

پتروولوژی، سال هفتم، شماره بیست و پنجم، بهار ۱۳۹۵، صفحه ۱۱۷-۱۳۸
تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۴/۰۷/۰۱

شیمی کانی و دما-فشارسنجی سنگ‌های میگماتیتی منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج-سیرجان)

عارفه حیدریان‌منش، زهرا طهماسبی * و احمد احمدی خلجی
گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه لرستان، خرم‌آباد، ایران

چکیده

میگماتیت‌ها، بخش مهمی از دگرگونی درجه بالای هاله دگرگونی بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان) را تشکیل داده‌اند. مجموعه میگماتیتی، دربردارنده میگماتیت‌ها، میگماتیت‌های تحول‌یافته از شیست‌ها و میگماتیت‌های تحول‌یافته از هورنفلس‌ها با تنوع ساختاری و کانی‌شناسی است. این سنگ‌ها به صورت بخش‌های روشن (لوکوسوم)، تیره (ملانوسوم) و تیره و روشن (مزوسوم) دیده می‌شوند. بخش روشن عمدتاً از کانی‌های کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت و مسکوویت تشکیل شده است و بافت پریتیت، پویی کیلوبلاستیک، گرانوبلاستیک، گرافیکی و میرمکیتی دارد. ملانوسوم‌ها، بیوتیت، گارنت، آندالوزیت، سیلیمانیت و تورمالین هستند و بافت لپیدوبلاستیک، پورفیروپیدوبلاستیک و لپیدوپورفیروپلاستیک دارند. در مزوسوم‌ها علاوه بر کانی‌های تیره، بیش‌تر کانی‌های تشکیل‌دهنده بخش روشن نیز مشاهده می‌شود و معمولاً بافت پورفیروپلاستیک، لپیدوبلاستیک و گرانوبلاستیک نشان می‌دهند. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های پتروگرافی و تجزیه شیمیایی سنگ کل، سنگ مادر غالب آنها سنگ‌های پلیتی بوده است. نتایج دما - فشارسنجی به‌دست‌آمده، محدوده دمایی ۵۶۸ تا ۶۶۲ درجه سانتیگراد و فشار ۲/۸ تا ۳/۳ کیلو بار را نشان می‌دهد. با توجه به دما و فشار محاسبه‌شده، گرادیان زمین‌گرایی به ترتیب برای شیست‌های میگماتیتی و میگماتیت‌ها ۴۸ و ۶۰ درجه سانتیگراد بر کیلومتر است. انتشار حرارت ناشی از توده بروجرد و ماگماتیسیم مافیک (که انکلاوهایی از آنها در گرانیتهای دیده می‌شود) و سیالات فرورانشی، سبب ایجاد میگماتیت‌ها شده است. عامل اصلی افزایش گرادیان زمین‌گرایی، وجود توده‌های آذرین داغ و ورود سیالات توده نفوذی در قوس‌های ماگمایی است.

واژه‌های کلیدی: ژئوترموبارومتری، ذوب‌بخشی، میگماتیت، قوس ماگمایی، بروجرد، پهنه سنندج-سیرجان

مقدمه

فرایندهای زمین‌شناسی است. در این راستا میگماتیت‌ها و تعیین درجه حرارت و فشار تشکیل آنها می‌تواند پترولوژیست‌های دگرگونی را در تعیین اوج دگرگونی

یکی از اهداف مهم پترولوژیست‌ها، تعیین دقیق شرایط فیزیکی حاکم بر تشکیل سنگ‌ها و ارتباط آن با

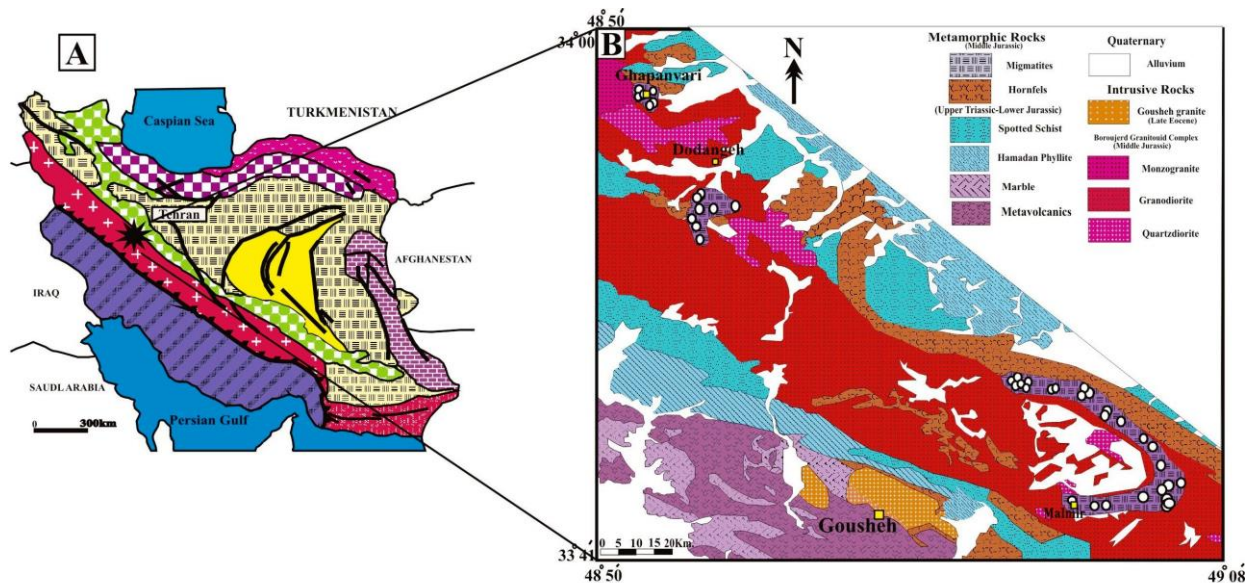
* tahmasebi.z@lu.ac.ir

Copyright©2016, University of Isfahan. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>), which permits others to download this work and share it with others as long as they credit it, but they cannot change it in any way or use it commercially.

به کارگرفتن روش‌های دما و فشارسنجی برای مجموعه کانی‌های بدون تعادل و روابط بافتی خوب شناخته‌نشده احتمالاً بزرگ‌ترین علت خطا در برآورد P-T است. متأسفانه نمی‌توان وجود تعادل را به‌طور صد درصد ثابت کرد، اما می‌توان با برخی شواهد، نبودن تعادل را شناخت (Spear and Peacock, 1989; Seifert, 1978).

منطقه مورد مطالعه در شرق و جنوب شرق شهرستان بروجرد بین طول‌های جغرافیایی $48^{\circ}50'$ تا $49^{\circ}8'$ شرقی و عرض‌های جغرافیایی $33^{\circ}41'$ تا $34^{\circ}11'$ شمالی قرار دارد (شکل ۱) و از نظر زمین‌شناسی به‌عنوان بخشی از دگرگونی‌های مزوزویک در بخش شمالی پهنه سنندج - سیرجان در زیر پهنه با دگرشکلی پیچیده است (شکل ۱- A) (Mohajjel, 1997).

یاری کند. از سوی دیگر به‌علت آن که میگماتیت‌ها در شرایط متفاوتی به‌وجود می‌آیند، تعیین دما و فشار انواع میگماتیت‌ها می‌تواند در شناخت فرایندهای دگرگونی، ذوب و عملکرد سیالات در پوسته زمین مفید باشد. بیش‌تر محاسبات دماسنجی و فشارسنجی در زمین‌شناسی بر اساس شرایط تعادلی و روابط ترمودینامیکی انجام می‌شود و دماسنج‌ها بر اساس واکنش‌های تبادل کاتیون و به‌ویژه تبادل Mg و Fe در بین کانی‌ها بنا شده‌اند (Spear, 1993). این واکنش‌ها ΔV کوچک و تغییرات آنتالپی و آنتروپی بزرگی دارند. روش‌های دماسنجی و فشارسنجی را تنها زمانی می‌توان به کار برد که بافت کانی‌ها در سنگ و روابط پاراژنتیکی بین کانی‌های موجود در سنگ به‌خوبی شناخته شده باشد و مجموعه کانی‌های سنگ مورد مطالعه در حالت تعادل باشند (Will, 1998).



شکل ۱- A) موقعیت سنگ‌های میگماتیتهای منطقه بروجرد در شمال پهنه سنندج - سیرجان؛ B) نقشه ساده‌شده از زمین‌شناسی منطقه بروجرد (برگرفته از Ahmadi Khalaji (۲۰۰۶) با اندکی تغییرات). دایره سفید، موقعیت نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

سنگ‌های آذرین اسیدی در منطقه، گرانودیوریت، مونزوگرانیت، آپلیت و پگماتیت هستند (شکل ۱- B) و سنگ‌های بازیک، دایک‌های دلریتی و گابرو (به‌صورت انکلاوهای بزرگ درون کوارتزیدیوریت‌ها) هستند.

سنگ‌های دگرگونی این منطقه، سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای عمدتاً تشکیل شده از اسلیت، فیلیت و انواع شیست و سنگ‌های مجاورتی شیست لکه‌دار و انواع هورنفلس همراه با میگماتیت هستند (شکل ۱- B).

کانی‌ها، دما - فشارسنجی و شیوه به‌وجودآمدن میگماتیتهای بروجرد، بررسی شود.

روش انجام پژوهش

برای دستیابی به اهداف این پژوهش، از تعداد ۳۰ نمونه سنگ میگماتیتهی منطقه بروجرد مقطع نازک - صیقلی تهیه شد و کانی‌های شاخص موجود در این سنگ‌ها تجزیه نقطه‌ای شد. تجزیه‌های شیمیایی نقطه‌ای با یک دستگاه ریزپردازنده نوع Cameca-Sx100 در آزمایشگاه شرکت فراوری مواد معدنی ایران با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ KV و شدت جریان ۲۰ nA انجام شده است. رابطه کانی‌ها برای کلریت، کلدیریت، گارنت، میکا (بیوتیت و مسکوویت)، آندالوزیت و پلاژیوکلاز به ترتیب بر اساس ۱۴، ۱۴، ۲۴، ۲۲، ۱۸، ۵ و ۸ اتم اکسیژن محاسبه شده است.

