

ارزیابی شرایط ترمودینامیکی (P-T) تشکیل شیست‌های متاپلیتی جندق (شمال شرق استان اصفهان)

سید محسن طباطبایی منش* و مرتضی شریفی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

سنگ‌های متاپلیتی جندق بر مبنای مجموعه‌های کانیاپی در چهار دسته کوارتز-مسکوویت-شیست، کوارتز-مسکوویت-بیوتیت-شیست، گارنت-مسکوویت-کلریت-شیست و گارنت-مسکوویت-استروتید-شیست قرار می‌گیرند. گارنت-مسکوویت-کلریت شیست‌های جندق، ظهور اولین دانه‌های گارنت را به نمایش می‌گذارند که اساساً از ۵۸ تا ۷۶٪ آلماندین، ۱ تا ۱۸٪ اسپسارتین و از ۸ تا ۲۰٪ گروسولار تشکیل شده‌اند. برش‌های بلورهای منطقه‌ای از گارنت‌های موجود در متاپلیتی‌های جندق، نشان‌دهنده افزایش میزان منیزیم این کانی‌ها از مرکز به حاشیه است که دال بر تشکیل آن‌ها در طی دگرگونی پیش‌رونده و سپس سرد شدن سریع و عدم تأثیر دگرگونی‌های بعدی بر روی آن‌هاست. ظهور استروتید در گارنت-مسکوویت-استروتید-شیست‌ها نشانه شروع رخساره آمفیبولیت بوده، نبود ساخت منطقه‌ای در استروتید موجود در این شیست‌ها، نشانه رشد و تشکیل این کانی در سیکل دگرگونی پیش‌رونده با خطوط هم درجه پهن مقیاس است. مطالعه ترموبارومتر نشان‌دهنده آن است که متاپلیت‌های جندق در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد و در محدوده فشاری ۲ تا ۶/۵ کیلوبار تشکیل شده‌اند. این نتایج با شواهد پاراژنتیکی کانی‌ها کاملاً هماهنگ بوده، حاکی از دگرگون شدن رسوبات پلیتی جندق در مرز رخساره شیست سبز-آمفیبولیت است.

واژه‌های کلیدی: آمفیبولیت، متاپلیت‌های جندق، مرز رخساره شیست سبز - آمفیبولیت، مسیر دگرگونی

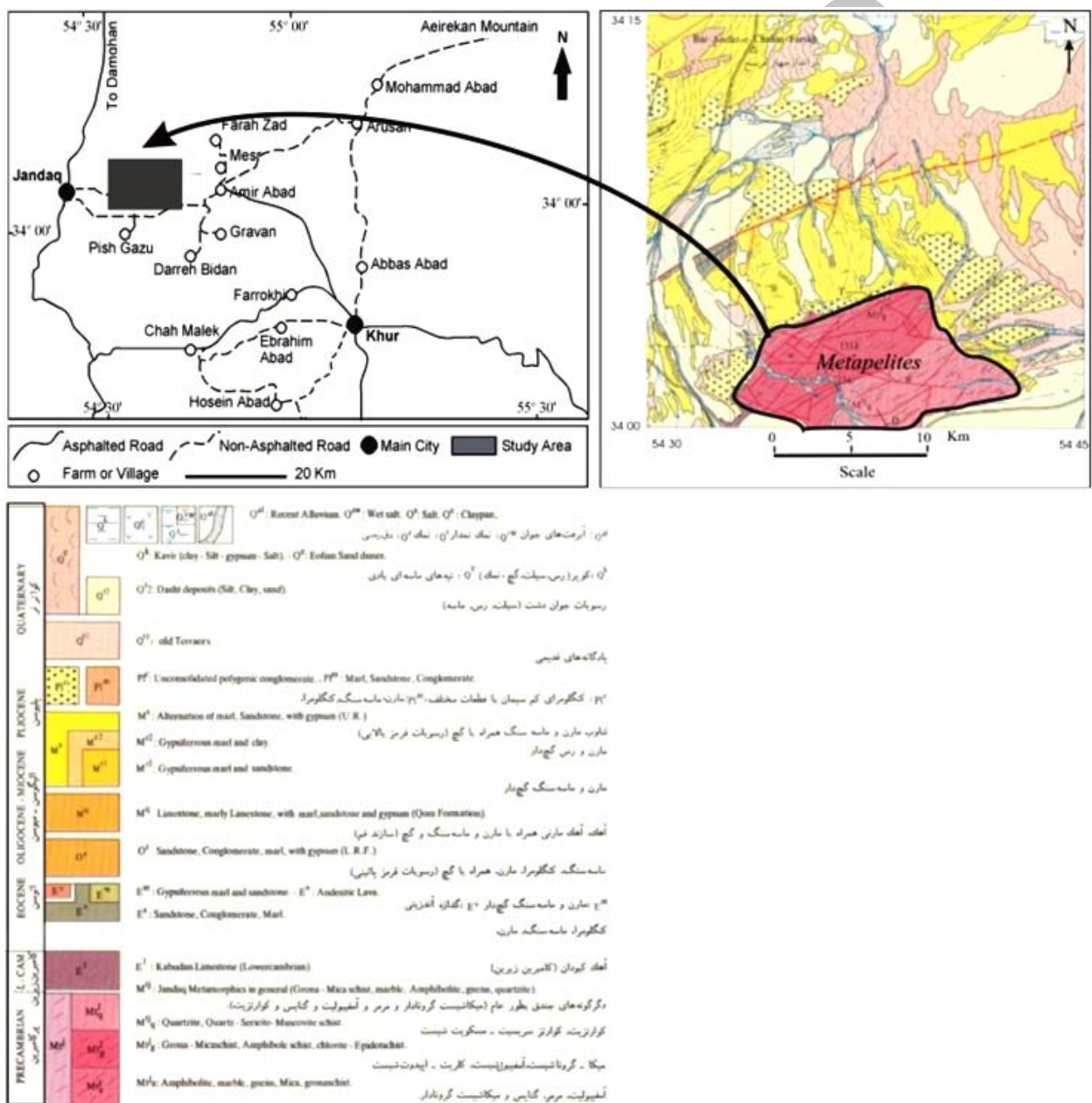
مقدمه

لحاظ زون‌های رسوبی ساختاری در ایران مرکزی قرار گرفته است (نبوی، ۱۳۵۵). متاپلیت‌ها از شناخته شده ترین خانواده سنگ‌های دگرگونی جندق به سن پروتروزویک فوقانی تا پالئوزویک زیرین (Romanko *et al.*, 1984) هستند. کانی‌های شاخص موجود در این

ناحیه جندق در شمال شرق استان اصفهان، یکی از مکان‌های طبیعی بسیار جالب برای مطالعه سرزمین‌های دگرگون شده است. این منطقه بخش اعظمی از نواحی جنوبی فرورفتگی دشت کویر نمک را احاطه نموده و از

بر روی ناحیه انارک - خور - جندق را انجام دادند (Romanko *et al.*, 1984) که در سال ۱۹۸۴ منتشر شد. از دیگر کارهای انجام گرفته در این ناحیه می‌توان به پایان‌نامه کارشناسی‌ارشد هاتف (۱۳۷۴) با عنوان «زمین‌شناسی و پتروولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگونی منطقه خور - جندق (ایران مرکزی)» اشاره نمود (هاتف، ۱۳۷۴).

