

دگرگونی پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق (ایران مرکزی)

قدرت ترابی *

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

چکیده

افیولیت جندق یکی از افیولیت‌های قدیمی ایران است که سن آن به پروتروزوئیک و پالئوزوئیک نسبت داده شده و فازهای دگرگونی متعددی را پشت سر نهاده است. این افیولیت توسط شیت‌ها و مرمرهای پالئوزوئیک پوشانده شده و پریدوتیت‌های گوشته یکی از مهم‌ترین واحدهای تشکیل‌دهنده آن است. وجود الیوین و ارتوپیروکسن‌های با منشاء دگرگونی، تشکیل ترمولیت، تالک، آنتوفیلیت، کلریت و آنتی‌گوریت در پریدوتیت‌های گوشته این مجموعه افیولیتی نشان از دگرگون شدن این سنگ‌ها در رخساره آمفیبولیت دارد. کلینوپیروکسن‌ها و اسپینل‌های کروم‌دار در مقابل دگرگونی مقاوم بوده و بازمانده کانی‌شناسی اولیه این سنگ‌ها هستند. نتایج حاصل از بررسی پدیده دگرگونی در این پریدوتیت‌های گوشته، در تطابق با داده‌های حاصل از پتروگرافی و دما-فشار سنجی زوج‌کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول موجود در آمفیبولیت‌های افیولیت جندق است.

واژه‌های کلیدی: دگرگونی، پریدوتیت گوشته، افیولیت، جندق، ایران مرکزی

مقدمه

بیشتر سنگ‌های اولترامافیک موجود در افیولیت‌ها، پریدوتیت‌های گوشته هستند که در اثر فرارانش در هنگام برخورد، در امتداد کمربندهای دگرگونی به‌طور محلی دیده می‌شوند (Evans, 1977). این گونه سنگ‌های اولترامافیک که معمولاً دارای رخنمون عدسی‌شکل در کمربندهای کوه‌زایی هستند را پریدوتیت‌های آلپی (Alpine Peridotites) می‌نامند. این سنگ‌ها معمولاً در هنگام گسترش پوسته اقیانوسی دچار سرپانتینی‌شدن استاتیک و در حین جایگیری، دچار سرپانتینی‌شدن

دینامیک می‌شوند. بعد از جایگیری افیولیت، بسته به شرایط دما و فشار دگرگونی ناحیه‌ای، این سنگ‌ها درجات مختلفی از تبلور مجدد را پشت سر خواهند نهاد. در اثر این دگرگونی‌ها، کانی‌شناسی، ساخت، بافت و یا ترکیب شیمیایی سنگ اولیه به‌طور کلی و یا بخشی، دچار تغییر خواهد شد. از مهم‌ترین مقالاتی که تاکنون در مورد دگرگونی پریدوتیت‌های گوشته افیولیت‌های مختلف انتشار یافته می‌توان به Oliver و همکاران (۱۹۷۲)، Scotford و Williams (۱۹۸۳)، Paktunc و Dymek (۱۹۸۴) و همکاران (۱۹۸۸) و Melcher

همکاران (۲۰۰۲) اشاره نمود.

افیولیت جندق یکی از افیولیت‌های قدیمی ایران زمین با سن احتمالی پروتروزوئیک (Technoexport, 1984) یا پالئوزوئیک (Davoudzadeh, 1997) است که از سرپانتینیت، متاپریدوتیت، متاپریدوتیت‌های سرپانتینی شده گوشته، متاگابرو، آمفیبولیت، دایک‌های متابازیک، لیستونیت، و رودینگیت تشکیل شده است. از مهم‌ترین مشخصات سنگ‌شناسی این افیولیت، نبود کرومیتیت در آن است (Torabi, 2009). بررسی هورنبلندهای موجود در آمفیبولیت‌های این مجموعه افیولیتی با استفاده از روش Ar-Ar عددی معادل 157 ± 33 میلیون سال (ژوراسیک میانی) را به دست داده است (Bagheri, 2007). ضخامت قابل توجهی از سنگ‌های دگرگونی شامل شیست و مرمر، این مجموعه افیولیتی را می‌پوشاند که تعیین سن مسکویت‌های موجود در میکاشیست‌ها با استفاده از روش Ar-Ar عدد 164 ± 2 میلیون سال (ژوراسیک میانی) را ارائه نموده است (Bagheri, 2007). این اعداد به دست آمده بیانگر تأثیر فازکوه‌زایی سیمیرین میانی و تبدیل شدن شیل‌ها به شیست، و بازالت‌ها به آمفیبولیت است. تمامی سنگ‌های موجود در این افیولیت، فازهای متعددی از دگرگونی را متحمل شده‌اند به طوری که زمین‌شناسان روسی در پروژه تکنواکسپورت، این مجموعه افیولیتی را یک "متافیولیت" نام نهاده‌اند (Technoexport, 1979). در افیولیت جندق، سرپانتینی شدن پریدوتیت‌ها پدیده‌ای بسیار مشهود و پیشرفته بوده و این مجموعه افیولیتی چندین فاز سرپانتینی شدن استاتیک و دینامیک را در حین تشکیل، جایگیری و فعالیت‌های کوه‌زایی پشت سر نهاده است. افیولیت جندق توسط شیست‌ها و مرمرهای پالئوزوئیک پوشانده شده و همگی توسط توده‌های گرانیتوئیدی قطع شده‌اند (Torabi, 2009). سازند چاه‌پلنگ با سن ژوراسیک بالایی (ماسه‌سنگ و سیلت‌استون با میان لایه‌هایی از کنگلومرا و شیل) و

سنگ آهک‌های کرتاسه نیز در منطقه دیده می‌شوند. نقشه کلی رخنمون سنگ‌های افیولیتی در سرزمین ایران و موقعیت افیولیت جندق در شکل ۱، و نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه مطالعه شده در شکل ۲ نشان داده شده است. شکل ۳ نیز راه‌های دسترسی به منطقه را نشان می‌دهد. از مهم‌ترین بررسی‌های پترولوژی بر روی افیولیت جندق می‌توان به ترابی (۱۳۸۶) و هاتف (۱۳۷۴) اشاره نمود.

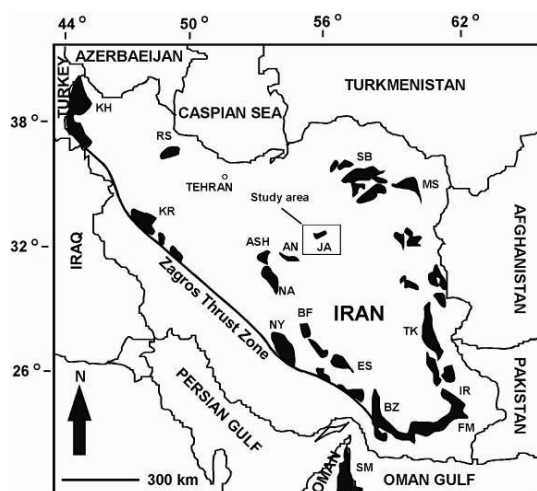
در این نوشتار، شواهد رخداد دگرگونی در پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق با استفاده از مطالعات کانی‌شناسی و پتروگرافی مورد بررسی قرار خواهد گرفت.

روش انجام پژوهش

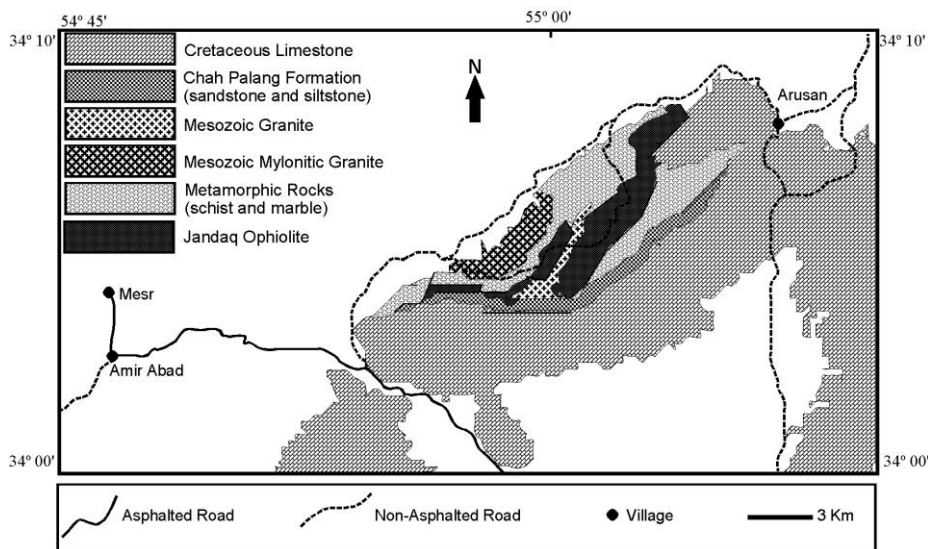
پس از بررسی‌های صحرایی و نمونه‌برداری، به منظور انجام مطالعه پتروگرافی از نمونه‌های مناسب مقطع نازک تهیه شد. تعداد ۱۰ نمونه از مقاطع جهت انجام آنالیزهای نقطه‌ای کانی‌ها انتخاب و به مقطع نازک صیقلی تبدیل شدند. ترکیب شیمیایی کانی‌ها توسط دستگاه الکترون مایکروپروب مدل Cameca SX-100 در مؤسسه کانی‌شناسی دانشگاه لایبنیز هانوفر کشور آلمان با ولتاژ 15 kV و جریان 15 nA انجام شد که نتایج آن در جدول‌های ۱ تا ۸ آورده شده است. در محاسبه مقدار Fe^{3+} موجود در ساختار کانی‌ها از استوکیومتری کانی‌ها استفاده شد (Droop, 1987). تمامی واکنش‌های دگرگونی ارائه شده در این نوشته برگرفته از Spear (۱۹۹۵) است.