ترکیب فعالیت اعضای نهایی کانی‌ها و نسبت Fe^{3+}/Fe^{2+} با برنامه کامپیوتری Ax (Droop, 1987) تعیین شده است. فعالیت میکای سفید با مدل van Laar (Coggon and Holland, 2002) و بیوتیت با مدل اختلاط ایده‌آل سایت A_1M_1 محاسبه شده است. در جدول‌های ۱ تا ۶ داده‌های ریزپردازش کانی‌ها آمده است. برای تعیین سنگ مادر میگماتیتهای، تعداد ۱۰ نمونه از آنها انتخاب و با روش XRF در سازمان زمین‌شناسی کشور، تجزیه شیمیایی شد (جدول ۷). دستگاه اندازه‌گیری مدل SRS-303 ساخت زمینس است. نمونه‌ها پس از پودر شدن تا ۲۰۰- مش از طریق اختلاط با چسب مناسب (WAX-C) که یک پلیمر آلی است، پرس می‌شوند و به‌صورت قرص همگن در می‌آیند. در تجزیه نمونه‌ها، کالیبراسیون از طریق به‌کارگرفتن استانداردهای خارجی انجام شده است. زمان اندازه‌گیری برای عناصر، بین ۴۰ تا ۶۰ ثانیه تغییر کرده است.

Berthier و همکاران (۱۹۷۴)، میگماتیتهای منطقه بروجرد را پهنه سلیمانیت منشوری معرفی کرده‌اند و Masoudi (۱۹۹۷) نیز ضمن اشاره به‌وجود پهنه میگماتیتهی در شمال شرق توده نفوذی بروجرد در مقیاس کم، آن را بخشی از پهنه سلیمانیت می‌داند. Ahmadi Khalaji (۲۰۰۶) این پهنه میگماتیتهی را در بخش شمالی توده گرانیتوئیدی بروجرد بررسی کرده است بیان می‌کند که این پهنه، مجموعه‌ای تشکیل شده از میگماتیتهای تزریقی با ساخت چین‌های جریانی (پتیگماتیتهی) است. مطالعات Ghafari (۲۰۱۰) بخش شرقی توده نفوذی گرانیتوئیدی را شامل می‌شود که میگماتیتهای منطقه را عمدتاً از نوع لخته‌ای و انواع دیگر را نیز به‌صورت پراکنده معرفی می‌کند. Baharifar و Ghafari (۲۰۱۰) به‌وجود کرن‌دوم حاصل از شکسته‌شدن موسکوویت در این سنگ‌ها اشاره کرده‌اند و آن را شاهدهی بر آغاز رخساره گرانولیت در منطقه و همچنین، احتمال تشکیل میگماتیتهای بر اثر ذوب‌بخشی می‌دانند.

Heydarianmanesh و همکاران (۲۰۱۴) مطالعات بیش‌تری روی سنگ‌های ذکرشده انجام داده‌اند و بر اساس شواهد صحرایی و ماکروسکوپی، میگماتیتهای منطقه را به دو نوع تقسیم کرده‌اند: نوع اول، میگماتیتهای زبانه‌ای (متاتکسیت‌ها) که لایه‌بندی در آنها حفظ شده است و عموماً حاصل جدایش ماگما (نئوسوم یا لوکوسوم) طی دگرشکلی هستند. نوع دوم، میگماتیتهای دیاتکسیت (انبوه‌های بلور - مذاب بدون برگوارگی) که لایه‌بندی آنها تقریباً محو شده است. دیاتکسیت‌ها احتمالاً از مذاب، بلورهای نهشته‌شده، رستیت و رسوب بازمانده یا ذوب‌ناشدنی‌ها (مواد جامدی که در تأثیر فرایند ذوب قرار نگرفته‌اند) تشکیل شده‌اند. در این پژوهش سعی شده است بر اساس مطالعات صحرایی، پتروگرافی، تجزیه‌های شیمی سنگ کل و

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای فلدسپار موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروگرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری و اعضای نهایی آن.

Sample No.	migmatite rocks GH13		schist migmatites HM23				
	kfs	kfs	Pl	Pl	Pl	Pl	Pl
Analysis No.	16	17	6	7	8	14	15
SiO ₂	48.61	48.58	66.21	65.52	65.34	67.21	67.28
TiO ₂	0.85	0.83	0.00	0.01	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	37.48	37.29	20.21	21.72	21.82	20.50	21.05
FeO	1.18	1.17	0.11	0.01	0.05	0.07	0.00
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
MgO	0.49	0.43	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00
CaO	0.01	0.01	2.86	2.93	3.64	0.56	2.15
Na ₂ O	0.39	0.27	11.01	10.59	9.79	12.47	10.06
K ₂ O	10.34	10.21	0.14	0.09	0.14	0.07	0.07
Sum	99.48	98.92	100.54	100.87	100.80	100.88	100.61
Si	2.24	2.24	2.91	2.87	2.85	2.93	2.93
Ti	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	2.03	2.03	1.05	1.12	1.13	1.05	1.08
Fe ⁽³⁺⁾	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.02
Fe ⁽²⁺⁾	0.05	0.05	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.14	0.14	0.17	0.03	0.10
Na	0.04	0.02	0.94	0.90	0.83	1.05	0.85
K	0.61	0.60	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Sum	5.02	5.00	5.04	5.11	4.99	5.07	4.96
X _{ab}	0.05	0.04	0.87	0.86	0.82	0.97	0.89
X _{an}	0.00	0.00	0.12	0.13	0.17	0.02	0.11
X _{or}	0.95	0.96	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00

جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای مسکوویت موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروگرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری و اعضای نهایی آن.

Sample No.	migmatite rocks GH13		schist migmatites HM23	
	Mus	Mus	Mus	Mus
Analysis No.	29	30	12	13
SiO ₂	60.28	47.40	44.30	43.60
Al ₂ O ₃	27.35	35.60	0.01	0.01
MgO	0.36	0.43	33.10	31.60
FeO	0.70	0.92	4.81	5.88
TiO ₂	0.19	0.24	0.07	0.08
MnO	0.00	0.01	2.94	3.35
CaO	0.03	0.01	0.05	0.05
Na ₂ O	0.87	1.26	0.21	0.11
K ₂ O	6.56	8.42	8.78	9.44
Sum	96.41	94.40	94.30	94.10
Si	3.78	3.14	3.38	3.36
Al ^{IV}	0.22	0.86	0.62	0.64
Al ^{VI}	1.80	1.92	2.35	2.23
Mg	0.03	0.04	0.00	0.00
Fe ⁽³⁺⁾	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁽²⁺⁾	0.04	0.05	0.27	0.34
Ti	0.01	0.01	0.01	0.01
Mn	0.01	0.01	0.33	0.39
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	0.11	0.16	0.03	0.02
K	0.52	0.71	0.85	0.93
Sum	6.53	6.91	7.86	7.91

جدول ۳- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای بیوتیت موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرده (شمال پهنه سنندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری.

Sample No.	Migmatite rocks GH13			schist migmatites HM23			
	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt	Bt
Analysis No.	18	25	28	34	1	2	3
SiO ₂	34.79	33.53	34.90	34.94	34.79	33.53	34.90
Al ₂ O ₃	19.92	19.35	23.00	20.35	19.92	19.35	23.00
MgO	8.66	8.60	7.55	8.52	8.66	8.60	7.55
FeO	21.09	21.46	18.62	20.67	21.09	21.46	18.62
TiO ₂	1.83	1.89	1.45	1.37	1.83	1.89	1.45
MnO	0.30	0.26	0.32	0.29	0.30	0.26	0.32
CaO	0.02	0.13	0.04	0.13	0.02	0.13	0.04
Na ₂ O	0.25	0.27	0.30	0.29	0.25	0.27	0.30
K ₂ O	8.08	7.43	7.04	7.79	8.08	7.43	7.04
Sum	95.07	93.09	93.29	94.46	95.07	93.09	93.29
Si	2.66	2.63	2.65	2.68	2.66	2.63	2.65
Al ^{IV}	1.34	1.37	1.35	1.32	1.34	1.37	1.35
Al ^{VI}	0.46	0.42	0.72	0.51	0.46	0.42	0.72
Mg	0.99	1.01	0.86	0.97	0.99	1.01	0.86
Fe ⁽³⁺⁾	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ⁽²⁺⁾	1.35	1.41	1.18	1.32	1.35	1.41	1.18
Ti	0.11	0.11	0.08	0.08	0.11	0.11	0.08
Mn	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
Ca	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00
Na	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
K	0.79	0.74	0.68	0.76	0.79	0.74	0.68
Sum	34.79	33.53	34.90	34.94	34.79	33.53	34.90

جدول ۴- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای گارنت موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرده (شمال پهنه سنندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری و اعضای نهایی آن.

Sample No.	migmatite rocks GH13		schist migmatites HM23			
	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt	Grt
Analysis No.	19	20	21	9	10	11
SiO ₂	36.00	35.90	35.30	36.00	36.20	36.00
Al ₂ O ₃	21.00	21.10	20.60	0.00	0.00	0.10
MgO	1.70	1.69	1.57	21.00	21.00	21.00
FeO	34.00	35.90	36.70	28.00	28.10	28.00
TiO ₂	0.00	0.04	0.08	13.00	12.80	12.00
MnO	6.30	4.54	3.91	0.80	1.22	1.00
CaO	1.10	1.15	1.14	1.30	1.14	1.30
Na ₂ O	0.00	0.03	0.02	0.00	0.02	0.00
K ₂ O	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Sum	100.00	101.00	99.30	100.00	101.00	100.00
Si	3.00	2.93	2.93	3.00	2.96	3.00
Al	2.00	2.03	2.01	2.00	2.02	2.00
Mg	0.20	0.21	0.19	0.10	0.15	0.10
Fe	2.30	2.45	2.54	2.00	1.92	1.90
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.40	0.31	0.27	0.90	0.88	0.90
Ca	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10	0.10
Na	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
Sum	8.00	8.05	8.06	8.00	8.03	8.00
Pyrope	6.80	6.71	6.23	3.20	4.87	3.90
Almandine	76.00	79.80	81.70	64.00	62.90	64.00
Grossular	3.20	3.26	3.25	3.60	3.27	3.70
Spessartine	14.00	10.20	8.82	29.00	28.90	29.00

جدول ۵- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای کلریت و کردیریت موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرد (شمال پهنه سندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری.

