups: 1: Low-grade iron formations (the Abarsej section) (8) with TFeO < 23%, high MgO (0.82-0.96 %) and high CaO (32.99-37.22 %) and low TiO₂ (0.45-0.62 %), and 2: High-grade iron formations (the Dehmola and Simehkuh sections) with 23% < TFeO < 48%, low MgO (0.03-0.1 %) and high TiO₂ (1.46-2.21 %).

Discussion

Mineralogical characteristics combined with geochemical data show that anomalous values of Fe in studied carbonate argillite formations with respect to common sedimentary rocks are related to the abundance of iron-bearing oolites as oxides such as hematite and goethite, and the clay mineral chamosite. Based on Fe, Mg and Ca concentrations, oolitic iron formations can be divided into low-grade and high-grade iron formations. The former is characterized by chamosite and calcite, whereas the latter consists of hematite and calcite. This research, along with available paleo-geographic and sedimentological information suggests that the iron for the

*Corresponding authors Email: behnam.shafiei@gmail.com

formation of iron oolites was available from normal sea water and Fe could be carried as clastic particles along with clays or coating of clay particles derived from weathering and erosion of shales from adjacent land. High contents of K and Si in oolitic iron horizons, the presence of detrital zircon, quartz and clay minerals within oolites and also in the matrix of these rocks confirm the proposed model and show the important role of Fe-bearing clay minerals in the genesis of the primary chamositic oolites in an environment with pH=5-9 and medium-weak redox conditions (Maynard, 1983; Maynard, 1986). The abundance of hematite relative to goethite in the Fe-oolites, dense and elliptical oolites as well as the frequent occurrence of calcite veinlets cutting oolite beds has been attributed to diagenetic processes and the modification of chamosite and goethite to hematite. Our findings indicate that the studied members can be classified as low-grade oolitic iron formation (average 21 wt.% Fe) which do not have economic importance at present.

Acknowledgements

This study is part of the senior author's M.Sc thesis at Golestan University, Gorgan, Iran. Logistical and financial support was provided by the Research Grant to senior author. We are grateful to SarCheshmeh Copper Complex for XRF analyses and IMPERC for XRD measurements. We gratefully acknowledge Dr.

Ghobadipour for SEM analysis in National Museum of Wales, Great Britain.

References

- Ghobadi Pour, M., Popov, L.E., Kebriaee-Zadeh, M.R. and Baars C.H., 2011. Middle Ordovician (Darriwilian) Brachiopods associated with the Neseuretus bio-facies, Eastern Alborz Mountains, Iran. *Memoirs of the Association of Australasian Palaeontologists*, 42(3): 263-283.
- Maynard, J.B., 1983. *Geochemistry of sedimentary ore deposits*. Springer-Verlag, New York, 382 pp.
- Maynard, J.B., 1986. Geochemistry of oolitic iron ores, an electron microprobe study. *Economic Geology*, 81(8): 1473-1483.
- Mucke, A.T. and Farshad, F., 2005. Whole-rock and mineralogical composition of Phanerozoic ooidal ironstones: Comparison and differentiation of types and subtypes. *Ore Geology Reviews*, 26(2): 227-262.
- Petranek, J. and Van Houton, F.B., 1997. Phanerozoic ooidal ironstone. *Czech Geological Survey, Special Papers 7*: 70 pp.
- Young, T.P., 1989. Eustatically controlled ooidal ironstone deposition: facies relationships of the Ordovician open-shelf ironstones of Western Europe. In: T.P. Young and W.E.G. Taylor (Editors), *Phanerozoic Ironstones*. Geological Society of London, Special Publication, 46(1): 51-64.