سنگ‌ها توزیع منظمی را نشان می‌دهند که می‌تواند با شدت دگرگونی مرتبط باشد. پژوهشگران مختلفی که در رابطه با زمین‌شناسی ایران مرکزی کار کرده‌اند، از جمله Stahl (۱۸۹۷)، Ganser (۱۹۵۵)، Baier (۱۹۴۰) و Stockin (۱۹۶۸)، از ناحیه جندق نام برده‌اند. در سال ۱۹۷۵ پژوهشگران روسی در قالب قرارداد Technoexport مطالعات اولیه



شکل ۱- نقشه راه‌های ارتباطی و موقعیت قرارگیری متاپلیت‌ها در نقشه زمین‌شناسی جندق (Technoexport, 1979)

روش انجام پژوهش

آنالیز نقطه‌ای نمونه‌های مورد نظر این تحقیق توسط الکترون مایکروپروب Cameca در مرکز تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران (جدول ۱) و آنالیز کل سنگ به روش ICP-MS در آزمایشگاه Amdel در استرالیا انجام شد (جدول ۲). همچنین، مجموع‌های از روش‌های متداول پترولوژیک مانند خصوصیات بافتی و ساختی، آنالیزهای پاراژنتیک، منطقه‌بندی کانی‌های همجوار بر اساس برش‌های بلورهای منطقه‌ای و نهایتاً محاسبات ژئوترموبارومتری استفاده شد. در این مطالعه توجه اصلی به مجموعه Grt, Bt, Chl, Ms و St معطوف شد که در حضور Qtz و H₂O به عنوان مجموعه کانیایی حساس به تغییر شرایط دگرگونی است.

علایم اختصاری مورد استفاده در متن عبارتند از: گارنت (Grt)، بیوتیت (Bt)، آلکالی‌فلدسپار (Kfs)، کردیریت (Crd)، مسکوویت (Ms)، کلریت (Chl)،

پلاژیوکلاز (Pl)، کوارتز (Qtz)، استروئید (St)، محلول جامد کانی‌ها: (Bt_{Fe}-Bt_{Mg})، (Grt_{Mg}-Grt_{Fe})، (St_{Fe}-St_{Mg})، فشار (P^{Kbar/bar})، دما (T^{K/C}).

$$X_i^{Ms} = i / (Fe + Mg + AlVI), i = Fe, Mg, AlVI$$

$$X_j^{Bt} = j / (Fe + Mg + AlVI + Ti), j = Fe, Mg, AlVI, Ti$$

$$X_k^{Grt} = k / (Fe + Mg + Ca + Mn), k = Fe, Mg, Ca, Mn$$

$$N_i = 100 * X_i$$

جدول ۱- آنالیز سنگ کل دو نمونه از شیست‌های متاپلیتی جندق

Sample No.	JM5D	B-17207/2*
SiO ₂	61.55	60.45
TiO ₂	1.01	0.89
Al ₂ O ₃	19.28	21.76
FeO	9.51	7.72
MnO	0.11	0.10
MgO	1.04	2.42
CaO	1.37	1.00
Na ₂ O	2.49	0.87
K ₂ O	3.42	4.59
P ₂ O ₅	0.05	0.20
Total	99.84	100.00

* From Technoexport (1979)

جدول ۲- آنالیز نقطه‌ای تعدادی از کانی‌های موجود در متاپلیت‌ها

Mineral	Grt					Grt					
	Spot	1	2	3	4	5	1	2	3	4	5
SiO ₂	38.534	38.363	38.867	38.653	38.113	38.14	38.23	37.88	37.74	38.30	38.38
TiO ₂	0.11	0.08	0.09	0.08	0.14	0.08	0.07	0.04	0.09	0.14	0.11
Al ₂ O ₃	20.88	20.71	21.10	20.55	20.91	21.53	20.78	21.07	21.05	21.07	21.12
Cr ₂ O ₃	0.00	0.03	0.00	0.00	0.04	0.05	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00
FeO	25.96	24.63	28.50	32.31	32.92	31.36	31.50	33.80	32.21	31.82	30.78
MnO	6.12	7.32	2.65	0.35	0.37	0.29	0.27	0.00	0.31	0.48	0.17
MgO	0.84	0.96	1.50	1.71	2.70	1.81	1.67	4.07	1.64	1.66	2.67
CaO	6.45	6.74	6.72	5.16	4.19	6.99	7.23	2.97	7.21	7.25	7.18
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Cation ratios calculated per 12 oxygens						Cation ratios calculated per 12 oxygens					
Si	3.10	3.09	3.10	3.11	3.05	3.03	3.06	3.02	3.02	3.04	3.03
Al	1.98	1.97	1.98	1.95	1.97	2.01	1.96	1.98	1.98	1.97	1.96
AlIV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
AlVI	1.98	1.97	1.98	1.95	1.97	2.01	1.96	1.98	1.98	1.97	1.96
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ti	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	1.75	1.66	1.90	2.17	2.20	2.08	2.11	2.25	2.15	2.11	2.03
Mn	0.42	0.50	0.18	0.02	0.03	0.02	0.02	0.00	0.02	0.03	0.01
Mg	0.10	0.11	0.18	0.20	0.32	0.21	0.20	0.48	0.19	0.20	0.34
Ca	0.56	0.58	0.57	0.45	0.36	0.59	0.62	0.25	0.62	0.62	0.61
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
XMg	0.04	0.05	0.08	0.09	0.13	0.09	0.09	0.18	0.08	0.08	0.14
XCa	0.20	0.20	0.20	0.16	0.12	0.20	0.21	0.08	0.21	0.21	0.20
Alm	0.62	0.58	0.67	0.76	0.76	0.72	0.72	0.75	0.72	0.71	0.68
Sps	0.15	0.18	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.00
Prp	0.04	0.04	0.06	0.07	0.11	0.07	0.07	0.16	0.07	0.07	0.11
Grs	0.20	0.20	0.20	0.16	0.12	0.20	0.21	0.08	0.21	0.21	0.20

جدول ۲- ادامه.