Sample No.	schist migmatites HM23		migmatite rocks GH13		
	Chl	Chl	Crd	Crd	Crd
Analysis No.	4	5	22	23	24
SiO ₂	24.20	25.50	47.92	47.38	47.60
TiO ₂	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	22.96	23.05	32.65	32.77	32.64
FeO	25.37	23.79	10.44	10.44	10.15
MnO	0.38	0.32	0.45	0.39	0.46
MgO	12.00	10.56	6.58	6.68	6.68
CaO	0.15	0.15	0.00	0.01	0.01
Na ₂ O	0.03	0.03	0.51	0.42	0.44
K ₂ O	1.40	2.52	0.03	0.02	0.01
H ₂ O	-	-	1.43	1.42	1.42
Sum	86.50	85.89	100.02	99.53	99.41
Si	5.19	5.44	4.96	4.93	4.95
Al ^{iv}	2.81	2.56	-	-	-
Al ^{vi}	3.04	3.31	-	-	-
Al	-	-	3.98	4.02	4.01
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Fe ³⁺	0.00	0.10	0.18	0.18	0.18
Fe ²⁺	4.59	4.14	0.72	0.73	0.71
Mn	0.07	0.06	0.04	0.03	0.04
Mg	3.83	3.36	1.02	1.04	1.04
Ni	0.00	0.00	-	-	-
Ca	0.03	0.03	0.00	0.00	0.00
Na	0.03	0.03	0.10	0.09	0.09
K	0.77	1.37	0.00	0.00	0.00
Sum	20.36	20.40	11.01	11.02	11.00

جدول ۶- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای آلومینوسیلیکات‌های موجود در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرد (شمال پهنه سندج - سیرجان) به همراه محاسبه فرمول ساختاری.

Sample No.	Migmatite rocks GH13					
	and	and	and	Sil	Sil	Sil
Analysis No.	26	27	36	31	32	33
SiO ₂	35.62	35.85	36.03	35.61	36.43	35.54
TiO ₂	0.02	0.02	0.01	0.00	0.00	0.00
Al ₂ O ₃	64.35	64.34	64.52	64.12	64.23	64.40
FeO	0.21	0.22	0.23	0.15	0.14	0.08
MnO	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01
MgO	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01	0.02
CaO	0.00	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02
Na ₂ O	0.03	0.01	0.00	0.02	0.00	0.00
K ₂ O	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.00
Sum	100.26	100.50	100.82	99.93	100.83	100.07
Si	0.96	0.96	0.97	0.96	0.98	0.96
Ti	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Al	2.05	2.04	2.04	2.05	2.03	2.05
Fe ⁽³⁺⁾	0.00	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00
Fe ⁽²⁺⁾	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00
Mn	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Mg	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Ca	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Na	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
Sum	3.02	3.01	3.01	3.01	3.01	3.01

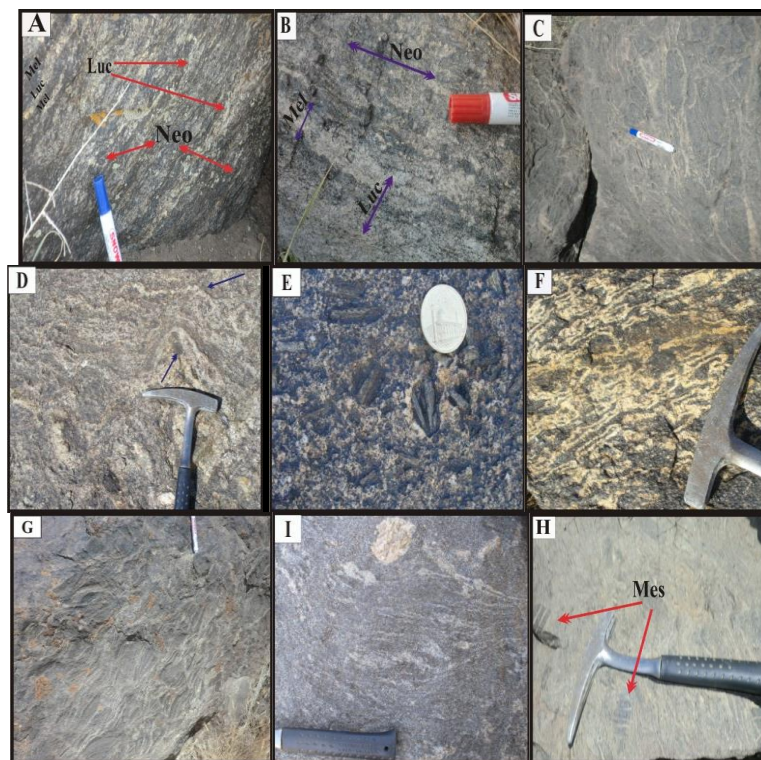
جدول ۷- نتایج حاصل از تجزیه XRF سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان) (اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد وزنی و عناصر فرعی بر حسب ppm).

Sample No.	DH-3	DH-21	GH-8	MH-41	MH-81	GH-6	MH-7	MH-51	MH-23	DH-10
Rock Type	Migmatite rocks				Hornfels migmatites			Schist migmatites		
SiO ₂	63.06	62.14	61.72	74.35	74.42	61.10	63.30	64.68	54.68	64.21
Al ₂ O ₃	18.04	18.28	16.28	12.55	13.05	18.82	17.91	17.26	17.57	17.56
Fe ₂ O ₃	6.34	7.14	7.44	4.73	3.84	6.89	6.99	6.98	6.86	6.94
CaO	0.50	0.36	0.87	0.98	0.23	0.36	0.81	0.51	11.65	0.45
Na ₂ O	1.42	0.98	1.05	1.61	1.53	1.12	1.37	1.45	2.90	1.64
K ₂ O	3.24	3.68	3.42	2.12	2.03	3.61	3.50	3.86	0.53	4.00
MgO	1.85	2.05	2.04	1.39	1.47	2.25	2.38	2.04	3.01	2.13
TiO ₂	0.76	0.81	0.92	0.59	0.55	0.77	0.75	0.79	0.66	0.79
MnO	0.14	0.14	0.17	0.13	0.09	0.28	0.13	0.16	0.20	0.17
P ₂ O ₅	0.12	0.13	0.13	0.13	0.08	0.07	0.12	0.18	0.07	0.12
SO ₃	0.12	0.16	0.16	0.09	0.16	0.17	0.15	0.14	0.16	0.13
L.O.I.	3.89	3.66	1.44	0.87	1.97	4.21	2.10	1.70	1.39	1.46
Sum	99.48	99.52	95.64	99.55	99.41	99.65	99.51	99.75	99.67	99.56
Cl	63	101	56	171	118	59	60	194	276	203
Ba	498	478	502	288	322	427	405	524	146	430
Sr	128	74	119	133	56	86	115	136	610	120
Cu	40	29	34	30	54	18	23	10	16	22
Zn	405	115	144	69	246	114	130	126	235	459
Pb	240	14	42	24	138	15	29	29	127	246
Ni	79	92	87	64	49	91	73	81	91	78
Cr	81	102	120	88	78	90	114	113	110	93

پتروگرافی و پتروفابریک میگماتیته‌ها

میگماتیته‌های شمال شرقی (اطراف روستاهای دودانگه و قپان‌وری) و جنوب شرقی (اطراف روستای مال میر) بروجرد بررسی شدند. از نظر ماکروسکوپی، میگماتیته‌های مال میر به ترتیب فراوانی ساختارهای لخته‌ای، چین‌خورده، پتیگماتیته، استروماتیک، شلیرن، آفتالمیک، سوریتیک، نبولیتی و دیکتیونیتیک را شامل می‌شوند. میگماتیته‌های دودانگه در بردارنده ساختارهای فلبتیک (رگه‌ای)، دیکتیونیتیک، شولن، شلیرن، استروماتیک، استیکتیولیتیک (خال دار) و اگماییتیک هستند. میگماتیته‌های قپان‌وری نیز ساختارهای

لخته‌ای، دیکتیونیتیک، خال‌دار و شلیرن را در برمی‌گیرند. بر اساس تقسیم بندی ۱۲ گانه (Mehnert, 1968)، فابریک‌های استروماتیک، دیکتیونیتیک، چین‌خورده، لخته‌ای، پتیگماتیک، فلبتیک (رگه‌ای)، شولن و شلیرن در میگماتیته‌های منطقه بروجرد به صورت غالب و در مقیاس شایان توجهی دیده می‌شوند (شکل ۲). بر اساس بررسی‌های ساختاری و میکروسکوپی، مجموعه میگماتیته منطقه تقریباً ۵۷ درصد میگماتیت، ۱۷ درصد میگماتیت تحول یافته از شیست‌ها و ۲۶ درصد میگماتیت تحول یافته از هورنفلس‌ها را شامل می‌شود که تنوع ساختاری و کانی‌شناسی قابل توجهی دارند.



شکل ۲- تصاویر ماکروسکوپی ساختار سنگ‌های میگماتیتهی منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان). (A) میگماتیتهای استروماتیک که لوکوسوم کوچکی دارند؛ (B) میگماتیتهای استروماتیک که لوکوسوم‌های بزرگ‌تری دارند (لوکوسوم: Luc، ملانوسوم: Mel، نئوسوم (مجموع لوکوسوم و ملانوسوم): Neo)؛ (C) میگماتیتهای دیکتیونیتیک؛ (D) میگماتیتهای چین‌خورده (به گره و بطن‌های موجود در لوکوسوم‌ها توجه شود)؛ (E) میگماتیتهای لخته‌ای که منشورهای آندالوزیت شناور در زمینه میگماتیت به صورت تقریباً جهت‌دار هستند؛ (F) میگماتیتهای پتیگماتیکی که لوکوسوم‌ها در آن مانند روده انسان پیچ و تاب خورده‌اند؛ (G) میگماتیتهای فلیتیک (رگه‌ای)؛ (H) میگماتیتهای شولن که در آنها قطعات مزوسوم مانند دسته‌های الوار (کلک) در نئوسم شناورند؛ (I) میگماتیتهای شلیرن.