پتروگرافی و شیمی کانی‌ها

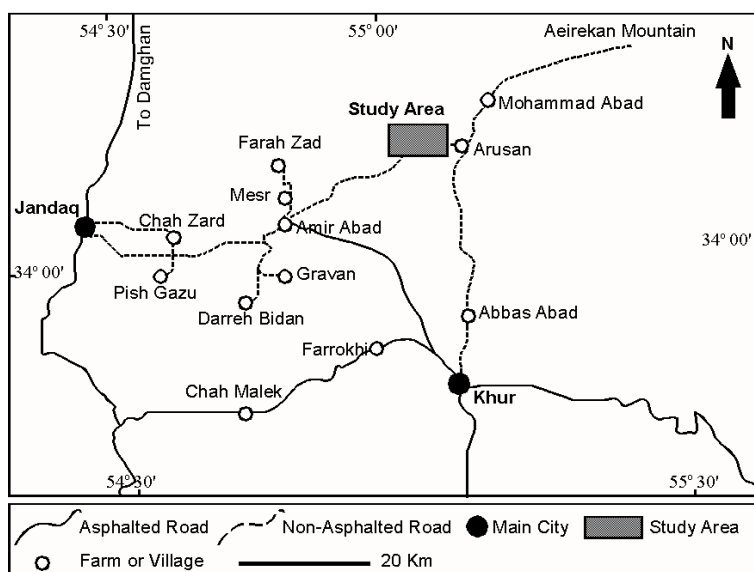
همان طور که اشاره شد درجه سرپانتینی شدن در پریدوتیت‌های افیولیت جندق بسیار بالا بوده و سرپانتینیت‌ها یکی از سنگ‌های مهم و عمده این مجموعه افیولیتی هستند.



شکل ۱- نقشه افیولیت‌های ایران و موقعیت افیولیت جندق، برگرفته از Pessagno و همکاران (۲۰۰۴) با تغییرات در مورد افیولیت‌های انارک و جندق (KH= Khoy; KR= Kermanshah; NY= Neyriz; BZ= Band Ziarat; NA= Naein; BF= Baft; ES= Esphandagheh; FM= Fanuj-Maskutan; IR= Iranshahr; TK= Tchehel Kureh; MS= Mashhad; SB= Sabzevar; RS= Rasht; SM= Samail; ASH= Ashin; AN= Anarak; JA= Jandaq).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده منطقه امیر آباد تا عروسان (شرق جندق) (برگرفته از Technoexport (۱۹۸۴) با تغییرات).



شکل ۳- راه‌های دسترسی به منطقه مورد مطالعه

جدول ۱- نتایج آنالیز نقطه‌ای الیون‌ها و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها.

Sample	689	689	689	689	689	689	689	689	689	689	689	689	762	762
Analysis	49	50	51	52	53	54	55	56	57	36	37	38	96	99
SiO ₂	40.72	40.50	40.56	40.75	40.50	40.59	40.56	41.39	41.29	40.75	40.91	40.92	41.30	41.09
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.02	0.00
Al ₂ O ₃	0.00	0.07	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00	0.01	0.03	0.01	0.02	0.00	0.01	0.00
FeO	10.88	11.52	11.00	11.10	10.30	10.60	10.57	7.44	7.60	9.92	9.52	9.88	9.15	9.66
MnO	0.10	0.12	0.10	0.07	0.10	0.11	0.14	0.06	0.07	0.08	0.09	0.13	0.12	0.10
MgO	48.64	48.19	48.79	48.41	49.48	49.08	48.86	51.26	51.38	49.21	49.44	49.48	49.65	49.57
CaO	0.00	0.03	0.01	0.00	0.00	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02
Na ₂ O	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.01	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.36	100.44	100.49	100.34	100.40	100.40	100.16	100.19	100.39	99.98	99.99	100.42	100.26	100.44
Structural formula based on the 4 Oxygens														
Si	0.998	0.995	0.994	1.000	0.991	0.994	0.996	1.000	0.997	0.998	1.000	0.998	1.005	1.001
Al	0.000	0.002	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ²⁺	0.223	0.237	0.226	0.228	0.211	0.217	0.217	0.150	0.153	0.203	0.195	0.202	0.186	0.197
Mn	0.002	0.002	0.002	0.001	0.002	0.002	0.003	0.001	0.001	0.002	0.002	0.003	0.002	0.002
Mg	1.778	1.766	1.783	1.771	1.805	1.792	1.788	1.847	1.849	1.797	1.802	1.799	1.801	1.800
Ca	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Na	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
K	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Cations	3.001	3.003	3.006	3.000	3.010	3.006	3.005	2.999	3.001	3.000	3.000	3.002	2.994	3.001
Fe/(Fe+Mg)	0.110	0.120	0.110	0.110	0.100	0.110	0.110	0.080	0.080	0.100	0.100	0.100	0.090	0.100
Mg/(Fe+Mg)	0.890	0.880	0.890	0.890	0.900	0.890	0.890	0.920	0.920	0.900	0.900	0.900	0.910	0.900

جدول ۲- نتایج آنالیز نقطه‌ای ارتوپروکسن‌ها و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها.

Sample	689	689	689	689	689	689	689	689	689	762	762	762	762	762	762	762	762	762	762
Analysis	30	32	34	35	41	43	44	45	46	533	537	538	539	540	541	85	86	89	92
SiO ₂	57.43	57.26	57.85	57.26	57.92	57.44	57.98	58.35	57.98	57.60	57.31	56.15	57.46	58.00	56.61	56.92	57.08	57.79	56.85
TiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.04	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02
Al ₂ O ₃	1.08	1.33	0.51	1.05	0.57	0.89	0.52	0.49	0.51	1.39	0.94	1.17	0.50	1.30	1.87	1.34	0.94	1.10	1.55
Cr ₂ O ₃	0.40	0.14	0.15	0.16	0.00	0.14	0.00	0.03	0.03	0.14	0.05	0.22	0.11	0.10	0.30	0.37	0.10	0.13	0.22
FeO	7.05	7.34	6.57	7.04	7.08	7.32	5.57	5.43	5.60	6.25	5.95	6.44	6.09	6.31	6.16	6.84	6.38	5.88	6.70
MnO	0.12	0.09	0.03	0.04	0.15	0.10	0.11	0.02	0.07	0.08	0.15	0.14	0.10	0.11	0.12	0.10	0.10	0.08	0.07
MgO	34.25	34.22	35.17	34.53	34.61	34.46	35.64	35.68	35.75	36.01	35.91	35.97	35.95	36.19	35.59	34.76	35.33	35.23	34.63
CaO	0.08	0.05	0.05	0.07	0.03	0.06	0.03	0.05	0.04	0.10	0.09	0.16	0.12	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.12
Na ₂ O	0.02	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.03	0.00	0.04	0.03	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.02	0.02	0.00	0.01	0.02	0.00	0.02
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.05	0.04	0.06	0.02	0.12	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00
Total	100.43	100.43	100.36	100.16	100.37	100.41	99.86	100.05	99.99	101.69	100.48	100.33	100.42	102.24	100.86	100.42	100.03	100.30	100.18
Structural formula based on the 6 Oxygens																			
Si	1.977	1.971	1.984	1.973	1.992	1.977	1.990	1.999	1.987	1.943	1.955	1.918	1.962	1.947	1.926	1.954	1.960	1.979	1.955
Ti	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Al ^{IV}	0.023	0.029	0.016	0.027	0.008	0.023	0.010	0.001	0.013	0.055	0.038	0.047	0.020	0.051	0.074	0.046	0.038	0.021	0.045
Al ^{VI}	0.021	0.025	0.005	0.015	0.015	0.013	0.012	0.019	0.008	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.008	0.000	0.024	0.018
Cr	0.011	0.004	0.004	0.004	0.000	0.004	0.000	0.001	0.001	0.004	0.001	0.006	0.003	0.003	0.008	0.010	0.003	0.004	0.006
Fe ²⁺	0.203	0.211	0.180	0.196	0.204	0.204	0.160	0.156	0.156	0.120	0.121	0.071	0.119	0.124	0.108	0.169	0.145	0.168	0.171
Fe ³⁺	0.000	0.001	0.009	0.007	0.000	0.007	0.000	0.000	0.005	0.055	0.048	0.113	0.055	0.053	0.067	0.027	0.039	0.000	0.022
Mn	0.003	0.003	0.001	0.001	0.004	0.003	0.003	0.001	0.002	0.002	0.004	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.002	0.002
Mg	1.757	1.756	1.798	1.773	1.775	1.768	1.824	1.822	1.827	1.811	1.826	1.831	1.83	1.812	1.805	1.779	1.809	1.799	1.775
Ca	0.003	0.002	0.002	0.003	0.001	0.002	0.001	0.002	0.001	0.004	0.003	0.006	0.004	0.003	0.003	0.003	0.003	0.003	0.004
Na	0.001	0.000	0.001	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.002	0.002	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.001
K	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.000	0.001
Ni	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001	0.001	0.002	0.001	0.003	0.003	0.000	0.000	0.000	0.000
Sum	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	4.000	3.999	3.999	4.000	4.000	3.999	4.000	3.999
Mg#	0.896	0.893	0.909	0.900	0.897	0.897	0.919	0.921	0.921	0.938	0.938	0.963	0.939	0.936	0.944	0.913	0.926	0.915	0.912

جدول ۳- نتایج آنالیز نقطه‌ای آمفیبول‌ها و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها. (۴ مورد آخر مربوط به آنتوفیلیت و بقیه مربوط به ترمولیت است).