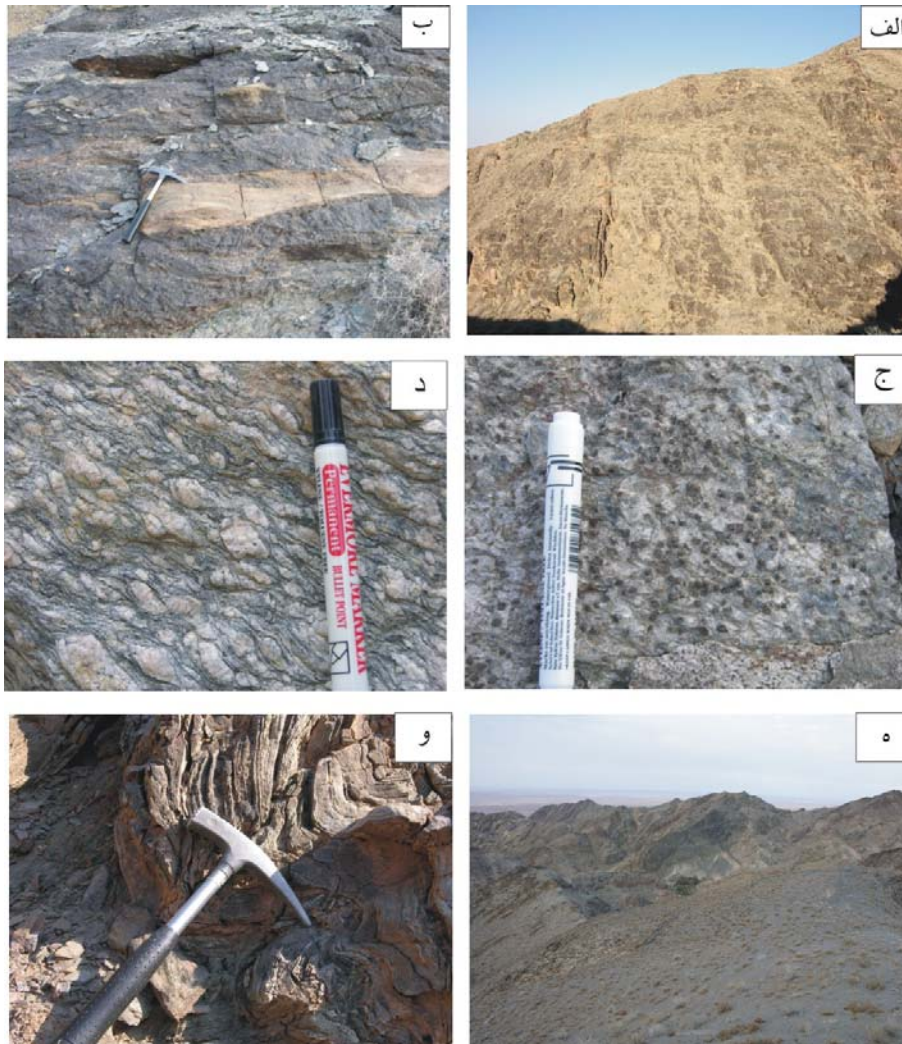
Mineral	Sample- Mjc11						Sample-JM5d					
	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	Ms	
Spot	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	
SiO ₂	47.85	47.08	47.74	48.89	47.89	47.49	48.37	48.55	47.04	48.85	48.17	
TiO ₂	0.30	0.43	0.25	0.22	0.35	0.34	0.40	0.38	0.20	0.23	0.04	
Al ₂ O ₃	33.96	34.83	33.00	32.58	35.00	35.10	34.98	34.88	33.86	33.94	33.44	
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
FeO	1.72	1.50	1.91	2.83	1.30	1.40	1.09	1.10	1.74	1.81	2.62	
MnO	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.03	0.00	0.04	0.00	0.01	0.00	
MgO	1.13	0.86	1.15	1.09	0.70	0.81	0.93	0.90	0.80	0.97	0.95	
CaO	0.15	0.03	0.04	0.00	0.00	0.04	0.03	0.00	0.10	0.14	0.01	
Na ₂ O	1.34	0.88	0.72	0.68	0.90	0.87	0.74	0.68	0.43	0.77	0.35	
K ₂ O	9.46	8.82	9.21	9.88	8.70	9.00	8.48	7.99	9.55	10.52	9.80	
Cation ratios calculated per 11 oxygens						Cation ratios calculated per 11 oxygens						
Si	3.16	3.14	3.20	3.17	3.15	3.14	3.17	3.19	3.16	3.13	3.20	
Al	2.64	2.72	2.61	2.60	2.73	2.73	2.71	2.70	2.68	2.68	2.62	
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ti	0.01	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.00	
Fe ²⁺	0.09	0.08	0.11	0.16	0.07	0.08	0.06	0.06	0.10	0.09	0.15	
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Mg	0.11	0.09	0.12	0.11	0.07	0.08	0.09	0.09	0.08	0.10	0.09	
Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
Ca	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	
Na	0.17	0.11	0.09	0.09	0.12	0.11	0.09	0.09	0.06	0.10	0.05	
K	0.80	0.75	0.79	0.85	0.73	0.78	0.71	0.67	0.82	0.90	0.83	
Total	6.99	6.91	6.92	6.99	6.89	6.92	6.86	6.82	6.92	7.02	6.93	
XMg	0.54	0.50	0.52	0.41	0.49	0.51	0.60	0.59	0.45	0.52	0.39	

Mineral	Sample- JM5d						Mineral	Sample- Mjc11				
	St	St	St	St	St	St		Bt	Bt	Bt	Bt	Bt
Spot	1	2	3	4	5	6	Spot	1	2	3	4	5
SiO ₂	29.01	28.69	28.55	28.57	28.71	28.39	SiO ₂	34.85	35.20	35.93	35.04	34.97
TiO ₂	0.63	0.53	0.59	0.60	0.79	1.53	TiO ₂	1.49	1.53	1.60	1.45	1.54
Al ₂ O ₃	53.84	52.87	54.32	53.49	53.70	53.12	Al ₂ O ₃	17.47	17.53	17.50	17.05	17.85
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr ₂ O ₃	0.03	0.00	0.04	0.01	0.11
FeO	12.46	12.22	12.55	12.18	12.28	11.31	FeO	20.72	20.96	20.47	22.68	21.74
MnO	0.00	0.08	0.11	0.07	0.00	0.04	MnO	0.12	0.10	0.10	0.07	0.08
MgO	0.93	0.90	0.86	0.86	0.24	0.81	MgO	9.85	9.78	9.53	8.88	8.95
CaO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	CaO	0.31	0.04	0.17	0.11	0.08
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Na ₂ O	0.16	0.23	0.21	0.21	0.21
K ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	K ₂ O	9.56	8.97	9.33	9.16	9.26
Cation ratios calculated per 46 oxygens						Cation ratios calculated per 22 oxygens						
Si	7.99	8.03	7.87	7.95	7.98	7.91	Si	5.42	5.46	5.53	5.47	5.43
Al	17.47	17.44	17.54	17.55	17.59	17.45	Al	3.20	3.20	3.17	3.14	3.27
Cr	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Cr	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01
Ti	0.13	0.11	0.12	0.13	0.16	0.32	Ti	0.17	0.18	0.19	0.17	0.18
Fe ²⁺	2.87	2.86	2.89	2.84	2.85	2.64	Fe ²⁺	2.69	2.72	2.63	2.96	2.82
Mn	0.00	0.02	0.02	0.02	0.00	0.01	Mn	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01
Mg	0.38	0.38	0.35	0.35	0.10	0.33	Mg	2.28	2.26	2.18	2.07	2.07
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Ba	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Zn	0.32	0.30	0.28	0.30	0.36	0.37	Ca	0.05	0.01	0.03	0.02	0.01
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	Na	0.05	0.07	0.06	0.06	0.06
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	K	1.90	1.77	1.83	1.82	1.83
XMg	0.12	0.12	0.11	0.11	0.03	0.11	XMg	0.46	0.45	0.45	0.41	0.42