میزان کم با بافت پویی کیلوبلاستیک، گارنت، بیوتیت، فیبرولیت و سیلیمانیت، آندالوزیت به صورت کیاستولیت و سرسیتی‌شده، مسکوویت‌های ثانوی، کلریت، کردیریت و کوارتز غنی هستند (شکل ۳- A). لوکوسوم‌های نوع دوم از پتاسیم فلدسپار، بیوتیت، مسکوویت، سیلیمانیت منشوری، تورمالین، گارنت، آندالوزیت سرسیتی‌شده، کلریت، زیرکن به صورت ادخال و گاه کردیریت در حال پنینی شدن غنی هستند (شکل‌های ۳- B تا F). گسترش ملانوسوم‌ها در دودانگه بیش‌تر از قپان‌وری و مالمر است. به عبارت دیگر تفکیک لوکوسوم از ملانوسوم به راحتی ممکن است. اما در مالمر و قپان‌وری گسترش ملانوسوم در این سنگ‌ها ناچیز است و در برخی موارد سنگ بدون ملانوسوم است. در ملانوسوم‌ها بافت لپیدوبلاستیک که از

میگماتیت‌ها: میگماتیت‌ها که بیش‌ترین درصد را به خود اختصاص داده‌اند در اطراف روستاهای دودانگه، قپان‌وری و مالمر مشاهده می‌شوند و تقریباً همه ساختارهای ماکروسکوپی را نشان می‌دهند. در این مناطق، لوکوسوم‌ها معمولاً بافت سنگ‌های آذرین و بافتی شبیه گرانیت‌ها را دارند که به صورت رگه‌های نامنظم در حد چند سانتی‌متر توسعه یافته‌اند. آنها از کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار، بیوتیت، مسکوویت و کانی‌های تیره تشکیل شده‌اند و بافت پرتیت، پویی کیلوبلاستیک، گرانوبلاستیک و میرمکیتی دارند. لوکوسوم‌ها دو نوع لوکوسوم‌های پلاژیوکلازدار (شکل ۳- A) و لوکوسوم‌های آلکالی فلدسپار (شکل ۳- B) را شامل می‌شوند. لوکوسوم‌های نوع اول از پلاژیوکلاز، پتاسیم فلدسپار به

Grt+Bt+Thr±Ms و And+Sil+Bt±Ms

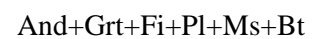
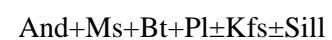
شیست‌های میگماتیته: شیست‌های میگماتیته که از شیست تحول یافته‌اند در مناطق مالمیر و دودانگه به مقدار اندک مشاهده می‌شوند و بر اساس شکل به ساختارهای استروماتیک، لخته‌ای، چین خورده و در مواردی شلیرن تقسیم می‌شوند. لایه‌بندی ترکیبی که از تفکیک بخش‌های کوارتز - فلدسپاتی و میکایی ناشی است و برگوارگی به خوبی توسعه یافته ناشی از ردیف‌شدگی میکاها در برخی نمونه‌ها مشاهده می‌شود. این سنگ‌ها ساخت دانه‌درشت تشکیل شده از پورفایروبلاست‌های گارنت و دانه‌های کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، بیوتیت، مسکوویت و گاهی اوقات فیبرولیت (سیلیمانیت رشته‌ای) دارند. این میگماتیته‌ها در بردارنده سه بخش مزوسوم، روشن یا گرانیته (لوکوسوم) و تیره یا شیستی (ملانوسوم) هستند. بخش مزوسوم، بافت‌های پورفایروبلاستیک و لپیدوبلاستیک متوسط تا دانه‌درشت شامل کانی‌های کوارتز، فلدسپار، بیوتیت، مقدار کمی مسکوویت، گارنت و فیبرولیت (سیلیمانیت رشته‌ای) دارد (شکل‌های ۳-۴، A، B و E). بخش روشن (لوکوسوم)، ترکیب گرانیته و بافت‌های دانه‌ای و آپلیته تشکیل شده از کانی‌های کوارتز، بیوتیت، مسکوویت، آلکالی‌فلدسپار و پلاژیوکلاز دارد (شکل‌های ۴-۳، C، D و F). ملانوسوم به مقدار بسیار اندک در برخی مقاطع که عمدتاً از تجمع کانی‌های بیوتیت و به صورت چین خورده، خمیده و تاب‌دار تشکیل شده‌اند، مشاهده می‌شود (شکل‌های ۴-۳، C و D). در برخی نمونه‌ها ساختار شلیرن و لخته‌ای دیده می‌شود. کانی‌های پارائزنی در حال تعادل شیست‌های میگماتیته در بخش لوکوسوم، $Grt \pm Bt + Pl + Qtz \pm Ms$ و $Pl \pm Ms + Bt + Kfs + Qtz$ و در بخش مزوسوم، $Kfs \pm Bt + Pl + Ms + Fi$ و $Ms + Bt + Pl + Grt \pm Chl$ هستند.

متوالی قرارگرفتن بلورهای بیوتیت تاب‌دار یا کینگ‌باندشده به وجود آمده است (شکل ۳-۳ C) و پورفایروپیدوبلاستیک و لپیدوپورفایروبلاستیک که بر اثر حضور بلورهای شکل‌دار تا بی‌شکل گارنت، آندالوزیت و تورمالین در کنار بیوتیت به وجود آمده‌اند (شکل‌های ۳-۳ A، C و D)، دیده می‌شود. تورمالین ملانوسوم‌ها می‌تواند از سیالات گرمایی ناشی باشد؛ زیرا روی فولیاسیون سنگ به‌طور تصادفی (رندوم) قرار گرفته است و نشان‌دهنده آن است که مذاب به‌طور محلی تراوش یافته است. مزوسوم‌ها معمولاً بافت پورفایروبلاستیک، لپیدوبلاستیک، گرانوبلاستیک و گاه بافت‌های ترکیبی گرانولپیدوبلاستیک، لپیدوگرانوبلاستیک، پورفایروپیدوبلاستیک و لپیدوپورفایروبلاستیک نشان می‌دهند. در مزوسوم‌ها علاوه بر کانی‌های تیره، بیش‌تر کانی‌های تشکیل‌دهنده بخش روشن نیز مشاهده می‌شود. کانی‌های آندالوزیت به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و به‌صورت تکه‌تکه و خردشده، کیاستولیت با اداخل‌های فراوان (شکل‌های ۳-۳، A، C و E) و کردپریت به‌صورت بلورهای شکسته و در حال پنیته‌شدن در حاشیه‌های زمینه سنگ پراکنده‌اند (شکل ۳-۳ F). بلورهای گارنت به‌صورت شکل‌دار تا نیمه‌شکل‌دار و شکسته نیز دیده می‌شوند (شکل‌های ۳-۳ A و F). سیلیمانیت‌های سوزنی با برجستگی بالا و فیبرولیت‌ها که به‌جای بیوتیت‌ها به‌وجود آمده‌اند و فیبرولیت‌هایی که از تبدیل آندالوزیت به‌وجود آمده‌اند در برخی مقاطع نیز دیده می‌شود (شکل‌های ۳-۳، A، C و E). کانی‌های پارائزنی در حال تعادل سنگ‌های میگماتیته عبارتند از:

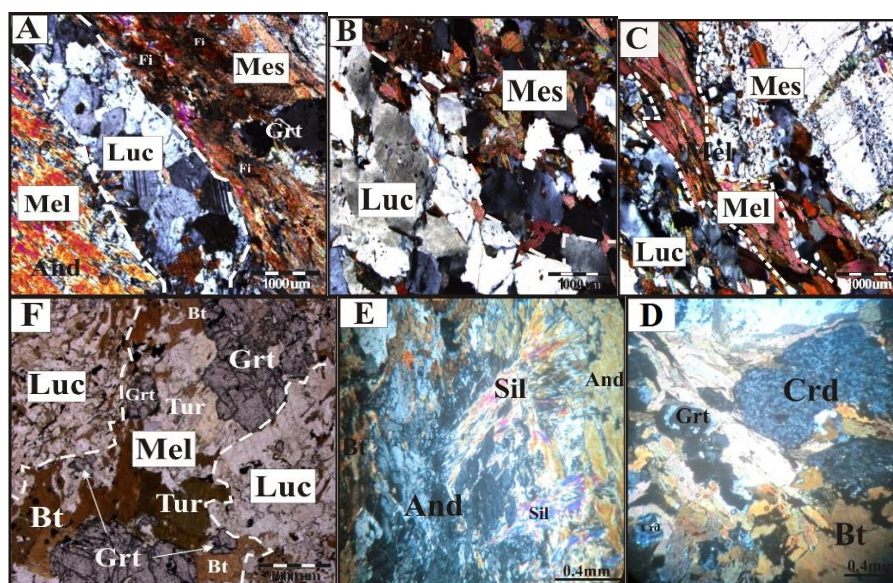
در بخش لوکوسوم:



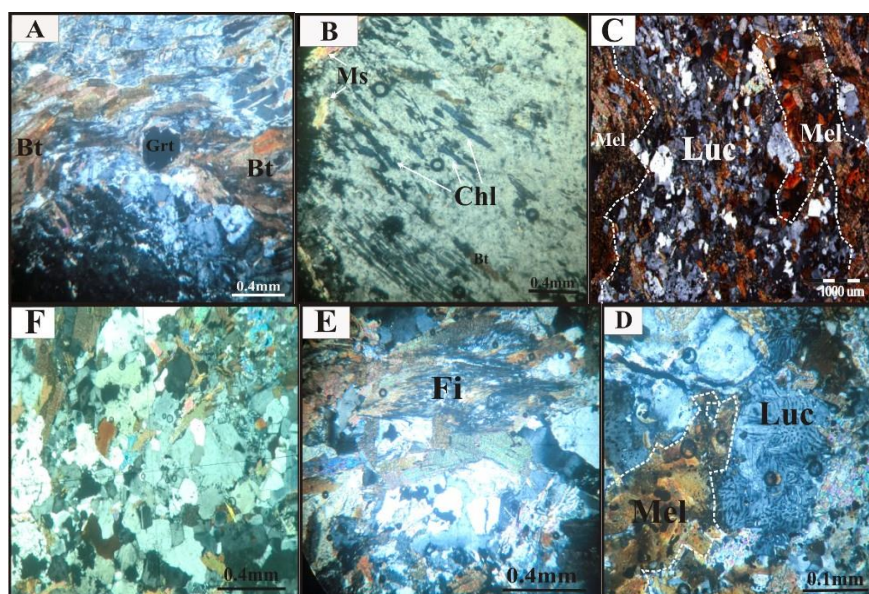
در بخش مزوسوم:



و در بخش ملانوسوم:



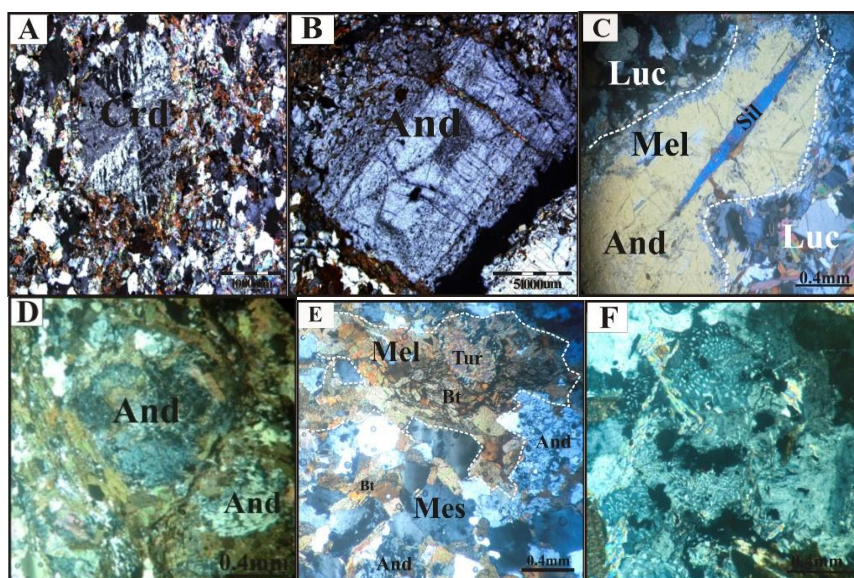
شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی سنگ‌های میگماتیتهی منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان). (A) توالی لوکوسوم (Luc) پلازیوکلاز، ملانوسوم (Mel) و مزوسوم (Mes) در سنگ؛ (B) توالی لوکوسوم آلکالی‌فلدسپار و مزوسوم در سنگ؛ (C) توالی لوکوسوم، ملانوسوم و مزوسوم که بیوتیت در آن چین خورده است؛ (D) لایه نوسوم که دربردارنده یک لایه ملانوسوم غنی از گارنت (Grt)، تورمالین (Tur)، بیوتیت (Bt) و دو لایه لوکوسوم است؛ (E) لایه مزوسوم با سیلیمانیت‌های منشوری (Sil) که بالاترین درجه دگرگونی را نشان می‌دهد؛ (F) لایه مزوسوم که کردیریت (Crd) به صورت تجزیه‌شده، شکسته‌شده و ادخال در میان بیوتیت‌ها دیده می‌شود. نام اختصاری کانی‌ها برگرفته از Kretz (۱۹۸۳) است.



شکل ۴- تصاویر میکروسکوپی از شیست‌های میگماتیتهی منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان)؛ (A) لایه مزوسوم که بیوتیت‌ها در اطراف بلور گارنت به صورت سایه فشارشی دیده می‌شوند و سنگ، برگواگی دارد؛ (B) لایه مزوسوم که دربردارنده کلریت (Chl)، مسکوویت (Ms) و بیوتیت است؛ (C) لایه‌بندی ترکیبی در شیست‌های میگماتیتهی (به جهت‌یافتگی تقلیدی و رشد دانه‌ها در فابریک قبلی سنگ توجه شود)؛ (D) یک لایه لوکوسوم با بافت گرلنوفیری و یک لایه ملانوسوم که از بیوتیت غنی هستند؛ (E) لایه مزوسوم (به فیبرولیت (Fi) در آن توجه شود)؛ (F) لایه لوکوسوم با بافت گرانیتی دربردارنده کوارتز و آلکالی‌فلدسپار فراوان که می‌تواند نشان‌دهنده ترکیب نقطه اتکتیک باشد.

۵- D و E). بخش مزوسوم نیز دربردارنده کانی‌های روشن و تیره است (شکل‌های ۵-A تا E). شواهد پتروگرافی نشان می‌دهد که در این سنگ‌ها سیلیمانیت، هم به صورت منشوری و هم فیبرولیتی دیده می‌شود. به نظر می‌رسد که فیبرولیت‌ها به‌طور مستقیم از بیوتیت‌ها و سیلیمانیت منشوری ممکن است از فیبرولیت‌های قبلی نیز به‌وجود آمده باشد. علاوه بر این بیوتیت، پتاسیم‌فلدسپار، فیبرولیت و گارنت نیز در زمینه سنگ دیده می‌شوند. کانی‌های پاراژنزی در حال تعادل هورنفلس‌های میگماتیته در بخش لوکوسوم: $Bt+Kfs+Qtz \pm Pl \pm Ms$ و $Bt+Pl+Qtz \pm Ms$ در بخش مزوسوم: $And+Bt+Pl \pm Ms$ ، $Crd+Bt+Kfs \pm And \pm Ms$ ، $And+Bt+Pl \pm Ms$ و $Grt+Ms+Bt+Pl$ و $Sil+And+Ms+Kfs \pm Pl$ در بخش ملانوسوم به مقدار کم، بیوتیت و تورمالین و در برخی موارد $And+Sil+Bt \pm Ms$ هستند.

هورنفلس‌های میگماتیته: این سنگ‌ها که از هورنفلس‌ها تحول یافته‌اند در مناطق مالمیر و به مقدار کم در قپان وری مشاهده می‌شوند و بر اساس شکل به ساختارهای لخته‌ای و شلیرن تقسیم می‌شوند. هورنفلس‌های میگماتیته، ساخت دانه‌درشت با بافت گرانوبلاستیک و در برخی موارد لپیدوگرانوبلاستیک تشکیل شده از پورفیروبلاست‌های آندالوزیت، کردیریت، سیلیمانیت و گارنت به مقدار کم و دانه‌های کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، پلاژیوکلاز، بیوتیت و مسکوویت دارند. بخش‌های روشن (لوکوسوم) این نوع میگماتیته‌ها، کانی‌های کوارتز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت، پلاژیوکلاز به مقدار کم و مسکوویت است (شکل‌های ۵-C، D، F). بخش ملانوسوم به مقدار اندک عمدتاً از کانی‌های بیوتیت تشکیل شده است و در مواردی تورمالین، آندالوزیت و سیلیمانیت نیز در آن وجود دارد (شکل‌های



شکل ۵- تصاویر میکروسکوپی از هورنفلس میگماتیته‌ها در منطقه بروجرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان). A) لایه مزوسوم دارنده کردیریت با ماکل پروانه‌ای؛ B) لایه مزوسوم دربردارنده آندالوزیت (And) به صورت کیاستولیت با ادخال‌های بیوتیت، مسکوویت و سیلیمانیت؛ C) دو لایه لوکوسوم و یک لایه مزوسوم با آندالوزیت در حال تبدیل به سیلیمانیت‌های منشوری؛ D) یک لایه مزوسوم (به بیوتیت‌ها به صورت ریزچین و چین‌خورده اطراف پورفیروبلاست آندالوزیت توجه شود)؛ E) یک لایه ملانوسوم غنی از بیوتیت و تورمالین با یک لایه مزوسوم؛ F) بافت میرمکیتی و گرانوفیری در لایه لوکوسوم.

پتاسیم (۹۳ = Or، ۶ = Ab و ۹۶ = Or، ۴ = Ab) است (شکل ۷- A).

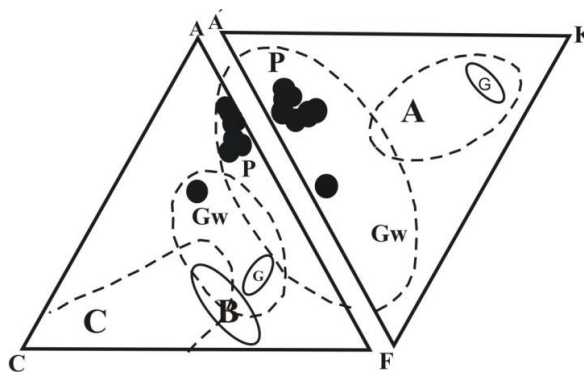
مسکوویت: بر اساس نمودارهای سه‌تایی Al_2O_3 - K_2O - $FeO+MgO$ (Vidal and Parra, 2000) و نمودارهای سه‌تایی SiO_2 - FeO - Al_2O_3 (SAF) (شکل‌های ۷- B و C)، عضو نهایی در میگماتیت‌ها عمدتاً سلادونیت است که جانشینی شایان توجهی از $Mg=Fe^{2+}$ ترکیب آن را به سمت سلادونیت آهن‌دار تغییر می‌دهد. مسکوویت در شیبست‌های میگماتیتهای عمدتاً از ۹۶ تا ۹۸ درصد مولی قطب مسکوویت و ۱/۷ تا ۴ درصد مولی قطب پاراگونیت و در میگماتیت‌ها از ۸۱ تا ۸۳ درصد مولی مسکوویت و ۱۷ تا ۲۰ درصد مولی پاراگونیت تشکیل شده است. مقدار Al_2O_3 این کانی به ۳۵/۶ درصد وزنی می‌رسد. کسر مولی منیزیم این کانی در شیبست‌های میگماتیتهای (۰/۲ تا ۰/۵) بیش‌تر از میگماتیت‌ها (۰/۰۶ تا ۰/۰۸) است.