Sample	685-4	685-4	685-4	715	715	715	716	716	716	716	716	716	716	716	762	762	762	762
Analysis	1	8	9	28	29	30	59	62	65	67	70	71	75	81	87	88	90	94
SiO ₂	58.34	57.95	58.46	57.55	57.94	56.68	57.80	58.03	49.60	58.00	57.59	55.05	58.48	56.21	55.62	56.99	59.91	51.86
TiO ₂	0.00	0.02	0.03	0.00	0.02	0.00	0.00	0.00	0.23	0.01	0.04	0.11	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Al ₂ O ₃	0.31	0.30	0.41	0.16	0.04	0.25	0.08	0.07	3.52	0.09	0.09	1.62	0.08	0.08	1.60	1.59	1.14	1.47
Cr ₂ O ₃	0.08	0.03	0.11	0.03	0.00	0.00	0.06	0.06	1.20	0.05	0.04	1.18	0.11	0.04	0.32	0.43	0.17	0.40
FeO	2.31	2.48	2.26	2.56	2.53	2.55	3.66	2.86	3.95	2.03	4.20	2.94	4.17	3.59	2.90	2.82	1.40	4.58
MnO	0.03	0.06	0.00	0.07	0.11	0.09	0.05	0.07	0.11	0.11	0.09	0.10	0.11	0.06	0.00	0.00	0.08	0.12
MgO	23.83	23.52	23.84	24.67	23.47	24.31	22.64	23.04	18.59	24.00	22.54	22.31	22.27	22.30	32.99	34.16	30.53	33.57
CaO	13.26	13.09	13.22	12.32	13.41	12.51	13.60	13.49	20.24	13.64	13.37	13.56	13.38	13.46	0.00	0.04	0.02	0.02
Na ₂ O	0.07	0.07	0.04	0.01	0.02	0.13	0.05	0.04	0.31	0.03	0.04	0.45	0.02	0.04	0.01	0.03	0.46	0.01
K ₂ O	0.02	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.02	0.01	0.00	0.01	0.04	0.05	0.04	0.02	0.03	0.03	0.01	0.02
Total	98.17	97.52	98.28	97.33	97.53	96.55	97.90	97.61	96.55	97.92	98.00	96.19	98.55	95.77	93.16	95.67	93.56	91.66
Structural formula based on the 23 Oxygens																		
Si	7.880	7.886	7.877	7.734	7.912	7.721	7.927	7.944	7.500	7.877	7.885	7.632	7.966	7.888	6.611	6.586	7.202	6.249
Ti	0.000	0.002	0.003	0.000	0.002	0.000	0.000	0.000	0.026	0.001	0.004	0.011	0.000	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001
Al	0.049	0.048	0.065	0.025	0.006	0.041	0.013	0.011	0.500	0.014	0.015	0.264	0.013	0.013	0.224	0.216	0.161	0.209
Cr	0.009	0.003	0.012	0.003	0.000	0.000	0.006	0.006	0.143	0.005	0.004	0.129	0.012	0.004	0.030	0.039	0.016	0.038
Fe ²⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.052	0.000	0.306	0.204	0.499	0.000	0.218	0.179	0.348	0.279	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe ³⁺	0.261	0.282	0.255	0.288	0.236	0.290	0.115	0.123	0.000	0.231	0.262	0.162	0.127	0.143	0.288	0.273	0.141	0.462
Mn	0.003	0.007	0.000	0.008	0.013	0.010	0.006	0.008	0.014	0.013	0.010	0.012	0.013	0.007	0.000	0.000	0.000	0.012
Mg	4.798	4.771	4.789	4.942	4.779	4.937	4.629	4.702	4.190	4.859	4.601	4.611	4.522	4.665	4.970	5.885	5.471	6.03
Ca	1.919	1.909	1.908	1.774	1.962	1.826	1.998	1.979	3.279	1.985	1.961	2.014	1.953	2.024	0.000	0.005	0.003	0.003
Na	0.018	0.018	0.010	0.002	0.006	0.034	0.014	0.011	0.091	0.008	0.011	0.121	0.005	0.011	0.002	0.007	0.107	0.002
K	0.003	0.005	0.003	0.000	0.000	0.004	0.003	0.002	0.000	0.002	0.007	0.009	0.007	0.004	0.005	0.004	0.002	0.003
Sum	14.941	14.932	14.922	14.776	14.968	14.864	15.015	14.991	16.370	14.994	14.979	15.144	14.965	15.038	13.007	13.016	13.111	13.008

جدول ۴- نتایج آنالیز نقطه‌ای سرپانتین‌های موجود در پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق، به همراه نتایج محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها.

Sample	638	621	622	622	620	620	762	762
SiO ₂	40.68	42.23	42.28	43.38	41.19	43.11	42.18	42.00
TiO ₂	0.02	0.01	0.01	0.02	0.03	0.00	0.00	0.06
Al ₂ O ₃	4.12	1.63	1.69	1.39	1.65	1.46	1.86	1.35
Cr ₂ O ₃	0.65	0.80	0.59	0.30	0.55	0.15	0.44	0.38
FeO*	3.16	3.42	1.92	1.86	4.52	4.63	7.47	7.16
MnO	0.04	0.09	0.06	0.05	0.04	0.03	0.19	0.18
MgO	36.50	37.80	38.74	39.25	35.11	37.30	33.74	33.77
CaO	0.00	0.00	0.02	0.00	0.02	0.00	0.03	0.07
Na ₂ O	0.00	0.00	0.00	0.00	0.14	0.00	0.02	0.02
K ₂ O	0.01	0.02	0.00	0.00	0.01	0.01	0.05	0.04
NiO	0.18	0.18	0.07	0.08	0.17	0.19	0.18	0.07
Total%	85.34	86.15	85.38	86.32	83.42	86.89	86.16	85.10
Oxygen	7	7	7	7	7	7	7	7
Si	1.94	2.00	2.00	2.03	2.02	2.03	2.03	2.05
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	0.23	0.09	0.09	0.08	0.10	0.08	0.11	0.08
Cr	0.02	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.02	0.01
Fe ³⁺	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ²⁺	0.13	0.14	0.08	0.07	0.19	0.18	0.30	0.29
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01
Mg	2.60	2.67	2.74	2.73	2.57	2.62	2.43	2.45
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ni	0.01	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00
Sum	4.93	4.94	4.94	4.93	4.92	4.93	4.91	4.91

جدول ۵- نتایج آنالیز نقطه‌ای تالک‌ها و محاسبه فرمول ساختاری آن‌ها.

Sample	689-31	689-33	689-39	689-42	689-47	689-48	762-90	762-95	762-97	762-98
SiO ₂	58.95	60.81	62.29	62.01	61.74	63.40	59.91	60.74	59.62	59.53
TiO ₂	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.11	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	0.82	0.84	0.61	0.45	0.74	0.87	1.14	2.21	0.59	0.50
Cr ₂ O ₃	0.09	0.12	0.13	0.06	0.09	0.09	0.17	0.08	0.10	0.00
FeO*	2.15	1.67	1.44	1.53	1.31	1.12	1.40	1.32	5.89	6.33
MnO	0.00	0.00	0.00	0.09	0.03	0.06	0.08	0.04	0.17	0.19
MgO	30.39	30.50	31.28	30.74	30.53	30.63	30.53	30.83	31.46	31.48
CaO	0.03	0.04	0.00	0.02	0.03	0.01	0.02	0.10	0.17	0.11
Na ₂ O	0.32	0.30	0.16	0.15	0.31	0.24	0.46	1.01	0.12	0.11
K ₂ O	0.04	0.03	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.04	0.00	0.00
Total	92.70	94.21	95.79	94.99	94.70	96.34	93.56	96.40	98.02	98.25
Structural formula based on the 21 Oxygens										
Si	7.661	7.786	7.845	7.890	7.866	7.956	7.699	7.549	7.406	7.386
Ti	0.000	0.002	0.001	0.000	0.000	0.000	0.001	0.010	0.000	0.000
Al	0.126	0.127	0.091	0.067	0.111	0.129	0.173	0.324	0.086	0.073
Cr	0.001	0.002	0.002	0.001	0.001	0.001	0.003	0.001	0.002	0.000
Fe ²⁺	0.234	0.179	0.152	0.163	0.140	0.117	0.150	0.137	0.612	0.657
Fe ³⁺	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Mn	0.000	0.000	0.000	0.010	0.003	0.006	0.009	0.004	0.018	0.020
Mg	5.888	5.822	5.873	5.831	5.798	5.730	5.849	5.712	5.826	5.823
Ca	0.004	0.005	0.000	0.003	0.004	0.001	0.003	0.013	0.023	0.015
Na	0.081	0.074	0.039	0.037	0.077	0.058	0.115	0.243	0.029	0.026
K	0.007	0.005	0.000	0.000	0.002	0.002	0.002	0.006	0.000	0.000
Total	14.001	14.000	14.001	14.001	14.001	13.999	14.001	13.998	14.000	14.000

جدول ۶- نتایج آنالیز نقطه‌ای کلریت‌ها و محاسبه فرمول

ساختاری آن‌ها.

Element	716-63	716-64	762-51
SiO ₂	32.45	34.48	33.74
TiO ₂	0.02	0.02	0.03
Al ₂ O ₃	15.50	13.11	13.84
Cr ₂ O ₃	0.08	0.30	0.12
FeO	6.55	6.50	6.62
MnO	0.12	0.09	0.10
MgO	32.09	32.47	32.56
CaO	0.00	0.06	0.02
Na ₂ O	0.00	0.02	0.02
K ₂ O	0.02	0.03	0.01
Total	86.83	87.08	87.06
Structural formula based on the 28 Oxygens			
Si	6.226	6.577	6.452
Ti	0.003	0.003	0.004
Al ^{IV}	1.774	1.423	1.548
Al ^{VI}	1.734	1.529	1.573
Cr	0.012	0.045	0.018
Fe ²⁺	1.062	0.954	1.034
Fe ³⁺	0.000	0.082	0.025
Mn	0.020	0.015	0.016
Mg	9.179	9.232	9.281
Ca	0.000	0.012	0.004
Na	0.000	0.015	0.015
K	0.010	0.015	0.005
Sum	20.018	19.903	19.975
Variety	Penninite	Penninite	Penninite

رخداد سرپانتینی شدن و فازهای مختلف دگرگونی لزوم دقت در بررسی‌های پتروگرافی این سنگ‌ها را بیشتر می‌نماید. بررسی‌های پتروگرافی نشان می‌دهد که پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق بیشتر از نوع لرزولیت و هارزبورگیت بوده‌اند و دونیت‌ها توسعه چندانی نداشته‌اند. بافت‌های موجود در این سنگ‌ها شامل پورفایروبلاستیک، گرانوبلاستیک، نماتوبلاستیک، پوئی کیلوبلاستیک و بافت مشبک است. مهم‌ترین کانی‌های تشکیل‌دهنده این سنگ‌ها سرپانتین (آنتی‌گوریت)، الیوین، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن، اسپینل کروم‌دار، تالک، ترمولیت، آنتوفیلیت، کلریت، کلسیت و مگنتیت است.

تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های مورد مطالعه در شکل ۴ آورده شده است. همان‌طور که قبلاً اشاره شد پریدوتیت‌های این منطقه اساساً از لرزولیت و مقادیر کمتری هارزبورگیت تشکیل شده است.

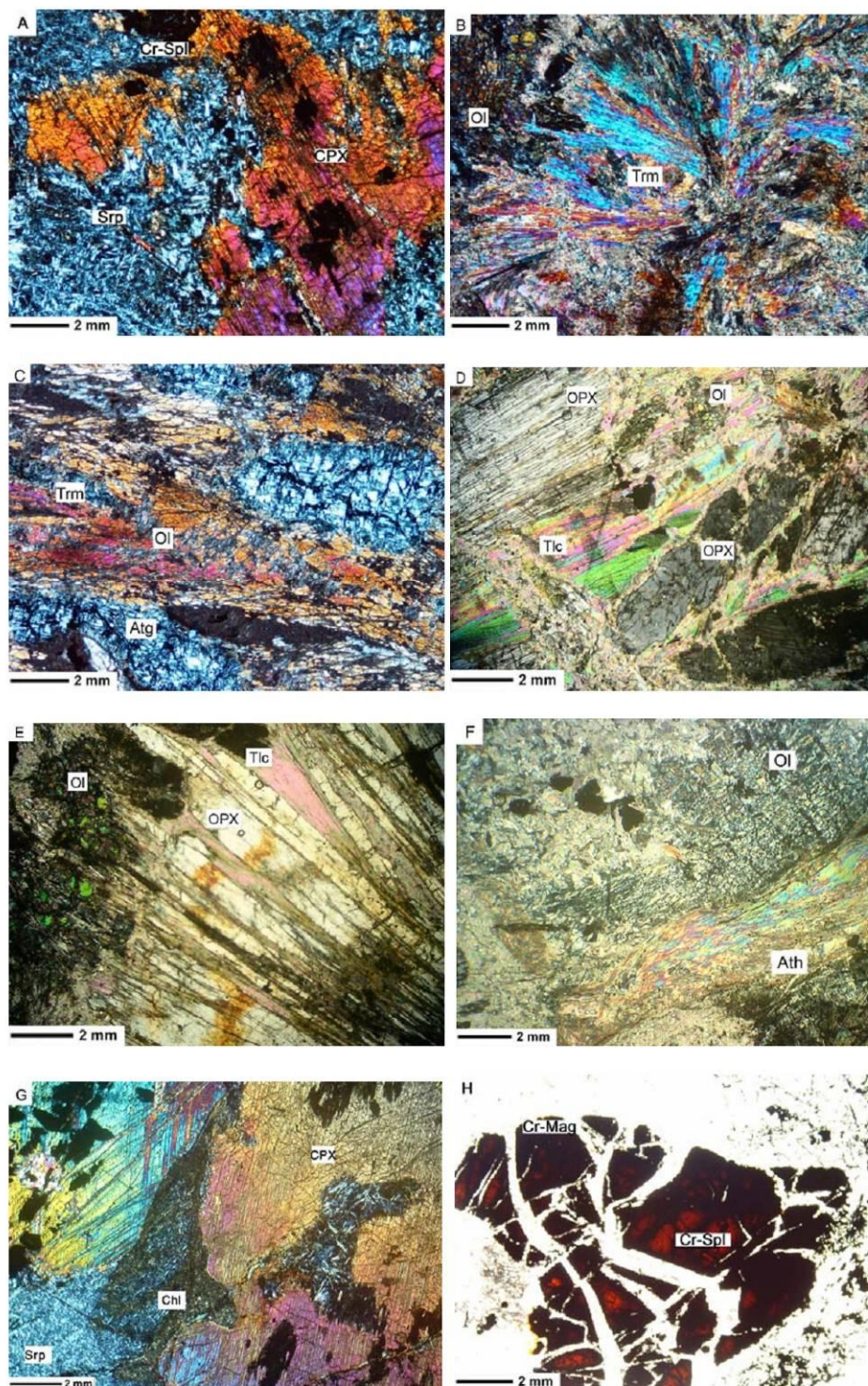
Sample	Analysis	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	NiO	Total				
716	58	52.14	0.40	3.36	1.19	3.48	0.08	16.42	22.75	0.43	0.00	0.00	100.25				
716	60	50.96	0.47	4.98	1.31	3.60	0.13	15.41	23.02	0.42	0.00	0.00	100.30				
716	61	51.90	0.29	4.09	1.07	3.74	0.14	16.48	22.86	0.42	0.00	0.00	100.94				
716	66	51.95	0.39	2.98	1.12	3.36	0.12	16.71	23.01	0.40	0.00	0.00	100.04				
716	68	51.61	0.43	3.26	1.13	3.52	0.12	16.36	23.14	0.36	0.00	0.00	99.93				
716	69	51.15	0.52	3.34	0.92	3.80	0.19	16.22	23.17	0.35	0.00	0.00	99.66				
716	73	52.17	0.32	2.84	0.82	3.42	0.15	16.73	23.27	0.39	0.01	0.00	100.12				
716	74	52.42	0.35	2.34	0.71	3.46	0.17	17.07	23.22	0.33	0.01	0.00	100.08				
716	76	51.24	0.38	4.43	1.24	3.49	0.07	16.15	23.08	0.35	0.00	0.00	100.43				
716	77	51.34	0.44	4.62	1.18	3.55	0.10	15.94	23.28	0.34	0.00	0.00	100.79				
716	78	51.24	0.46	4.53	1.26	3.45	0.11	15.79	23.41	0.31	0.00	0.00	100.56				
716	79	52.10	0.61	3.45	0.98	3.70	0.12	16.69	22.22	0.37	0.00	0.00	100.24				
717	1	51.92	0.20	6.49	1.16	2.41	0.09	15.24	21.60	0.71	0.01	0.04	99.87				
717	3	52.92	0.27	5.06	0.84	2.16	0.08	15.83	21.68	0.82	0.03	0.05	99.75				
Structural Formula Base on the 6 Oxygens																	
Sample	Analysis	Si	Ti	Al ^{IV}	Al ^{VI}	Cr	Fe ²⁺	Fe ³⁺	Mn	Mg	Ca	Na	K	Ni	Sum	Mg#	Cr#
716	58	1.896	0.011	0.104	0.040	0.034	0.068	0.038	0.002	0.890	0.886	0.030	0.000	0.000	4.000	0.929	0.191
716	60	1.857	0.013	0.143	0.070	0.038	0.072	0.038	0.004	0.837	0.899	0.030	0.000	0.000	4.000	0.921	0.151
716	61	1.872	0.008	0.128	0.046	0.030	0.048	0.065	0.004	0.886	0.883	0.029	0.000	0.000	4.000	0.949	0.147
716	66	1.891	0.011	0.109	0.019	0.032	0.038	0.064	0.004	0.907	0.897	0.028	0.000	0.000	4.000	0.960	0.200
716	68	1.884	0.012	0.116	0.024	0.033	0.046	0.061	0.004	0.891	0.905	0.025	0.000	0.000	4.000	0.951	0.191
716	69	1.873	0.014	0.127	0.017	0.027	0.038	0.079	0.006	0.885	0.909	0.025	0.000	0.000	4.000	0.959	0.158
716	73	1.897	0.009	0.103	0.018	0.024	0.032	0.072	0.005	0.907	0.906	0.027	0.000	0.000	4.000	0.966	0.166
716	74	1.906	0.010	0.094	0.006	0.020	0.033	0.072	0.005	0.925	0.905	0.023	0.000	0.000	4.000	0.966	0.167
716	76	1.860	0.010	0.140	0.050	0.036	0.048	0.058	0.002	0.874	0.898	0.025	0.000	0.000	4.000	0.948	0.159
716	77	1.859	0.012	0.141	0.056	0.034	0.057	0.050	0.003	0.861	0.903	0.024	0.000	0.000	4.000	0.938	0.147
716	78	1.861	0.013	0.139</													

Sample	685-4	685-4	685-4	685-4	685-4	689	689	689	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750
SiO ₂	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.20	0.14	0.25		
TiO ₂	0.00	0.01	0.02	0.01	0.02	0.02	0.05	0.05	0.39	0.37	0.37	0.38	0.37	0.36	0.37	0.35	0.34	0.38	0.36	0.38	0.40	0.42	0.40	0.42	0.41			
Al ₂ O ₃	19.75	19.60	19.02	19.18	19.64	22.53	22.38	21.90	26.99	26.82	26.84	26.98	26.86	26.79	27.03	26.84	27.09	26.81	27.17	28.42	28.31	29.04	28.70					
Cr ₂ O ₃	45.35	45.25	44.41	44.35	45.06	44.10	44.18	43.68	36.85	36.86	36.29	36.83	36.79	36.50	36.06	36.47	35.79	36.55	35.99	35.47	37.18	36.72	35.68					
FeO	23.16	23.48	24.63	25.23	23.47	17.89	18.64	20.38	19.04	19.61	20.81	19.90	20.30	20.61	20.36	20.79	20.74	20.41	19.82	20.37	19.18	20.17	19.78					
MnO	0.21	0.27	0.38	0.36	0.19	0.15	0.09	0.20	0.66	0.65	0.59	0.58	0.60	0.68	0.64	0.53	0.69	0.67	0.67	0.73	0.69	0.67	0.77					
MgO	9.17	9.12	7.94	7.74	9.05	12.14	12.10	10.78	12.77	12.96	12.39	12.64	12.58	12.33	12.56	12.20	12.44	12.39	12.75	13.54	12.70	13.41	12.94					
CaO	0.01	0.00	0.00	0.04	0.02	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.03	0.00	0.00	0.00	0.03	0.01	0.04						
Na ₂ O	0.02	0.00	0.00	0.04	0.02	0.01	0.06	0.01	0.08	0.02	0.01	0.05	0.00	0.01	0.01	0.00	0.03	0.04	0.02	0.04	0.10	0.09	0.07					
K ₂ O	0.01	0.04	0.02	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00	0.02	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.00	0.00					
NiO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.21	0.23	0.26	0.16	0.25	0.16	0.10	0.23	0.18	0.20	0.13	0.18	0.13	0.17	0.21					
Total	97.68	97.77	96.42	96.98	97.47	96.86	97.50	97.02	97.02	97.52	97.57	97.53	97.79	97.46	97.14	97.45	97.30	97.48	96.91	99.20	99.68	100.58	98.57					
Formula units based on 32 Oxygens and Fe ²⁺ /Fe ³⁺ assuming full site occupancy																												
Sample	685-4	685-4	685-4	685-4	685-4	689	689	689	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	750	
Si	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.007	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.018	0.049	0.033	0.061			
Ti	0.000	0.002	0.004	0.002	0.004	0.004	0.010	0.010	0.073	0.069	0.069	0.071	0.069	0.067	0.069	0.065	0.063	0.071	0.067	0.068	0.073	0.075	0.075					
Al	6.061	6.015	5.970																									