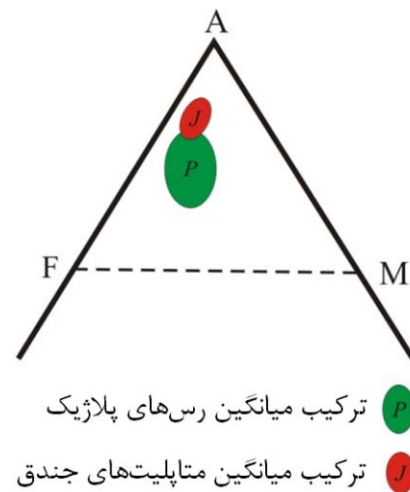
پتروگرافی و شیمی کانی ها

بافت‌های لپیدوبلاستی، پورفیروبلاستی، لپیدوپورفیروبلاستی و لپیدوپورفیروبلاستی است. ترکیب سنگ کل در سنگ‌های متاپلیتی جندق بر روی دیگرام AFM در محدوده شیل‌های پلاژیک قرار می‌گیرد که به‌طور نسبی از Al و Fe نسبت به شیل‌های پلاتفرمی غنی و از Ca تهی است (شکل ۳).

مجموعه سنگ‌های دگرگونی منطقه جندق به ترتیب عبارتند از: پریدوتیت‌های سرپانتینیتی شده، میلونیت گرانیت، آمفیبولیت، مرمر و تناوبی از انواع شیست‌ها به همراه کوارتزیت و مرمر (شکل ۲). از خصوصیات کلی برای شیست‌های متاپلیتی جندق وجود



شکل ۲- نمایی از انواع سنگ‌های دگرگونی جندق. الف) پریدوتیت‌های سرپانتینیته شده در منطقه معدن تالک جندق، ب) تناوب شیست و مرمر در مزرعه صفاهو، ج) گارنت میکاشیست‌ها در منطقه چاه زرد، د) میلونیت گرانیت در مزرعه صفاهو، ه) نمایی از گارنت میکاشیست‌ها (جلو تصویر) و آمفیبولیت‌ها (بخش‌های تیره) در منطقه چاه زرد، و) چین‌خوردگی در شیست‌های مزرعه صفاهو.

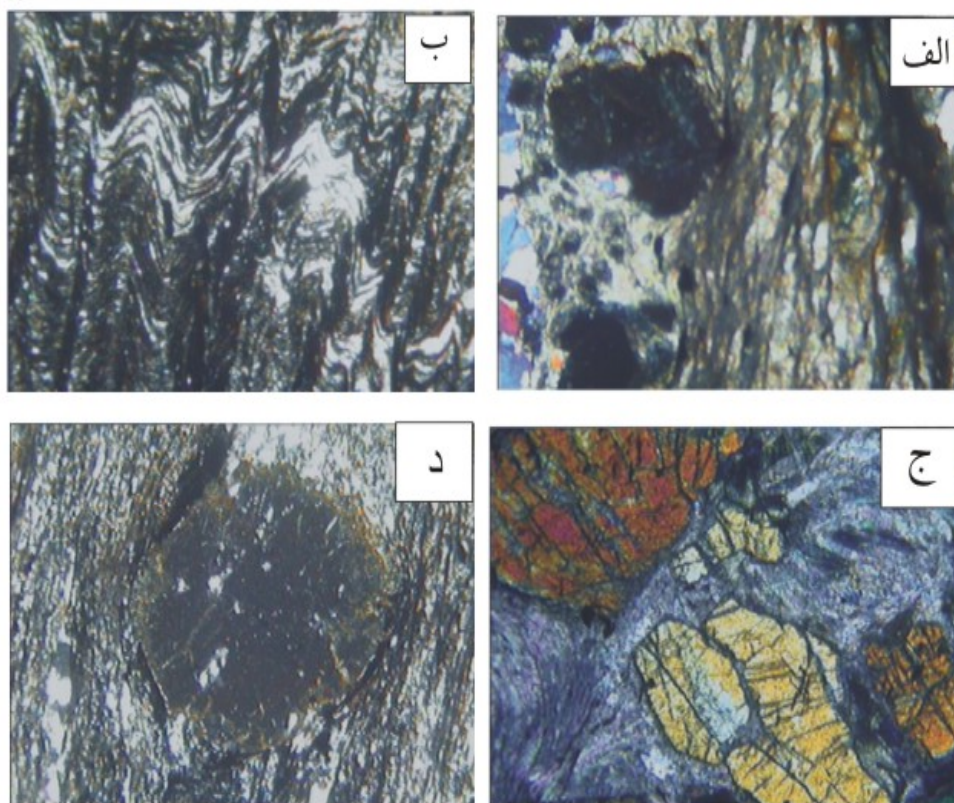


شکل ۳- نمایش ترکیب سنگ کل در متاپلیت‌های جندق که در دیاگرام AFM در محدوده فوقانی رس‌های پلاژیک قرار می‌گیرد (به نقل از Bucher و همکاران، ۲۰۰۲).

۰/۱ تا ۲ میلی‌متر بیش از ۹۵٪ این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند. X_{Mg}^{Ms} در این سنگ‌ها بین ۰/۴۹ تا ۰/۵۹ در نوسان است. بیوتیت، کلریت و اکسید آهن از کانی‌های فرعی هستند. گاهی در این سنگ‌ها مسکوویت‌هایی دیده می‌شود که به شکل ادخال در کانی‌های کدر قرار گرفته‌اند. کرینولیشن‌های بسیار ظریف در این سنگ‌ها از دیگر مشخصات فابریکی آن‌هاست (شکل ۴).