گارنت: این کانی طبق نمودار سه‌تایی $Mn+Ca$ و Fe^{2+} و Mg (Coleman et al., 1965) از آلماندن غنی است (شکل ۷- D)، به‌طوری که در شیبست‌های میگماتیتهای مقدار آلماندن گارنت در حدود ۶۲ تا ۶۴ درصد و در میگماتیت‌ها ۶۴ تا ۸۲ درصد مولی است، ولی مقدار پیروپ و گروسولار آن کم است (در شیبست‌های میگماتیتهای پیروپ ۳/۲ تا ۴/۸ و گروسولار ۳/۲ تا ۳/۷ درصد مولی، و در میگماتیت‌ها، پیروپ از ۵/۳ تا ۶/۷ و گروسولار از ۱/۹ تا ۳/۴ درصد مولی متغیر است). مقدار اسپسارتین ۲۸ تا ۲۹ درصد مولی در شیبست میگماتیت‌ها است و در میگماتیت‌ها طیف تغییرات گسترده‌ای از ۸/۲ تا ۲۷ درصد مولی دارد.

کلریت: بر اساس طبقه‌بندی Pflumio (۱۹۹۱)، کلریت‌های مورد مطالعه از نوع دافنیت و پینوکلریت و بر پایه‌ی طبقه‌بندی Vidal و Parra (۲۰۰۰) از نوع دافنیت و کلینوکلر است. نتایج تجزیه‌ی شیمیایی، نشان می‌دهد که کلریت‌ها از عضو نهایی کلینوکلر از طریق جانشینی $Fe^{2+}=Mg$ به سمت عضو نهایی

تعیین سنگ مادر

پس از تعیین و محاسبه‌ی شاخص‌های A، C، A' و F و بر اساس تجزیه‌ی شیمیایی تعداد ۱۰ نمونه از انواع سنگ‌های میگماتیتهای منطقه (جدول ۲)، محل آنها بر روی نمودار A'FK و ACF (Winkler, 1976) تصویر شد (شکل ۶). با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از بررسی‌های پتروگرافی و نیز موقعیت نمونه‌ها در این نمودار به‌خوبی معلوم می‌شود که سنگ مادر غالب در آنها را سنگ‌های پلیتی تشکیل می‌دهند که طی فرایندهای دگرگونی به شیبست‌های میگماتیتهای هورنفلس‌های میگماتیتهای و میگماتیت‌ها تبدیل شده‌اند.



شکل ۶- نمودار A'FK و ACF (Winkler, 1976) برای تعیین سنگ مادر سنگ‌های میگماتیتهای منطقه بروجرد (شمال پهنه ساندج - سیرجان) (P: سنگ‌های پلیتی، Gw: گریوک‌ها، G: گرانیتوئیدها، C: سنگ‌های آهکی، B: سنگ‌های بازالتی، A: آندزیت).

$$A=[Al_2O_3] + [Fe_2O_3] - ([Na_2O] + [K_2O])$$

$$C=[CaO] - 3.3[P_2O_5]$$

$$F=[FeO] + [MgO] + [MnO]$$

$$A'=[Al_2O_3] + [Fe_2O_3] - ([Na_2O] + [K_2O] + [CaO])$$

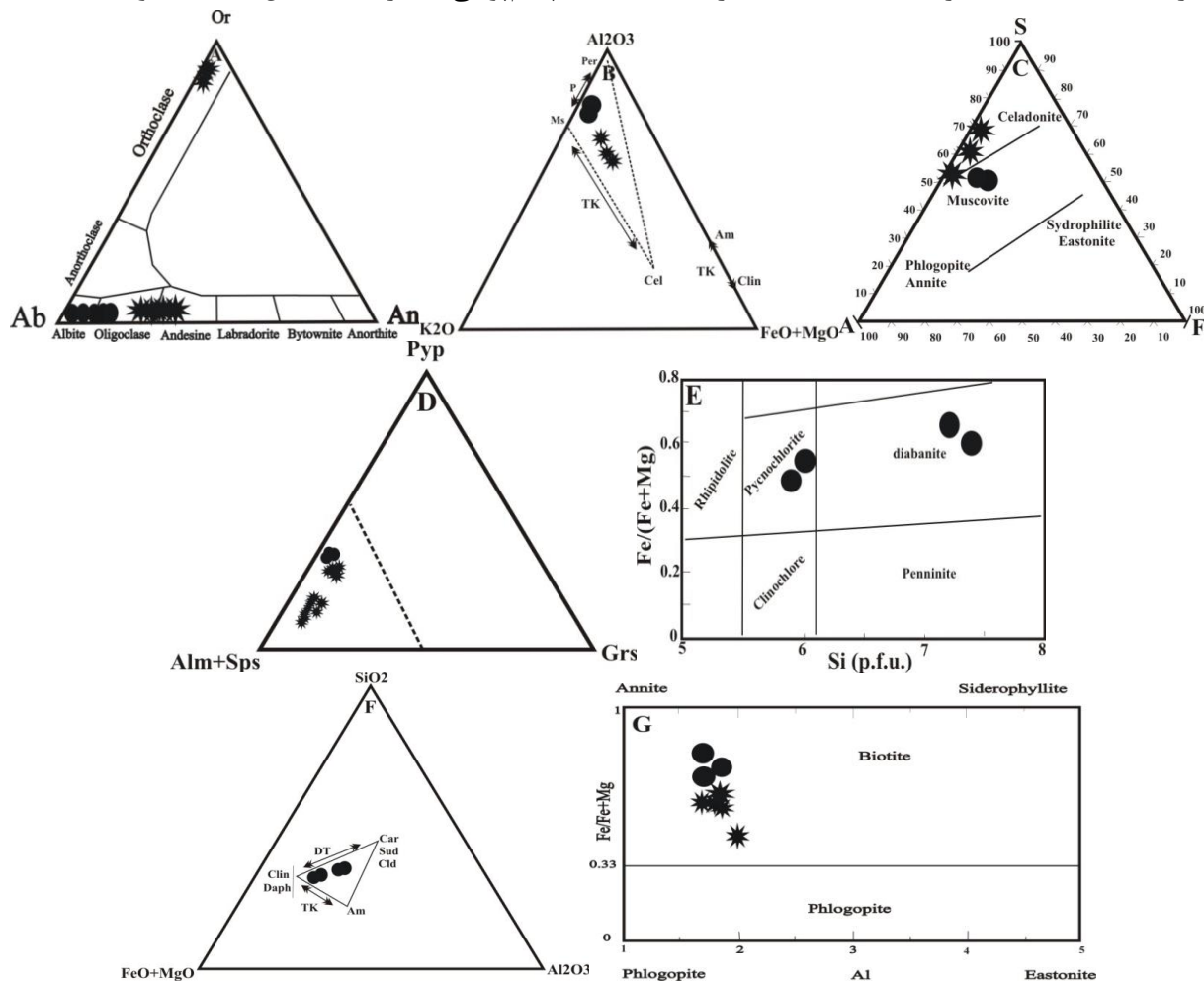
$$K=[K_2O]$$

شیمی کانی

فلدسپار: نتایج حاصل از تجزیه‌ی شیمیایی نشان می‌دهد که ترکیب پلازیوکلازها در مزوسوم شیبست‌های میگماتیتهای از آلبیت تا الیگوکلاز (۲ تا ۱۷ = An) است و در میگماتیت‌ها دو نوع فلدسپار دیده می‌شود. یک نوع، سدیک در رده‌ی الیگوکلاز - آندزین (۳۳ = An، ۶۷ = Ab تا ۳۷ = An، ۶۳ = Ab) و یک قطب، ارتوکلاز و غنی از

تا ۰/۰۶ و Ti در این کانی از ۰/۰۱ تا صفر اتم در واحد فرمول ساختاری (a.p.f.u.) و یا در حد چشم‌پوشی متغیر است (شکل‌های E و F).

دافنیت تغییر یافته‌اند. کسر مولی منیزیم برای این کانی ۰/۳۸ تا ۰/۴۵ است. کاتیون Si از ۲/۹ تا ۳/۸، Al از ۲/۶ تا ۳/۱، Mn از ۰/۲ تا ۰/۳، Na از ۰/۱

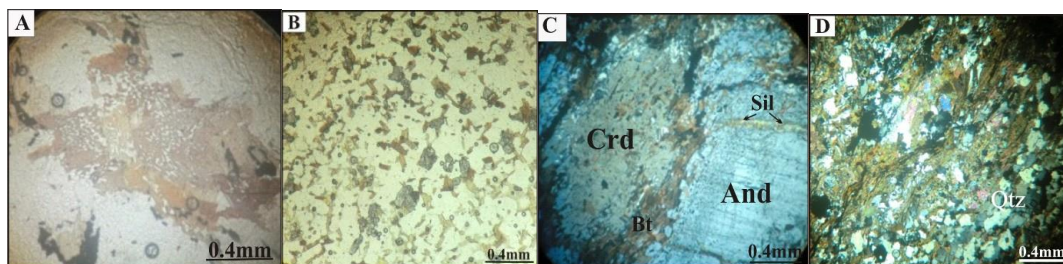


شکل ۷- ترکیب شیمیایی کانی‌ها در سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرود (شمال پهنه سنندج - سیرجان). (A) فلدسپار درون شلیست‌های میگماتیته و سنگ‌های میگماتیته روی نمودار Ab-Or-An (Deer et al., 1962); (B) ترکیب شیمیایی مسکوویت روی نمودار سه‌تایی Al_2O_3 - K_2O - $FeO+MgO$ (Vidal and Parra, 2000); (C) ترکیب شیمیایی مسکوویت روی نمودار سه‌تایی SiO_2 - FeO - Al_2O_3 (SAF) (Vidal and Parra, 2000); (D) ترکیب شیمیایی گارنت در نمودار سه‌تایی Fe^{2+} , $Mn+Ca$ و Mg (Coleman et al., 1965); (E) نمودار $Fe^{+2}/Fe^{+2}+Mg$ نسبت به Si در کلریت‌ها (Pflumio, 1991); (F) نمودار نشان‌دهنده جانیشینی در کلریت‌ها (Vidal and Parra, 2000); (G) طبقه‌بندی شیمیایی میکاها (Deer et al., 1962; Spear, 1984) (دایره = شلیست میگماتیته، ستاره = میگماتیته).