بررسی‌های میکروسکوپی نشان می‌دهد که کانی‌های سازنده متالرزولیت‌ها الیوین، ترمولیت، کلینوپروکسن، اسپینل کروم‌دار، آنتی‌گوریت، مگنتیت، کلریت و در برخی موارد کلسیت بوده و متاهارزبورگیت‌ها از کانی‌های الیوین، ارتوپروکسن، تالک، آنتوفیلیت، آنتی‌گوریت، اسپینل کروم‌دار، مگنتیت و مقادیر اندکی

گرفتن از شرایط دما و فشار رخداد یک واکنش، احتمال دیده شدن شواهد انجام آن بسیار کاهش می‌یابد که علت آن فراوانی سیالات در محیط دگرگونی و انجام کامل واکنش‌ها به خاطر سهولت انتقال یون‌هاست.

بررسی‌های پترولوژی تجربی به‌دست آمده و ارائه آن‌ها در مورد سنگ‌های یک منطقه لزوماً نشان‌دهنده رخداد آن واکنش‌ها و هم‌خوانی با طبیعت نیست (Bucher and Frey, 1994; Spear, 1995). علاوه بر این، با فاصله



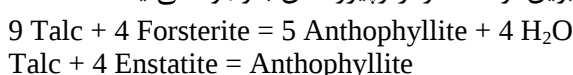
شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی متاپریدوتیت‌های افیولیت جندق؛ مخفف نام کانی‌ها برگرفته از Kretz (۱۹۸۳) است.

(Rollinson, 1993). اسپینل‌های کرم‌دار، اغلب مگنتیتی شده‌اند اما قسمت‌های درونی برخی از آن‌ها هنوز سالم هستند.

اغلب کلینوپیروکسن‌های موجود در پریدوتیت‌های مورد بررسی در اثر دگرگونی با آنتی‌گوریت واکنش داده و تبدیل به ترمولیت + الیوین شده‌اند (شکل ۴- C):

$$8 \text{ Diopside} + \text{Antigorite} = 18 \text{ Forsterite} + 4 \text{ Tremolite} + 27 \text{ H}_2\text{O}$$

ترمولیت‌های حاصل از واکنش فوق در برخی موارد بافت جک استروا (jack-straw texture) از خود نشان می‌دهند (شکل ۴- B). از دیگر آمفیبول‌های موجود در این پریدوتیت‌های سرپانتینی دگرگون شده می‌توان به آنتوفیلیت اشاره نمود که احتمالاً در اثر واکنش تالک و الیوین، و تالک و ارتوپیروکسن به وجود می‌آیند:

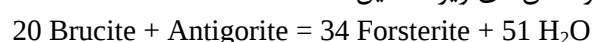


سرپانتین‌ها از فراوان‌ترین کانی‌های موجود در این متاپریدوتیت‌ها هستند که با توجه به محدوده پایداری کانی‌های مختلف گروه سرپانتین و انجام بررسی‌های XRD از نوع آنتی‌گوریت هستند. با افزایش درجه دگرگونی در سرپانتینیت‌ها، آنتی‌گوریت‌ها تبدیل به فورستریت + تالک می‌شوند:

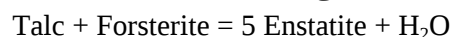


از دیگر کانی‌های موجود در این سنگ‌ها می‌توان به کلریت اشاره نمود که اغلب به صورت انباشته‌هایی در درون سرپانتین‌ها، همراه با ترمولیت‌ها و اسپینل‌های مگنتیتی و در حاشیه کلینوپیروکسن‌ها (شکل ۴- G) مشاهده می‌شوند. مهم‌ترین کانی‌های دارای Al_2O_3 در این سنگ‌ها کلریت‌ها و اسپینل‌های کروم‌دار هستند. کلریت‌ها در سنگ‌های دگرگون بسیار غنی از MgO همچون متاپریدوتیت‌ها، تا بخش‌های بالایی رخساره آمفیبولیت (۷۴۰ درجه سانتیگراد) نیز پایدار بوده (Spear, 1995) و جایگزین کانی‌هایی همچون

مرز نامنظم الیوین‌ها با سایر کانی‌ها و همچنین وجود ادخال‌هایی از مگنتیت در الیوین‌ها نشان از تشکیل الیوین‌های دگرگونی در اثر دگرگونی پیش‌رونده سنگ‌های پریدوتیتی است (Oliver *et al.*, 1972; Paktunc, 1984). سرپانتینی‌شدن بخش‌هایی از الیوین‌های دگرگون نشان‌دهنده رخداد دگرگونی پس‌رونده بعد از دگرگونی پیش‌رونده است. الیوین‌های موجود در سنگ‌های مورد بررسی احتمالاً در اثر رخداد واکنش‌های زیر تشکیل شده‌اند:



ارتوپیروکسن‌ها فقط در متاهارزبورگیت‌ها دیده شده و به صورت بلورهای بزرگ، منفرد و کشیده با بافت پوئی کیلوبلاستیک در همراهی کانی‌هایی مانند تالک، الیوین و آنتوفیلیت دیده می‌شوند. بخش‌هایی از حاشیه آن‌ها نیز سرپانتینی شده که بیانگر رخداد دگرگونی پس‌رونده پس از تشکیل ارتوپیروکسن‌های دگرگونی است. وجود ارتوپیروکسن‌ها در کنار الیوین و تالک (شکل‌های ۴- D و ۴- E)، و همچنین الیوین و آنتوفیلیت (شکل ۴- F) نشان از تشکیل آن‌ها در اثر رخداد واکنش‌های احتمالی زیر دارد (Pawley, 1998):



از بین کانی‌های اولیه پریدوتیت‌های گوشته، بخش‌هایی از کلینوپیروکسن‌ها (شکل ۴- A) و اسپینل‌های کروم‌دار (شکل ۴- H) سالم باقی‌مانده‌اند. کلینوپیروکسن‌ها کانی‌هایی هستند که در مقابل دگرسانی بسیار مقاوم بوده و در حین دگرگونی تا بخش‌های قابل توجهی از رخساره آمفیبولیت نیز بدون تغییر باقی می‌مانند (Leterrier *et al.*, 1982;

پیروکسن‌ها و آمفیبول‌های مورد بررسی در نمودارهای تقسیم‌بندی مربوطه نشان داده شده است.

بحث

بررسی اسپینل‌های کروم‌دار و کلینوپيروكسن‌ها که کانی‌های باقی‌مانده از پریدوتیت‌های گوشته اولیه در نظر گرفته می‌شوند نشان می‌دهد که سنگ‌های مورد مطالعه از نوع پریدوتیت‌های زیر پوسته اقیانوسی بوده و شبیه پریدوتیت‌های موجود در افیولیت‌ها و پریدوتیت‌های آلیپی هستند. ترکیب این کانی‌ها نیز از ترکیب آرایه‌های موجود در گوشته تبعیت می‌نماید (شکل ۶).