سنگ‌های متاپلیتی جندق در چهار دسته به شرح زیر قرار می‌گیرند که عبارتند از:

(الف) کوارتز مسکوویت شیست‌ها (Qtz+Ms+Kfs+Pl): این دسته از سنگ‌ها دارای مواد آلی فراوان بوده و بافت‌های لپیدوبلاستی بسیار شاخصی از خود نشان می‌دهند. دانه‌های ریز کوارتز با حاشیه صاف و اندازه متوسط ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر و مسکوویت‌های ورق‌های جهت یافته با اندازه متوسط

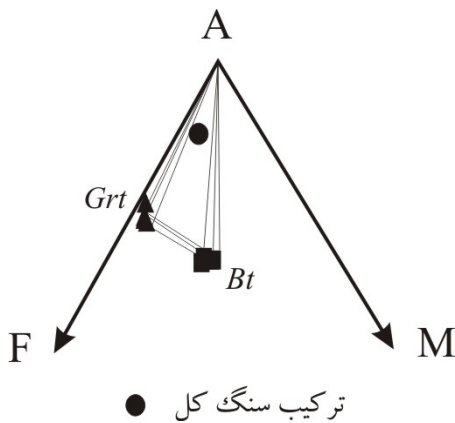


شکل ۴- نمایی از انواع سنگ‌های دگرگونی جندق. الف) گارنت مسکوویت شیست، ب) کوارتز مسکوویت شیست با کرینولیشن‌های بسیار ظریف، ج) گارنت مسکوویت استروتید شیست، د) گارنت مسکوویت کلریت شیست (همه تصاویر در نور XPL و بزرگنمایی ۴۰× تهیه شده‌اند).

۴). بافت‌های لپیدوبلاستی بسیار شاخص از مشخصات بافتی آن‌هاست. دانه‌های کوارتز با حاشیه صاف و اندازه متوسط ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر و مسکوویت و بیوتیت‌های ورق‌های جهت یافته با اندازه متوسط ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر کانی‌های اصلی این سنگ‌ها را تشکیل می‌دهند.

(ب) کوارتز مسکوویت بیوتیت شیست‌ها (Grt+ Bt+Qtz+Ms+Kfs+Pl): این دسته نسبت به کوارتز مسکوویت شیست‌ها درشت دانه‌تر بوده، به صورت لایه‌هایی غنی از کوارتز و کانی‌های ورق‌های مسکوویت و بیوتیت به همراه مواد آلی کمتر دیده می‌شوند (شکل

مسأله از آن جهت دارای اهمیت است که در طی یک دگرگونی پیش‌رونده X_{Mg} کلریت همیشه از گارنت هم‌زیست آن بیشتر است و لذا این پدیده می‌تواند نشانه محدود شدن پایداری کلریت آهن‌دار و افزایش میزان منیزیم گارنت و کلریت هم‌زیست شود (شکل ۶) (Tabatabaeimanesh, 2006).



شکل ۵- محل قرارگیری Bt و Grt در دیاگرام پارائیزی AFM در سیستم KFMASH. ترکیب سنگ کل نیز به‌عنوان مقایسه آورده شده است.

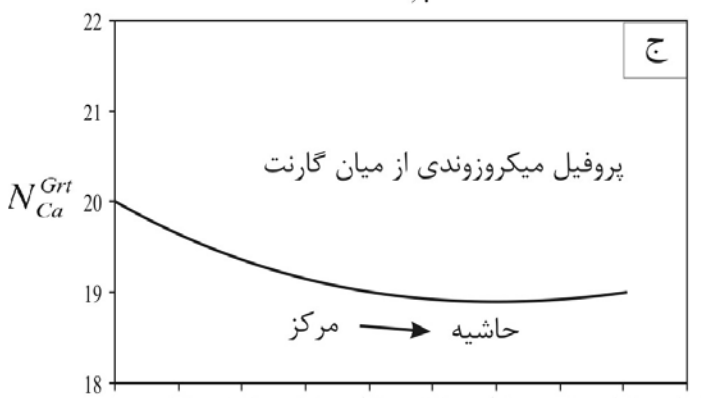
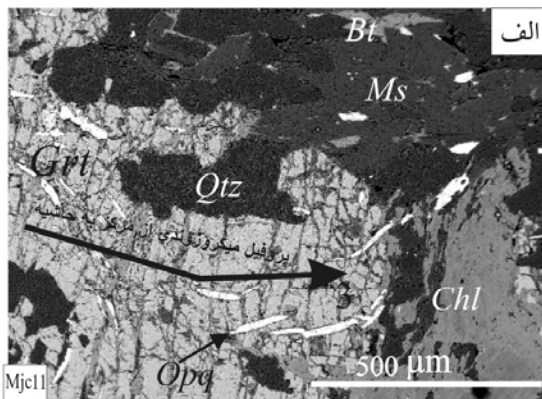
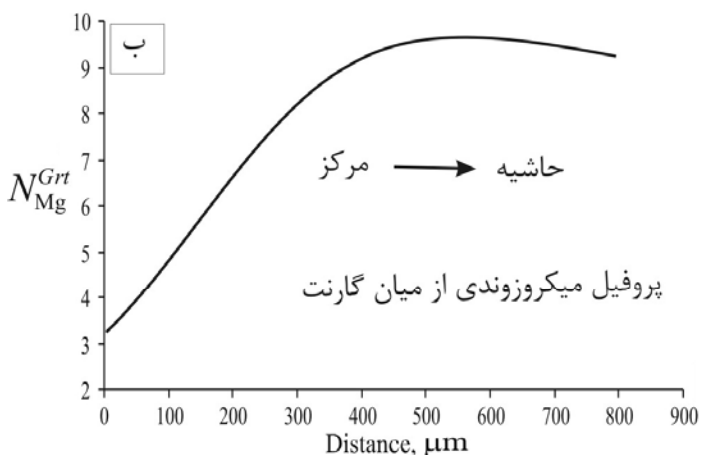
(ت) گارنت مسکوویت استروئید شیست‌ها ($Grt+St+Qtz+Ms+Kfs+Chl+Bt$): دانه درشت بوده و زمینه این سنگ از لایه‌های غنی از مسکوویت و به مقدار بسیار کمتر بیوتیت تشکیل یافته و بافت‌های لپیدوبلاستی، پورفیروبللاستی و پویی کیلوبلاستی از مشخصات فابریکی آن‌هاست. X_{Mg}^{Ms} در این سنگ‌ها بین ۰/۳۹ تا ۰/۶۰ در نوسان است. گارنت موجود در استروئید شیست‌ها در اندازه‌های ریز و درشت هستند که گارنت‌های درشت نسبت به گارنت‌های ریز از Mg بیشتری برخوردار بوده، این تغییر بر روی دیاگرام AFM به خوبی نمایان است (شکل ۷). پورفیروبللاستی شده و بدون شکل گارنت به قطر حداکثر ۱ سانتی‌متر که عموماً از محل شکستگی‌ها در حال کلریتی شدن هستند، دارای ادخال‌هایی از کلریت‌های اولیه

شکل‌گیری این دو کانی در کنار یکدیگر دال بر تشکیل آن‌ها در طی واکنش $Chl+Kfs=Bt+Ms+Qtz+H_2O$ است. کلریت، گارنت و اکسید آهن از کانی‌های فرعی هستند. X_{Mg}^{Ms} در این سنگ‌ها بین ۰/۴۱ تا ۰/۵۴ در نوسان است.