سمت آنیت تغییر می‌دهد. کسر مولی منیزیم این کانی در میگماتیته‌ها (۰/۴۱ تا ۰/۴۳) بیش‌تر از شلیست‌های میگماتیته (۰/۳۱ تا ۰/۳۳) است. به عبارت دیگر بیوتیت در سنگ‌های میگماتیته MgO بالاتری نسبت به بیوتیت در شلیست‌های

بیوتیت: بر اساس طبقه‌بندی Deer و همکاران (۱۹۶۲) و Speer (۱۹۸۴)، بیوتیت‌ها در محدوده بین آنیت و فلوگوپیت قرار می‌گیرند، به طوری که جانیشینی قابل توجه $Mg=Fe^{2+}$ در موقعیت کئوردیناسیونی اکتائدری، ترکیب فلوگوپیت را به

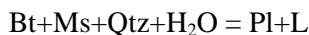
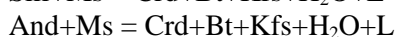
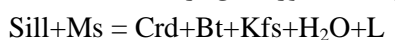
به‌طور کلی وجود سطوح بلوری (Vernon and Collins, 1988) در کوارتز و بافت آذرین در پلاژیوکلاز و ترکیب گرانیتهی لوکوسوم‌ها، نشان‌دهنده وجود مذاب در زمان تشکیل میگماتیت‌های منطقه است. لوکوسوم‌ها حالت دگرنوا دارند و موازی و ممتد نیستند؛ از این رو، تزریق ماگما می‌تواند عامل اصلی ایجاد میگماتیت‌های منطقه در نظر گرفته شود. این مطلب با حضور میگماتیت‌هایی در منطقه که زمینه گرانیته‌ی دارند و دربردارنده زینولیت‌ها و زینوکریست‌های هورنفلسی فراوان هستند، تأیید می‌شود. مذاب به‌صورت حفره‌هایی شکل گرفته در کوارتز و بیوتیت‌ها و کردیریت‌ها مشاهده می‌شود (شکل ۸).



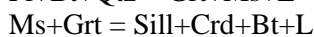
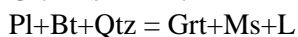
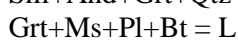
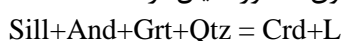
شکل ۸- تصاویر میکروسکوپی از سنگ‌های میگماتیتی منطقه بروگرد (شمال پهنه سنندج - سیرجان). (A) لایه لوکوسوم در نور PPL، به حفره‌های شکل گرفته مذاب درون بیوتیت‌ها توجه شود؛ (B) لایه لوکوسوم در نور PPL غنی از گارنت؛ (C) لایه مزوسوم، به حفره‌های شکل گرفته مذاب درون کردیریت توجه شود؛ (D) کوارتزهای خودشکل در لایه لوکوسوم.

واکنش‌های احتمالی ذوب در سنگ‌های میگماتیتی منطقه مورد مطالعه با توجه به کانی‌شناسی لوکوسوم‌ها به‌صورت ذیل است (برای سادگی ضرایب تعداد مول هر مرحله نوشته نشده است).

۱- واکنش‌های ذوب با حضور سیال آزاد



۲- واکنش‌های ذوب بدون حضور سیال آزاد



میگماتیتی دارد (شکل ۷-G). مقدار TiO_2 بیوتیت در شیست‌های میگماتیتی بیش‌تر از بیوتیت در میگماتیت است.

کردیریت: ترکیب شیمیایی این کانی از ۵۷ تا ۶۱ درصد مولی MgCrd و ۱ تا ۲ درصد مولی MnCrd تشکیل شده است. فراوانی کاتیون Fe^{2+} در این کانی 0.7 p.f.u. تا 0.8 به ازای ۱۸ اتم اکسیژن است.

آلومینوسیلیکات‌ها: فراوانی SiO_2 برابر $35/54 - 36/18$ ، Al_2O_3 $63/51 - 64/54$ ، FeO از 0.2 تا 0.67 و MgO در این کانی‌ها در حدود 0.1 تا 0.25 درصد وزنی متغیر است.

ذوب در میگماتیت‌ها

لوکوسومی که از کوارتز، فلدسپار پتاسیم، پلاژیوکلاز و بیوتیت تشکیل شده باشد و کانی‌های بدون آب مانند گارنت و کردیریت در آن دیده نشود با مذاب‌های اشباع از آب سازگار است، در حالی که لوکوسومی که کانی‌های بدون آب مانند گارنت، کردیریت و ارتوپیروکسن دارد با مذاب‌های اشباع از آب همخوانی دارد (Ward et al., 2007). در نتیجه در شیست‌های میگماتیتی به‌طور استثنا در دو مقطع گارنت فراوان به‌صورت معلق در لوکوسوم مشاهده شده است. با توجه به وجود گارنت در لوکوسوم و همچنین، فراوانی کوارتز، پتاسیم فلدسپار و پلاژیوکلاز لوکوسوم مورد مطالعه مرتبط با مذاب‌های اشباع تا اشباع از آب به شمار می‌آیند.

$$\begin{aligned} 6) & 6sill + 3fcrd + 5ann = 5mu + 7alm [q] \\ 9) & 3fcrd + 2mu = 8sill + 2ann + 7q [alm] \\ 13) & 2sill + ann + q = mu + alm [fcrd] \\ 25) & 3fcrd + 2ann = 2mu + 4alm + 3q [sill] \\ P & = 4.0 \text{ kbar}, x(\text{CO}_2) = 0.262 \end{aligned}$$

بنابراین، با توجه به رابطه $X\text{CO}_2 + X\text{H}_2\text{O} = 1$ ، کسر مولی $X\text{H}_2\text{O}$ برابر با ۰/۷۴ است. برای محاسبه P - $X\text{CO}_2$ شیب‌های میگماتیتی با انجام محاسبات شراین میکروز و با در نظر گرفتن همه اکتیویته اعضای نهایی و با فرض دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد، ۴۷ واکنش حاصل شد که در بین آنها تقاطع $[py, gr, alm, an, phl, ann, cel, fcel, daph]$ پایدار است.

$$\begin{aligned} 26) & 2east + 2pa + 4q + 2\text{H}_2\text{O} = 2ab + 2mu + ames [clin] \\ 27) & 5east + 2pa + 11q + 6\text{H}_2\text{O} = 2ab + 5mu + 2clin [ames] \\ 8) & 3east + ames + 7q + 4\text{H}_2\text{O} = 3mu + 2clin [ab, pa] \\ 12) & 6ab + 5ames + 2q + 2\text{H}_2\text{O} = 6pa + 4clin [east, mu] \\ 25) & 14ab + 2mu + 11ames + 2\text{H}_2\text{O} = 2east + 14pa + 8clin [q] \\ P & = 2.7 \text{ kbar}, X(\text{CO}_2) = 0.148 \end{aligned}$$

برای محاسبه T - $X\text{CO}_2$ شیب‌های میگماتیتی با فرض فشار ۳ کیلو بار از روش قطع واکنش‌های تعادل چندگانه با استفاده از واکنش بین همه اعضای نهایی ۱۵۰ واکنش حاصل شده در برنامه ترموکالک استفاده شده است. طبق محاسبات انجام شده، ترموکالک، اکتیویته ۰/۱۴ برای کربن دی‌اکسید به دست آورده است.

$$\begin{aligned} 12) & cel + clin = py + phl + q + 4\text{H}_2\text{O} \\ 18) & phl + 3mu + clin = 4east + 7q + 4\text{H}_2\text{O} \\ 98) & 8ab + 5mu + 3daph = 5ann + 8pa + 9q + \text{H}_2\text{O} \\ 104) & 3an + 5ann + 3clin + 3q = gr + 5alm + 5phl + 12\text{H}_2\text{O} \\ T & = 595 \pm 0.25 \text{ }^\circ\text{C}, x(\text{CO}_2) = 0.148 \end{aligned}$$

بنابراین، کسر مولی $X\text{H}_2\text{O}$ با توجه به رابطه $X\text{H}_2\text{O} + X\text{CO}_2 = 1$ برابر با ۰/۸۶ است. پس می‌توان نتیجه گرفت که فشاربخشی آب بسیار بالا (بین ۰/۷۴ تا ۰/۸۶) و نزدیک فشار کل (عدد یک) می‌شده است. بالابودن فشاربخشی آب به احتمال

ژئوترمو بارومتري و محاسبه P - $X\text{CO}_2$ و T - $X\text{CO}_2$

سیالات درگیر در سنگ‌های میگماتیتی، چهار نوع سیال اصلی هستند: CO_2 , CH_4 , N_2 , H_2O . به نظر می‌رسد که CO_2 و H_2O بیش‌ترین سیالات موجود در بعضی از سرزمین‌های میگماتیتی هستند. برای مثال می‌توان مناطق ناکسوس در یونان (Kreulen, 1980)، کونمارا در ایرلند (Yardley, 1983) و کلرادو در آمریکا (Olsen, 1984) را نام برد. میگماتیت‌ها و متاپلیت‌های منطقه بروجرد، گرافیت دارند و مسلماً بر مقدار و نوع سیال تأثیر می‌گذارند. بنابراین، سعی شده است ابتدا مقدار سیالات و سپس دما و فشار محاسبه شود (محاسبات بر اساس دو مقطعی است که حداکثر پاراژنز را دارند).

در نرم افزار ترموکالک برای محاسبه P - $X\text{CO}_2$ و T - $X\text{CO}_2$ از اعضای نهایی مرحله‌های مختلف با استفاده از تعادل کانی‌ها در سنگ‌های میگماتیتی استفاده می‌شود. با توجه به بالابودن مقدار درصد اکسید آهن در سنگ میگماتیتی و برای پایین آمدن درصد خطا و رسیدن درجه آزادی صفر برای تعیین دما و فشار از اعضای نهایی آهن دار استفاده شد (شکل ۹). با انجام محاسبات شراین میکروز و با در نظر گرفتن اکتیویته اعضای نهایی و با فرض فشار ۴ کیلو بار، ۳۱ واکنش حاصل شد که در بین آنها تقاطع پایدار $[and, fcel, san]$ برای محاسبه T - $X\text{CO}_2$ به دست آمد.