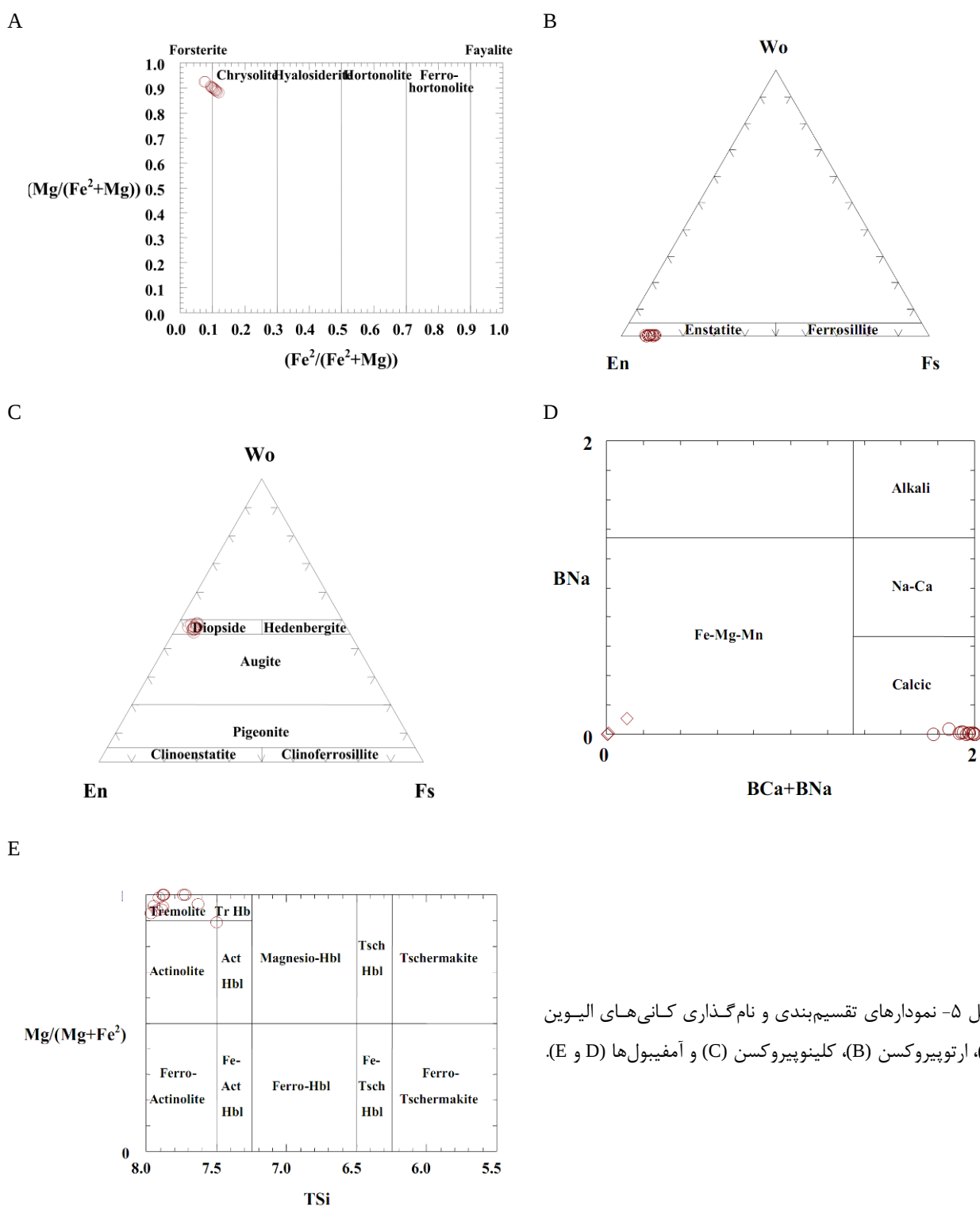
تعدادلات فازی دما پایین اولترابازیک‌ها توسط وجود کانی‌های گروه سرپانتین همچون لیزاردیت، آنتی‌گوریت و کریزوتیل مشخص می‌شود. در درجات پایین دگرگونی، کانی غالب گروه سرپانتین، لیزاردیت است و کریزوتیل اغلب به صورت فیبرهایی در درون رگه‌ها دیده می‌شود. با افزایش درجه دگرگونی، لیزاردیت ابتدا به لیزاردیت + کریزوتیل، سپس به کریزوتیل + آنتی‌گوریت و در نهایت به آنتی‌گوریت تبدیل می‌شود. لیزاردیت و کریزوتیل پلی‌مورف محسوب می‌شوند و با XRD قابل تفکیک نیستند، اما آنتی‌گوریت دارای ساختار متفاوتی است. لیزاردیت جایگزین الیوین و پزودومورف پیروکسن می‌شود در صورتی که کریزوتیل تمایل به تشکیل رگه داشته و سازنده اصلی بافت مشبک (Mesh Texture) است. با پیشرفت دگرگونی هر دو کانی فوق توسط آنتی‌گوریت جایگزین می‌شوند (Evans, 1977). تفکیک انواع کانی‌های گروه سرپانتین در مطالعات میکروسکوپی میسر نبوده و بررسی‌های XRD تنها وجود آنتی‌گوریت را در نمونه‌های آنالیز شده گزارش نمود.

اسپینل‌های کروم‌دار، ترمولیت و کلینوپيروكسن (شکل ۴-G) می‌شود.

برخلاف ارتوپيروكسن‌ها و الیوین‌های موجود در پریدوتیت‌های گوشته سالم، ارتوپيروكسن‌ها و الیوین‌های موجود در این سنگ‌ها فاقد بافت‌های دگرشکلی و استرین بوده و ارتوپيروكسن‌ها به صورت بلورهای کشیده و در برخی موارد شعاعی دیده می‌شوند.

در اثر هجوم سیالاتی که دارای SiO_2 و فوگاسیته بالای دی اکسید کربن ($f \text{CO}_2$) بوده‌اند بخش‌هایی از پریدوتیت‌ها که در محل گسل‌ها قرار داشته‌اند، تبدیل به لیستونیت شده‌اند. اما توسعه لیستونیت‌ها در این افیولیت بسیار کمتر از افیولیت‌هایی همچون انارک، عشین-زوار و نایین است. کانی‌های سازنده لیستونیت‌های افیولیت جندق، کلسیت، دولومیت، اسپینل کرم‌دار، سرپانتین، مگنتیت، کلریت، مالاکیت، آزوریت و ترمولیت است. در فرمول ساختاری این دولومیت‌ها مقدار کاتیون‌های Ca و Mg با یکدیگر برابر است.

بررسی شیمی کانی‌های سازنده این سنگ‌ها نشان می‌دهد که الیوین‌ها از نوع فورستريت و کریزولیت (مقدار فورستريت ۰/۸۸ تا ۰/۹۱) (جدول ۱)، ارتوپيروكسن‌ها از نوع انستاتیت (جدول ۲)، و آمفیبول‌ها از نوع ترمولیت و آنتوفیلیت (جدول ۳) هستند. سرپانتین‌ها دارای محدوده گسترده‌ای از Mg# (۰/۸۹ تا ۰/۹۸) بوده (جدول ۴)، در حالی که Mg# همه تالک‌ها ۰/۹۸ است (جدول ۵). کلریت‌ها از نوع پنینیت (جدول ۶) و کلینوپيروكسن‌ها از نوع دیوپسید هستند (جدول ۷). اسپینل‌ها دارای Al_2O_3 قابل توجهی بوده و مقدار Cr# آن‌ها ۰/۴۶ تا ۰/۶۱ است (جدول ۸). یکی از سرپانتین‌های آنالیز شده غنی از Al_2O_3 (۴/۱۲ درصد) بوده (جدول ۴)، و مقدار Si در فرمول ساختاری ترمولیت‌های پریدوتیت‌های مورد بررسی ۷/۵۰ تا ۷/۹۷ است (جدول ۳). در شکل ۵ موقعیت ترکیبی الیوین‌ها،

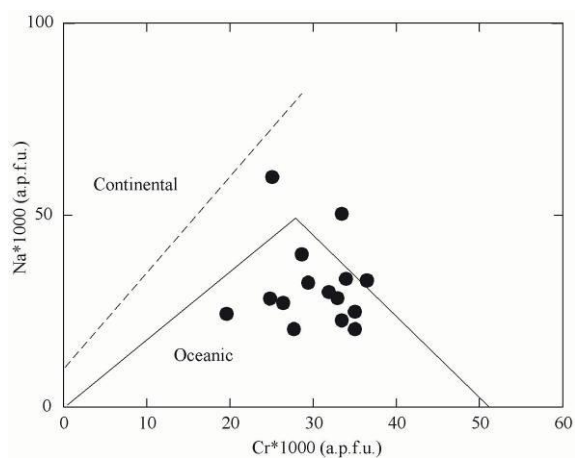


شکل ۵- نمودارهای تقسیم‌بندی و نام‌گذاری کانی‌های الیوین (A)، ارتوپروکسن (B)، کلینوپروکسن (C) و آمفیبول‌ها (D و E).

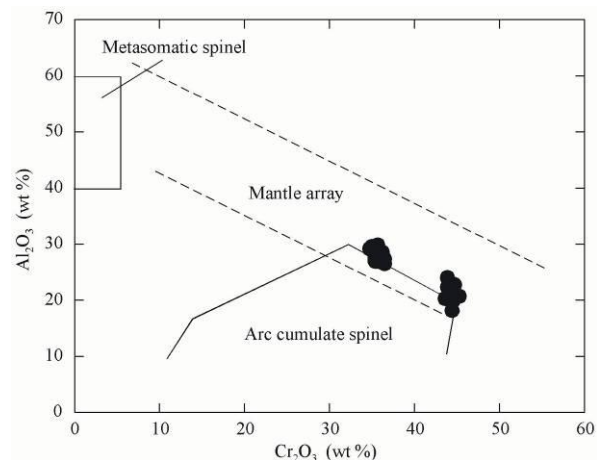
آورده شده است (جدول‌های ۹ و ۱۰). بر اساس این منابع همیافتی‌های موجود در سنگ‌های مورد بررسی بیانگر رخساره دگرگونی آمفیبولیت هستند.

رابطه بین رخساره‌های دگرگونی و کانی‌های موجود در پریدوتیت‌های دگرگون به‌صورت جدول‌هایی در منابعی همچون Evans (۱۹۷۷) و Spear (۱۹۹۵)