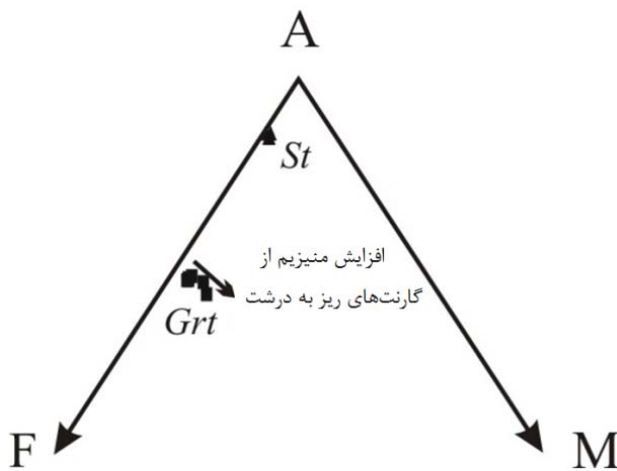
(پ) گارنت مسکوویت کلریت شیست‌ها ($Grt+Qtz+Ms+Kfs+Pl+Chl$): این سنگ‌ها نسبت به گروه قبلی دارای بیوتیت بسیار کمتر (حدود ۲-۳٪) و گارنت فراوان‌تر (حدود ۱۰٪) هستند. گارنت به‌صورت پورفیروهای بی‌شکل همراه با شکستگی در متن سنگ پراکنده است که در حاشیه آن‌ها گارنت‌ها ریزتری قرار گرفته‌اند (شکل ۴). X_{Mg}^{Grt} از ۰/۰۴ تا ۰/۲ تغییر می‌کند و اعضای انت‌هایی آن‌ها از ۵۸ تا ۷۶٪ آلماندین، ۱ تا ۱۸٪ اسپسارتین و از ۸ تا ۲۰٪ گروسولار تشکیل شده است. گارنت‌های موجود در متاپلیت‌ها همیشه دارای مقادیری از گروسولار هستند که در دگرگونی پیش‌رونده دمای ظهور آن‌ها را پایین می‌آورد. مجموعه پارائیزی موجود در این سنگ‌ها و وجود ادخال‌های مسکوویت و گاهی اوقات بیوتیت در گارنت بیانگر انجام واکنش ۲ ($Ms+Bt+Qtz=Grt+Kfs+H_2O$) است. کرینولیشن‌های بسیار ظریف در این سنگ‌ها از دیگر مشخصات فابریکی آن‌هاست. X_{Mg}^{Bt} در این سنگ‌ها بین ۰/۴۱ تا ۰/۴۶ در نوسان است. در شکل ۵، محل قرارگیری Bt و Grt در دیاگرام پارائیزی AFM نشان داده شده و ترکیب سنگ کل نیز به‌عنوان مقایسه آورده شده است. گارنت‌های درشت نسبت به گارنت‌های ریز از Mg بیشتری برخوردارند که نشان‌دهنده تشکیل آن‌ها در ادامه دگرگونی پیش‌رونده است و این تغییر بر روی دیاگرام AFM به خوبی نمایان است. برش‌های بلورهای منطقه‌ای از گارنت موجود در حاشیه کلریت، نشان‌دهنده افزایش میزان منیزیم این کانی در مجاورت کلریت است. این

اسپسارتین، ۸ تا ۲۱٪ گروسولار و از ۷ تا ۱۶٪ پیروپ تشکیل شده است (شکل ۸).

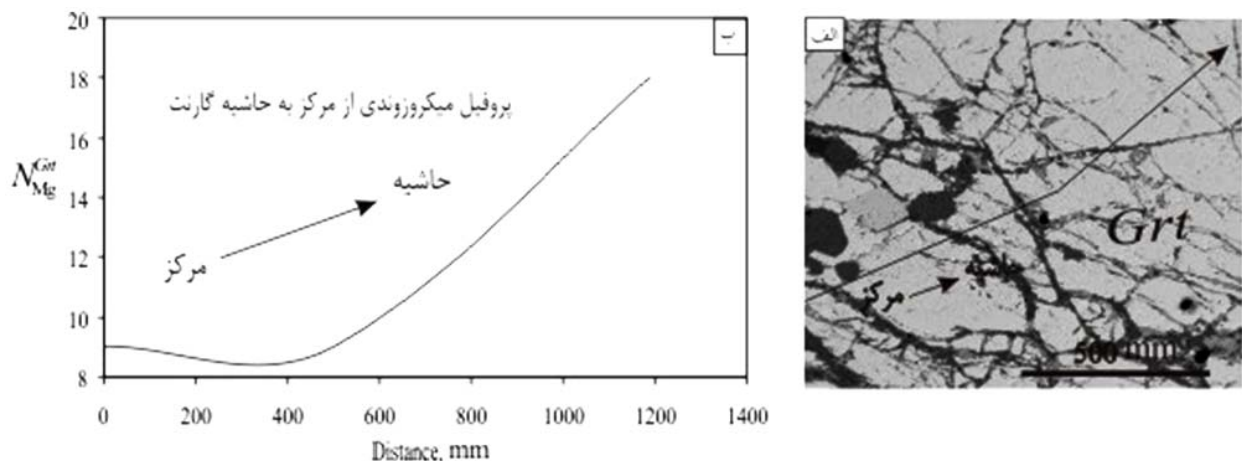
هستند. N_{Mg}^{Grt} از ۸ تا ۱۸ در نوسان بوده، درصد اعضای انتهای آن‌ها از ۶۸ تا ۷۵٪ آلماندین، صفر تا ۱٪



شکل ۶- الف) تصویر BSI (Backscattered Image) از گارنت و کلریت همزیست در یک نمونه از متاپلیت‌های جندق، ب) و ج) پروفیل تغییرات منیزیم و کلسیم در گارنت همزیست با کلریت.

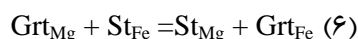
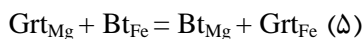


شکل ۷- نمایش محل قرارگیری استروئتید و گارنت‌های موجود در متاپلیت‌های جندق بر روی دیاگرام AFM. همچنین افزایش Mg گارنت‌های ریز به سمت گارنت‌های درشت بر روی این دیاگرام به خوبی مشخص است.



شکل ۸- الف) تصویر BSI از گارنت در یک نمونه از استروئید شیست‌های جندق، ب) پروفیل تغییرات منیزیم از مرکز به حاشیه در گارنت.