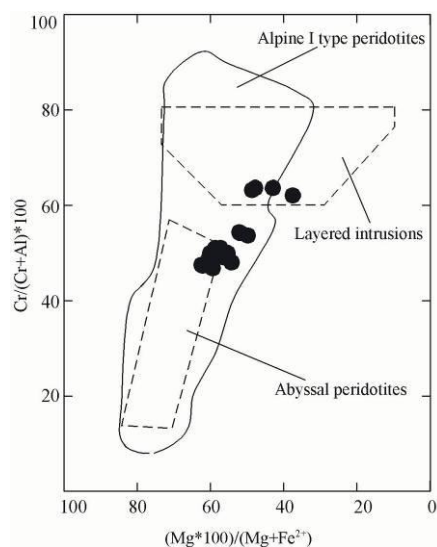
A



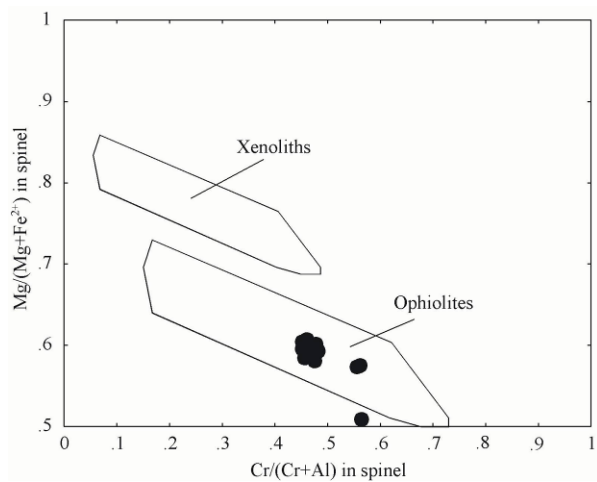
B



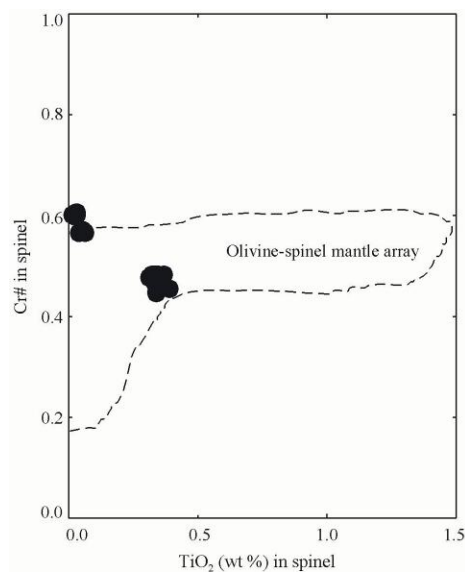
C



D



E



شکل ۶- نمودارهای مرتبط با شیمی کلینوپیروکسن‌ها (A) و اسپینل‌ها (B-E). نمودار A بیانگر تعلق کلینوپیروکسن‌ها به گوشته زیر پوسته اقیانوسی است (Kornprobst *et al.*, 1981). نمودارهای B، C، D و E نیز نشان‌دهنده پیروی ترکیب شیمیایی اسپینل‌ها از آرایه گوشته (Conrad and Key, 1984; Haggerty, 1988; Kepezhinskas *et al.*, 1995)، تعلق پریدوتیت‌های مورد بررسی به پریدوتیت‌های آلپی (Dick and Bullen, 1984)، افیولیت بودن سنگ‌های مورد بررسی (Cabanes and Mercier, 1988) و قرار گرفتن ترکیب اسپینل‌ها در محدوده آرایه الوین-اسپینل گوشته‌ای (Dick and Bullen, 1984) است.

جدول ۹- رابطه بین رخساره‌های دگرگونی و کانی‌شناسی سنگ‌های اولترابازیک (برگرفته از Evans (۱۹۷۷)).

zeolite pumpellyite		lizardite/chrysotile serpentinite
blueschist "low" greenschist		brucite-antigorite serpentinite
"low" eclogite "high" greenschist		diopside-antigorite peridotite
amphibolite hornblende hornfels		tremolite peridotite
pyroxene hornfels		plagioclase lherzolite
pyroxene granulite	{ opx + plag cpx + gt	spinel lherzolite { Seiland subfacies Ariegite subfacies
"high" eclogite		garnet lherzolite

جدول ۱۰- رابطه بین همیافتی‌های کانی‌شناسی و رخساره‌های دگرگونی در سنگ‌های اولترابازیک (برگرفته از Spear (۱۹۹۵)).

Facies	Paragenesis	Al-phase	Si content of Ca-amphibole
Sub-greenschist	Chrysotile + Talc + Tremolite	Chlorite	8.0-7.9
Greenschist and blueschist	Brucite + Antigorite + Diopside Forsterite + Antigorite + Diopside	Chlorite Chlorite	8.0-7.9
Amphibolite	Forsterite + Antigorite + Tremolite Forsterite + Talc + Tremolite Forsterite + Anthophyllite (or Magnesio-cummingtonite) + Tremolite Forsterite + Orthopyroxene + Tremolite Forsterite + Orthopyroxene + Hornblende	Chlorite Chlorite Chlorite/Chromite Chlorite/Chromite Spinel	8.0-7.8 7.9-7.5 7.6-6.5
Pyroxene hornfels (low P) Granulite (intermediate P)	Forsterite + Orthopyroxene + Clinopyroxene Forsterite + Orthopyroxene + Clinopyroxene + Hornblende	Plagioclase Spinel	6.6-5.9
Eclogite (high P)	Forsterite + Orthopyroxene + Clinopyroxene	Garnet	

ارتوپروکسن + آنتوفیلیت از شواهد دگرگونی در بخش‌های بالایی رخساره آمفیبولیت است (Evans, 1977; Spear, 1995).

۲- وجود کلریت‌های غنی از منیزیم و کروم اسپینل‌های با آلومینیوم قابل توجه (۱۹ تا ۲۹ درصد وزنی) نشان می‌دهد که دگرگونی پیش‌رونده در نزدیکی دمای ۷۲۰ درجه سانتیگراد رخ داده است (Forst, 1975; Sanford, 1982; Tracy et al., 1984).

۳- انجام واکنش ترمولیت + الیوین = ارتوپروکسن + آب در متاپریدوتیت‌های افیولیت جندق نشان می‌دهد که دگرگونی، دمای ۷۰۰ درجه سانتیگراد را پشت سر

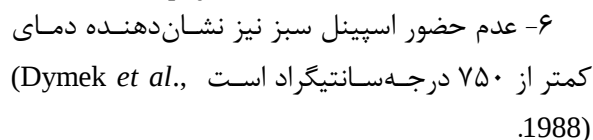
تاکنون دما- فشار سنج‌های مختلفی در مورد برآورد دما و فشار دگرگون شدن سنگ‌های پریدوتیتی ارائه شده است که همگی مربوط به رخساره‌های اکلوزیت، گرانولیت و پیروکسن هورنفلس هستند و متأسفانه دما- فشارسنجی که قابل استفاده برای رخساره آمفیبولیت باشد وجود ندارد. به همین دلیل بهتر است که شواهد میکروسکوپی و همیافت‌های کانیایی مورد استفاده قرار گیرند (Bucher and Frey, 1994).

وجود شواهد زیر در بررسی‌های پتروگرافی نیز نشان‌دهنده شرایط دما و فشار رخساره آمفیبولیت است:

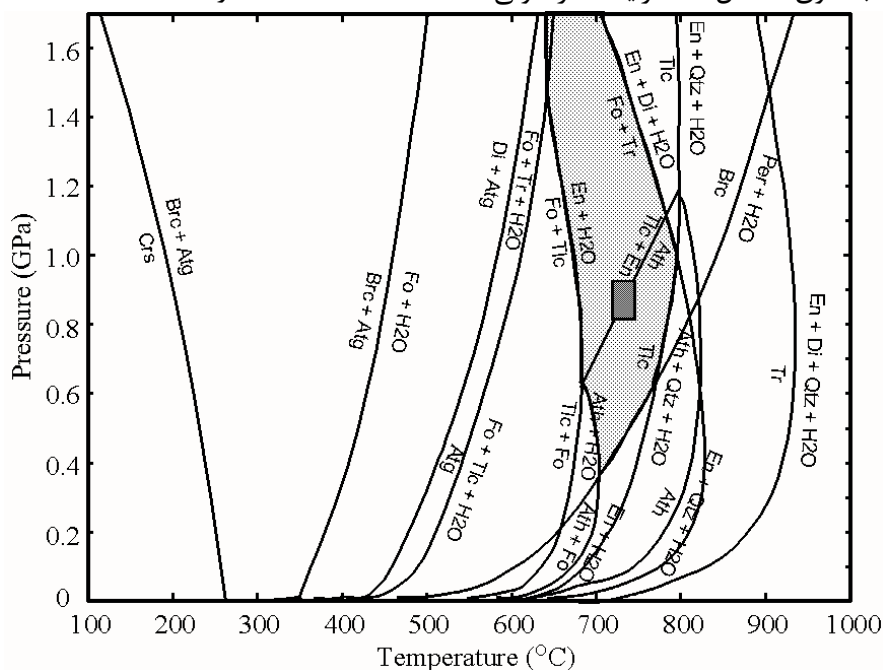
۱- مجموعه کانیایی ترمولیت + الیوین، و الیوین +

بررسی آمفیبولیت‌های موجود در افیولیت جندق (شمال شرق استان اصفهان) نیز نشان از دگرگون شدن آن‌ها در رخساره آمفیبولیت دارد. فشار و دمای دگرگونی محاسبه شده در مورد این آمفیبولیت‌ها در محدوده ۷/۹۸ تا ۹/۰۱ کیلو بار و ۷۱۴ تا ۷۳۷ درجه سانتیگراد بوده است (شکل‌های ۷ و ۸). به منظور دماسنجی آمفیبول‌ها از کالیبراسیون ارائه شده توسط (Holland and Blundy, 1994) و در فشارسنجی آمفیبول‌ها از مطالب ارائه شده توسط Anderson و Smith (۱۹۹۵) و Schmidt (۱۹۹۳) استفاده شد.

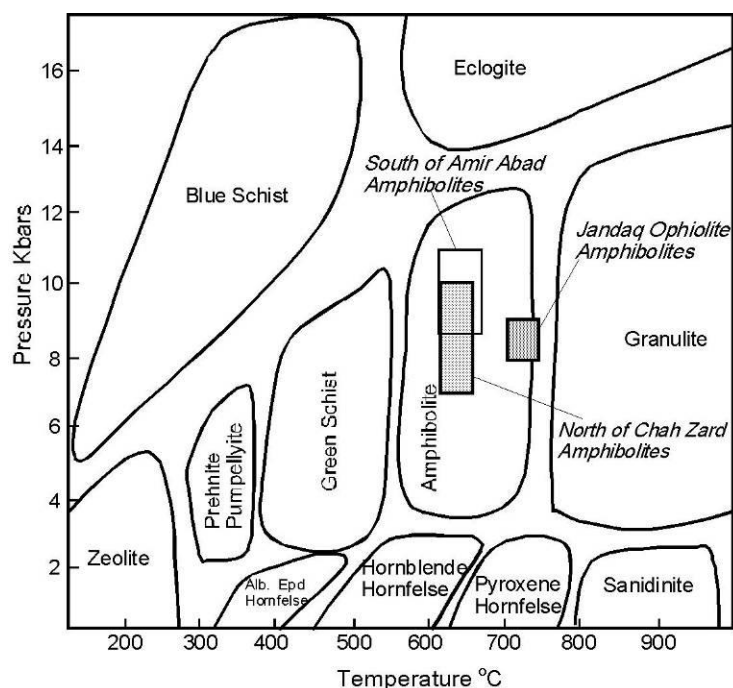
۵- عدم حضور کوارتز و دیوپسیدهای دگرگونی، به همراه حضور تالک نشان می‌دهد که واکنش‌های زیر انجام نشده و دمای دگرگون شدن این سنگ‌ها از ۸۰۰ درجه سانتیگراد فراتر نرفته است.