نموده‌اند. برای محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی در تعادلات کانیایی از بانک داده‌های Geo-Path استفاده شد (Perchuk *et al.*, 1992). پایداری منطقه‌بندی رشدی در گارنت‌های موجود در سنگ‌های مورد مطالعه که نمود آن به صورت افزایش آهن و منیزیم از مرکز به سمت حاشیه و کاهش میزان منگنز در همین مسیر است، حاکی از آن است که استروئید شیست‌های جندق دگرگونی بالاتر از رخساره آمفیبولیت را تحمل نکرده‌اند، زیرا در غیر این صورت توزیع این عناصر از حالت منطقه‌ای خارج و بر عکس به سمت هموزن شدن پیش می‌رفت (Perchuk *et al.*, 2007). با توجه به هم‌زیستی گارنت و استروئید و همچنین، هم‌زیستی گارنت و بیوتیت برای محاسبه دما از واکنش‌های تبادلی زیر، که می‌توانند ترمومترهای مناسبی باشند، استفاده شد.



آنالیز نقطه‌ای بر روی کانی‌های Grt، Ms و Bt از مجموعه پاراژنزی $\text{Qtz} + \text{Grt} + \text{Qtz} + \text{Ms} + \text{Kfs} + \text{Bt}$ که بر اساس واکنش $\text{Ms} + \text{Bt} + \text{Qtz} = \text{Grt} + \text{Kfs} + \text{H}_2\text{O}$ به تعادل

استروئیدهای به قطر ۰/۱ تا ۲ میلی‌متر نسبتاً سالم حدود ۶ تا ۷ درصد مودال گارنت مسکوویت استروئید شیست‌ها را تشکیل می‌دهد. $X_{\text{Mg}}^{\text{St}}$ از ۰/۰۳ تا ۰/۱۲ تغییر می‌کند. ظهور استروئید در متاپلیت‌ها در ترکیبات غنی از آهن از دمای حدود ۵۰۰ درجه آغاز می‌شود و نشانه شروع رخساره آمفیبولیت است (Masoudi *et al.*, 2006). عدم زونینگ در استروئید موجود در این شیست‌ها (شکل ۷) نشانه رشد و تشکیل این کانی در چرخه دگرگونی پیش‌رونده با خطوط هم‌درجه پهن مقیاس بوده است. وجود پاراژنز $\text{Grt} + \text{St} + \text{Chl} + \text{Bt}$ حکایت از انجام واکنش (۳) $\text{Grt} + \text{Chl} = \text{St} + \text{Bt}$ بوده، تقریباً تمامی بیوتیت موجود در این سنگ‌ها (۴-۵٪) در طی این واکنش تشکیل شده است.

شرایط ترمودینامیکی تعادلات منطقه‌ای

کانی‌ها

واکنش‌های دگرگونی اعم از انتقالی و یا تبادلی می‌توانند به خوبی بیانگر شرایط فشارشی و حرارتی تشکیل سنگ‌های دگرگونی باشند. لازمه کسب این اطلاعات، انجام آنالیزهای نقطه‌ای بر روی کانی‌هایی است که در این واکنش‌ها شرکت

جدول ۳- نتایج محاسبه دما برای ۴ مجموعه Grt + St در متاپلیت‌های جندق، بر اساس واکنش (۵).

St	Grt	X _{MgSt}	X _{Mg^{Grt}}	P, kbar	T °C
1	1	0.12	0.09	4	611
2	2	0.12	0.09	4	617
3	3	0.11	0.08	4	614
4	4	0.03	0.08	4	670

رسیده‌اند، به‌عنوان یک بارومتر مناسب برای محاسبه فشار انجام گرفت (Aranovich *et al.*, 1989). نتایج حاصل از ژئوترموبارومتري این سنگ‌ها که با استفاده از بانک داده‌های Geo-Path محاسبه شده، در جدول‌های ۳ تا ۵ ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج محاسبه دما برای ۵ مجموعه Grt + Bt در متاپلیت‌های جندق، بر اساس واکنش (۴)

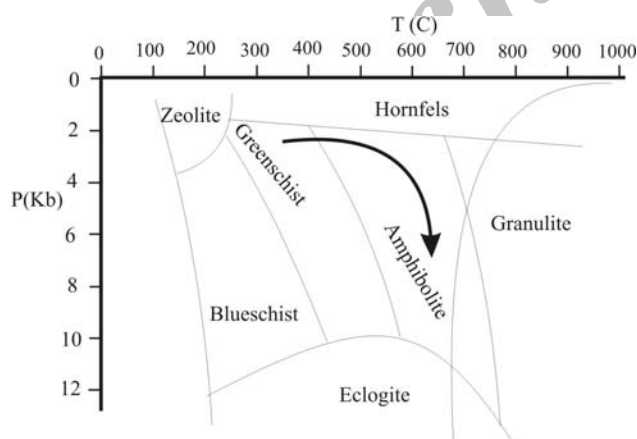
Bt	Grt	X _{Mg^{Bt}}	X _{Mg^{Grt}}	P, kbar	T °C
		Mjcl1			
1	1	0.46	0.04	5	408
2	2	0.45	0.05	5	429
3	3	0.45	0.08	5	495
4	4	0.41	0.08	5	534
5	5	0.42	0.13	5	606

جدول ۵- نتایج محاسبه پارامترهای فشار - دما برای ۵ مجموعه Grt + Bt+Ms+Qtz در متاپلیت‌های جندق.

Grt	Bt	Mus	X _{Mg^{Bt}}	X _{Mg^{Grt}}	X _{Al^{Mus}}	X _{Mg^{Mus}}	P, kbar ^۴	T °C*
1	1	1	0.46	0.04	0.93	0.54	2.04	442
2	2	2	0.45	0.05	0.94	0.50	2.17	518
3	3	3	0.45	0.08	0.92	0.52	3.94	564
4	4	4	0.41	0.09	0.91	0.41	5.86	552
5	5	5	0.42	0.13	0.95	0.49	6.4	626

*دما بر اساس واکنش (۴) محاسبه شد.

^۴فشار بر اساس واکنش (۲) محاسبه شد.



شکل ۹- مسیر دگرگون شدن سنگ‌های متاپلیتی جندق بر روی دیگرام رخساره‌ای

مطالعه ترموبارومتري متاپلیت‌های جندق، نشان‌دهنده تشکیل این سنگ‌ها در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد و در فاصله فشاری ۲ تا ۶/۵ کیلو بار است که روند و مسیر دگرگونی نیز در شکل ۹ رسم شده است. بر همین اساس رسوبات پلیتی جندق در رخساره‌های شیست سبز و آمفیبولیت دگرگون شده‌اند که این نتایج با شواهد پاراژنتیکی کانی‌ها کاملاً هماهنگ است.

نتیجه‌گیری

استروئید شیست‌ها نشانه شروع رخساره آمفیبولیت بوده، عدم ویننگ در استروئید موجود در این شیست‌ها نشانه رشد و تشکیل این کانی در سیکل دگرگونی پیش‌رونده با خطوط هم درجه پهن مقیاس است. وجود مجموعه $Grt + St + Chl + Bt$ از تشکیل استروئید در طی واکنش $Grt + Chl = St + Bt$ حکایت دارد. مطالعه ترموبارومتري که بر اساس تعادلات کانیایی به عمل آمده در طی واکنش‌های فوق انجام گرفت، بیانگر آن است که متاپلیت‌های جندق در محدوده دمایی ۴۰۰ تا ۶۷۰ درجه سانتی‌گراد و در محدوده فشاری ۲ تا ۶/۵ کیلو بار تشکیل شده‌اند. این نتایج با شواهد پاراژنتیکی کانی‌ها کاملاً هماهنگ بوده، حاکی از دگرگون شدن رسوبات پلیتی جندق در مرز رخساره‌های شیست سبز و آمفیبولیت است.

سپاسگزاری

این تحقیق حاصل بخشی از مطالعات طرح پژوهشی ۸۵۰۷۰۸ است که با حمایت مالی معاونت تحقیقات و فناوری دانشگاه اصفهان به انجام رسیده است. لازم است از مساعدت‌های ایشان تشکر و قدردانی شود.

مطالعه سنگ‌های متاپلیتی جندق بیانگر آن است که این سنگ‌ها بر مبنای مجموعه‌های کانیایی در چهار دسته کوارتز مسکوویت شیست، کوارتز مسکوویت بیوتیت شیست، گارنت مسکوویت کلریت شیست و گارنت مسکوویت استروئید شیست قرار دارند. در کوارتز مسکوویت بیوتیت شیست‌ها مجموعه مسکوویت + بیوتیت به‌خرج ناپایداری مجموعه کلریت + آلکالی‌فلدسپار و در طی واکنش $Chl + Kfs = Bt + Ms + Qtz + H_2O$ تشکیل شده‌اند. گارنت مسکوویت کلریت شیست‌های جندق ظهور اولین دانه‌های گارنت را به نمایش می‌گذارند. این گارنت‌ها اساساً از ۵۸ تا ۷۶٪ آلماندین، ۱ تا ۱۸٪ اسپسارتین و از ۸ تا ۲۰٪ گروسولار در طی واکنش $Ms + Bt + Qtz = Grt + Kfs + H_2O$ تشکیل شده‌اند. برش‌های بلورهای منطقه‌ای به عمل آمده از گارنت‌های موجود در متاپلیتی‌های جندق نشان‌دهنده افزایش میزان منیزیم این کانی‌ها از مرکز به حاشیه است که دال بر تشکیل آن‌ها در طی دگرگونی پیش‌رونده و سپس سرد شدن سریع و عدم تأثیر دگرگونی‌های بعدی بر روی آنهاست. ظهور استروئید در گارنت مسکوویت

منابع

- نبوی، م. ح. (۱۳۵۵) دیباچه‌های بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور.
 هاتف، م. (۱۳۷۴) زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگونی منطقه خور - جندق (ایران مرکزی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
 Baier, E. (1940) Das Iranhsche Binnenland östlich des Beckens von Nain-Yesd. Neues Jahrbuch für Mineralogie (Abhandlungen) fuer Geologie und Palaeontologie. Abhandlungen 38(1): 46-82.
 Bucher, K. and Frey, M. (2002) Petrogenesis of metamorphic rocks. Berlin and Heidelberg, New York, Springer-Verlag, 7th edition.
 Ganser, A. (1955) New aspects of the geology in Central Iran (With discussion). 4th World Petrology Congress, Rom, Italy.

- Masoudi, F. B., Mehrabim, B. and Mahmoudi, S. (2006) Garnet (almandine-spessartine) growth zoning and its application to constrain metamorphic history in Dehsalm Complex, Iran. *Journal of Science, Islamic Republic of Iran* 17(3): 235-244.
- Perchuk, L. L., Podladchikov, Yu.Yu, Polyakov, A. N. (1992) P T-paths and geodynamic modelling of some metamorphic processes. *Journal of Metamorphic Geology* 10: 311-319.
- Perchuk, L. L., van Reenen, D. D., Smit, C. A., Vankal, D. A., Boshoff, R., Varlamonov, S. M. and Tabatabaeimanesh, S.M. (2008) Isobaric heating recorded in polymetamorphic rocks from the Central Zone of the Limpopo High-Grade Terrain, South Africa. *Lithos* 103: 70-105.
- Romanko, E., Kokorin, Y. U., Krivyakin, B., Susov, M., Morozov L. and Sharkovski, M. (1984) Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran). Ministry of Mines and Metals, Geological Survey of Iran, V/O Technoexport.
- Stahl, A. F. (1897) Zur Geologie von Persian. Geognostische Beschreibung des Nordlichen und Zentral-Persiens. *Petermanns Mitt* 122: 1-72.
- Stockin, J. (1968) Structural history and tectonics of Iran: A review. *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists* 52: 1229-1258.
- Tabatabaeimanesh, S. M. (2006) Petrology of polymetamorphic rocks in the central zone of the Limpopo high-grade terrain, South Africa. Ph. D. Thesis. Lomonosov Moscow State University, Russia (In Russian).
- Technoexport (1979) Geology of Jandaq Area (Central Iran). Geological Survey of Iran, V/O "Technoexport". Report TE/NO. 4.

Archive of SID

Evaluation of thermodynamic conditions (P-T) in formation of Jandaq metapelitic schists (Northeast of Isfahan province)

Sayed Mohsen Tabatabaei manesh * and Morteza Sharifi

Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

Abstract

The metapelites of Jandagh, (based on mineral assemblages) can be divided into four categories: quartz- muscovite schists, quartz- muscovite- biotite schists, garnet- muscovite- chlorite schists and garnet- muscovite- staurolite schists. Jandagh's garnet- muscovite- chlorite schists show the first appearance of garnets. These garnets are basically formed of 58-76% almandine 1-18% spessartine and 8-20% grossular. The microprobe analyses along the Grt in Jandagh's metapelitic rocks show that Mg number of garnets varies and increase from core to rim. This is a feature for prograde metamorphism of metapelitic rocks. The well-preserved garnet growth zoning is a sign that metapelites were rapidly cooled and later metamorphic phases had no effect on these. The appearance of staurolite in garnet- muscovite- chlorite schists signifies the beginning of amphibolite facies. The absence of zoning in the staurolite contained in these schists suggests the formation and growth of this mineral in a prograde metamorphism occurred at a widely spaced isograd. The thermobarometric study shows that Jandagh's metapelites were formed within a temperature range of 400-670 °C and a pressure range of 2-6.5 kbar. These results are consistent with the minerals' paragenetic evidence and show effect of metamorphism on Jandagh's pelitic sediments in the limit of greenschist and amphibolite facies.

Key words: Jandagh's metapelites, amphibolite, amphibolites-green schist facies boundary, metamorphic path

* tabataba@sci.ui.ac.ir