با توجه به مطالب فوق، شکل ۷ شرایط دگرگونی،



شکل ۷- شبکه پتروژئیک سنگ‌های اولترابازیک اشباع از آب در سیستم $\text{CaO-MgO-SiO}_2\text{-H}_2\text{O}$. این نمودار در مورد پریدوتیت‌های ایده‌آل گوشته (لرزلیت) به کار برده می‌شود و محدوده دما و فشار متاپریدوتیت‌های افیولیت جندق در آن به‌صورت هاشوردار دیده می‌شود. این محدوده توسط بررسی‌های پتروگرافی ترسیم شده و مستطیل کوچک حاصل بررسی‌های دما-فشارسنجی آفیبولیت‌های این مجموعه افیولیتی است (تاری، ۱۳۸۶) (نمودار برگرفته از: Spear (۱۹۹۵) است).



شکل ۸- نمودار رخساره‌های دگرگونی و شرایط دگرگونی آمفیبولیت‌های مختلف موجود در منطقه جندق (ترابی، ۱۳۸۶) (نمودار برگرفته از Yardley (۱۹۸۹) است).

نتیجه‌گیری

در بررسی آمفیبولیت‌ها با استفاده از دما- فشارسنجی زوج‌کانی آمفیبول- پلاژیوکلاز سعی بر تعیین مقدار دما و فشار دگرگونی به‌صورت بسیار دقیق‌تر از روابط فازی شده است.

سپاسگزاری

نویسنده مقاله از حمایت‌های معاونت پژوهش و فن‌آوری دانشگاه اصفهان تشکر می‌نماید.

بررسی پریدوتیت‌های گوشته افیولیت جندق نشان می‌دهد که این سنگ‌ها اغلب متالرزولیت (بیشتر) و متاهارزبورگیت (کمتر) بوده و در شرایط دما و فشار بخش‌های بالایی رخساره آمفیبولیت دگرگون شده‌اند. نتایج حاصل از این بررسی با نتایج مطالعه آمفیبولیت‌های این مجموعه افیولیتی در تطابق است.

منابع

- ترابی، ق. (۱۳۸۶) تعیین شرایط فشار و دمای تشکیل آمفیبولیت‌های افیولیت جندق (شمال شرق استان اصفهان) با استفاده از دماسنجی و فشارسنجی کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز. مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران ۱: ۱۱۷-۱۳۴.
- هاتف، م. (۱۳۷۴) زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های آذرین و دگرگونی منطقه خور- جندق (ایران مرکزی). پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه اصفهان، اصفهان، ایران.
- Anderson, J. L. and Smith, D. R. (1995) The effect of temperature and oxygen fugacity on Al-in hornblende barometry. *American Mineralogist* 80: 549-59.
- Bagheri, S. (2007) The exotic Paleo-tethys terrane in Central Iran: new geological data from Anarak, Jandaq and Posht-e-Badam areas. Ph.D. Thesis, University of Leusanne, Switzerland.
- Bucher, K. and Frey, M. (1994) *Petrogenesis of metamorphic rocks*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg.

- Cabanes, N. and Mercier, J. C. C. (1988) Insight into the upper mantle beneath an active extensional zone: the spinel-peridotite xenoliths from San Quintin (Baja California, Mexico). *Contributions to Mineralogy and Petrology* 100: 374-382.
- Conrad, W. K. and Kay, R. W. (1984) Ultramafic and mafic inclusions from Adak Island: crystallisation history and implications for the nature of primary magmas and crustal evolution in the Aleutian arc. *Journal of Petrology* 25: 88-125.
- Davoudzadeh, M. (1997) Geology of Iran. In: Moores, E. M. and Fairbridge, R. W. (Eds.): *Encyclopedia of Asian and European regional geology*. Chapman and Hall, London, 384-405.
- Dick, H. J. B. and Bullen, T. (1984) Chromian spinel as a petrogenetic indicator in abyssal and alpine-type peridotites and spatially associated lavas. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 86: 54-76.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe^{3+} concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51: 431-435.
- Dymek, R. F., Brothers, S. C. and Schiffries, C. M. (1988) Petrogenesis of ultramafic metamorphic rocks from the 3800 Ma Isua Supracrustal Belt, West Greenland. *Journal of Petrology* 29(6): 1353-1397.
- Evans, B. W. (1977) Metamorphism of alpine peridotite and serpentinite. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 5: 397-445.
- Frost, B. R. (1975) Contact metamorphism of serpentinite, chlorite blackwall and roedingite at Paddy-Go-Easy pass, Central Cascades, Washington. *Journal of Petrology* 16: 272-313.
- Haggerty, S. E. (1988) Upper mantle opaque mineral stratigraphy and the genesis of metasomatites and alkali-rich melts. *Journal of Geological Society of Australia* 14: 687-699.
- Holland, T. and Blundy, J. (1994) Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116: 433-47.
- Kepezhinskas, P. K., Defant, M. J. and Drummond, M. S. (1995) Na metasomatism in the island-arc mantle by slab melt-peridotite interaction: evidence from mantle xenoliths in the North Kamchatka arc. *Journal of Petrology*, 36: 1505-1527.
- Kornprobst, J., Ohnenstetter, D. and Ohnenstetter, M. (1981) Na and Cr contents in Cpx from peridotites: a possible discriminant between sub-continental and sub-oceanic mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 53: 241-254.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68: 277-279.
- Leterrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D. and Marchal, M. (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters* 59(1): 139-154.
- Lindsley, D. H. (1983) Pyroxene thermometry. *American Mineralogist* 68: 477-493.
- Mancini, F., Marshall, B. and Papunen, H. (1996) Petrography and metamorphism of the Saaksjarvi ultramafic body, Southwest Finland. *Mineralogy and Petrology* 56: 185-208.
- Melcher, F., Meisel, T., Puhl, G. and Koller, F. (2002) Petrogenesis and geotectonic setting of ultramafic rocks in the Eastern Alps: constraints from geochemistry. *Lithos* 65(1-2): 69-112.
- Oliver, R. L., Nesbitt, R. W., Hausen, D. M. and Franzen, N. (1972) Metamorphic olivine in ultramafic rocks from Western Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 36(4): 335-342.
- Paktunc, A. D. (1984) Metamorphism of the ultramafic rocks of the Thompson Mine, Thompson nickel belt, northern Manitoba. *The Canadian Mineralogist* 22(1): 77-91.
- Pawley, A. R. (1998) The reaction talc + forsterite = enstatite + H_2O : New experimental results and petrological implications. *American Mineralogist* 83: 51-57.

- Pessagno, E. A. Jr., Ghazi, A. M., Kariminia, S. M., Duncan, R. A. and Hassanipak, A. A. (2004) Tectonostratigraphy of the Khoy complex, Northwestern Iran. *Stratigraphy* 1(2): 49-63.
- Rollinson, H. (1993) *Using Geochemical data: Evolution, presentation, interpretation*. Longman Scientific and Technical, London.
- Sanford, R. F. (1982) Growth of ultramafic reaction zones in greenschist to amphibolite facies metamorphism. *American Journal of Science* 282: 543-616.
- Schmidt, M. W. (1993) Phase relations and compositions in tonalite as a function of pressure: an experimental study at 650 °C. *American Journal of Science* 293: 1011-60.
- Scotford, D. M. and Williams, J. R. (1983) Petrology and geochemistry of metamorphosed ultramafic bodies in a portion of the Blue Ridge of North Carolina and Virginia. *American Mineralogist* 68(1-2): 78-94.
- Spear, F. S. (1995) *Metamorphic Phase Equilibria and Pressure-Temperature-Time Paths*. Mineralogical Society of America, Washington.
- Technoexport (1979) *Geology and minerals of Jandaq area (Central Iran)*. Geological Survey of Iran, V/O "Technoexport", Report TE/No. 4.
- Technoexport (1984) *Outline of metallogeny of Anarak area (Central Iran)*. Geological Survey of Iran, V/O "Technoexport", Report TE/No. 21.
- Torabi, G. (2009) Chromitite potential in mantle peridotites of the Jandaq ophiolite (Isfahan province, Central Iran). *Comptes Rendus Geoscience* 341: 982-992.
- Tracy, R. J., Robinson, P. and Wolff, R. A. (1984) Metamorphosed ultramafic rocks in the Bronson Hill anticlinorium, central Massachusetts. *American Journal of Science* 284: 530-558.
- Yardley, B. W. D. (1989) *An introduction to metamorphic petrology*. Longman, London.

Metamorphism of mantle peridotites in Jandaq ophiolite (Central Iran)

Ghodrat Torabi *

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

Abstract

Jandaq ophiolite is one of the old ophiolites in Iran belonging to Proterozoic and Paleozoic, and subjected to different phases of metamorphism. The studied ophiolite is covered by Paleozoic schists and marbles and the mantle peridotite is one of the most predominant rock unit of the Jandaq ophiolite. The presence of metamorphic olivine and metamorphic orthopyroxene, tremolite formation, talc, anthophyllite, chlorite and antigorite in these peridotites reveal their metamorphism in amphibolite facies. Clinopyroxenes and Cr-spinels are resistant against metamorphism and are relicts of preliminary igneous mineralogy. The results of metamorphism study on the mantle peridotites, are in consistent with petrography and geothermobarometry of plagioclase-amphibole data in Jandaq ophiolite amphibolites.

Key words: Metamorphism, Mantle peridotite, Ophiolite, Jandaq, Central Iran

* torabighodrat@sci.ui.ac.ir