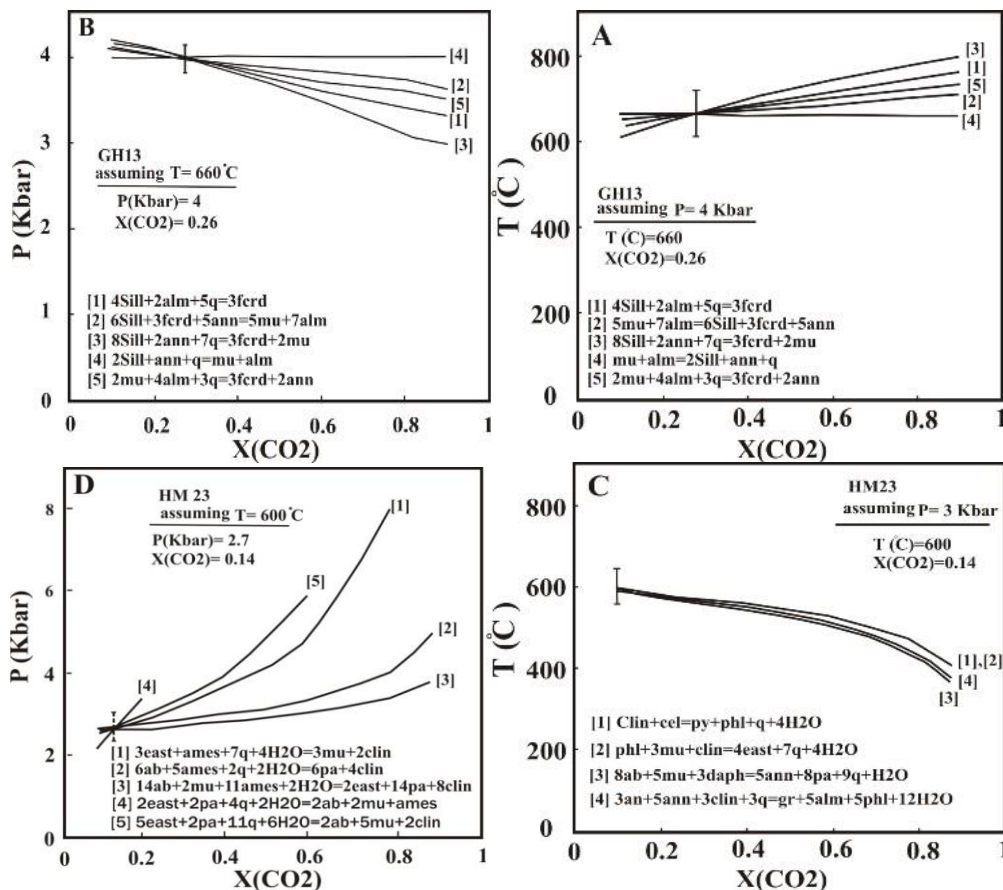
$$\begin{aligned} 2) & 4sill + 2alm + 5q = 3fcrd [mu, ann] \\ 6) & 5mu + 7alm = 6sill + 3fcrd + 5ann [q] \\ 9) & 8sill + 2ann + 7q = 3fcrd + 2mu [alm] \\ 13) & mu + alm = 2sill + ann + q [fcrd] \\ 26) & 2mu + 4alm + 3q = 3fcrd + 2ann [sill] \\ T & = 660 \text{ }^\circ\text{C}, x(\text{CO}_2) = 0.262 \end{aligned}$$

همچنین، با انجام محاسبات شراین میکروز و با در نظر گرفتن اکتیویته اعضای نهایی و با فرض دمای ۶۶۰ درجه سانتیگراد، ۳۰ واکنش حاصل شد که در بین آنها تقاطع پایدار $[and, fcel, san]$ برای محاسبه P - $X\text{CO}_2$ به دست آمد.

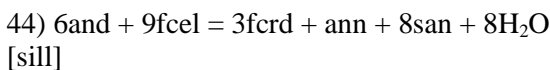
$$2) 3fcrd = 4sill + 2alm + 5q [mu, ann]$$

که شرایط حاکم بر ذوب بخشی در سنگ‌های میگماتیته در حضور سیال رخ داده است.

زیاد از ورود سیالات آبگین از طرف توده گرانیتی به سنگ‌های میگماتیته دربرگیرنده، ناشی است. همچنین، بالابودن فشار بخشی آب نشان می‌دهد



شکل ۹- نمودارهای دمافشارسنجی برای سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرود (شمال پهنه ساندج - سیرجان). (A) منحنی T-XCO₂ که با توجه به محاسبات انجام شده، دمای ۶۶۰ درجه سانتیگراد و کسر مولی ۰/۲۶ را برای سنگ‌های میگماتیته نشان می‌دهد؛ (B) منحنی P-XCO₂ که با توجه به محاسبات انجام شده، فشار ۴ کیلو بار و کسر مولی ۰/۲۶ را برای سنگ‌های میگماتیته نشان می‌دهد، (C) منحنی T-XCO₂ که با توجه به محاسبات انجام شده، دمای ۶۰۰ درجه سانتیگراد و کسر مولی ۰/۱۴ را برای شیبته‌های میگماتیته نشان می‌دهد، (D) منحنی P-XCO₂ که با توجه به محاسبات انجام شده، فشار ۲/۷ کیلو بار و کسر مولی ۰/۱۴ را برای شیبته‌های میگماتیته نشان می‌دهد.

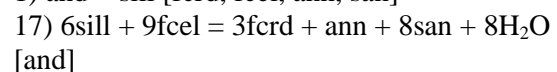


P = 2.8 kbar (sd = 0.6), T = 662 C (sd = 32)

دما و فشار در شیبته‌های میگماتیته با انجام محاسبات شراین میکروز و با در نظر گرفتن همه اکتیویته اعضای نهایی ۱۵۰ واکنش حاصل شد که در بین آنها

محاسبه دما و فشار

با انجام محاسبات شراین میکروز و با در نظر گرفتن اکتیویته اعضای نهایی آهن‌دار، ۷۲ واکنش حاصل شد که در بین آنها تقاطع پایدار [mu, alm, q] به دست آمد (جدول ۳).



43) $py + gr + mu = 3an + phl$ [east, q]
 46) $py + 2gr + 3east + 6q = 6an + 3phl$ [mu]
 56) $gr + 3east + 6q = 3an + 2phl + mu$ [py]
 $P = 3.3 \text{ kbar (sd} = 1.5), T = 568 \text{ C (sd} = 57)$

تقاطع پایدار [alm, ab, ann, cel, fcel, pa, ames, clin,] daph
 به دست آمد (جدول ۴).
 13) $3east + 6q = py + phl + 2mu$ [gr, an]
 51) $3an + 3east + 6q = 2py + gr + 3mu$ [phl]

جدول ۳- مقدار اکتیویته اعضای نهایی کانی‌ها که برای ساخت واکنش‌های پایدار در نرم افزار ترموکالک استفاده شده‌اند.

Sample No.	mineral assemblage	Activity
	Sill, And, Crd, Grt, Ms	fcrd=0.18,ms=0.70,alm=0.39,fcel=0.02085
GH13	Bt, Kfs, H ₂ O	ann=0.06142,san=0.95,H ₂ O=0.74

جدول ۴- مقدار اکتیویته اعضای نهایی استفاده شده برای واکنش‌های پایدار ایجاد شده با نرم افزار ترموکالک.

Sample No.	mineral assemblage	Activity
	Bt, Grt, Ms, Chl, Pl	phl=0.013041,ann=0.089,east=0.01727,py=0.000057,gr=0.000057,alm=0.23,
HM23	H ₂ O	spss=0.025,ms=0.52,cel=0.058,fcel=0.23185,pa=0.016523,ames=0.0169
		clin=0.0139,daph=0.029,ab=0.87,an=0.21,H ₂ O=0.86

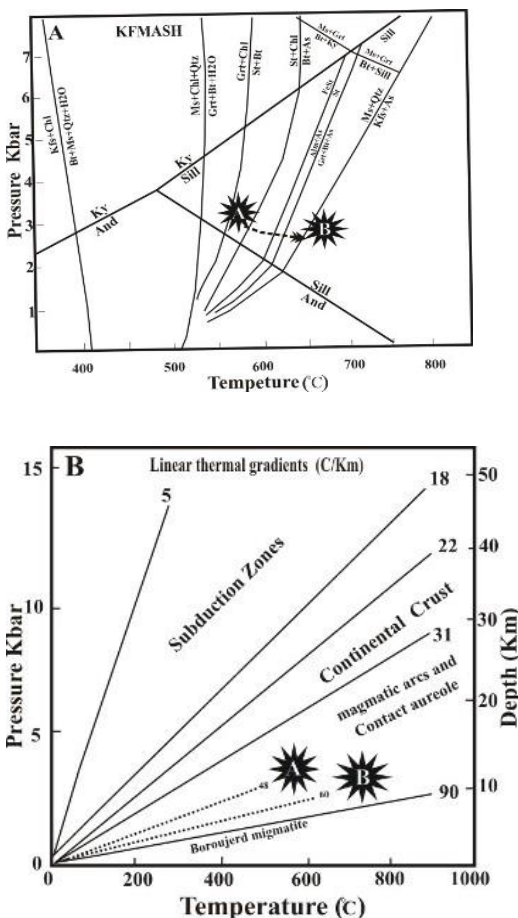
شیست‌های میگماتیتی و مشاهده بقایای شیسستوزیته S₁ به صورت ادخال در پورفایروبلاست‌های آندالوزیت در لایه مزوسوم هورنفلس میگماتیتی نشان می‌دهد که کانی‌های کلریت، مسکوویت و گارنت در شیسست‌های میگماتیتی در زمان دگرگونی ناحیه‌ای متبلور می‌شوند، به طوری که تا تشکیل آندالوزیت و گارنت همزمان با S₁ در هورنفلس‌های میگماتیتی پیش می‌روند.

با افزایش گرادیان زمین گرمایی منطقه بر اثر گنبد حرارتی توده نفوذی بروجرد، در هاله دگرگونی اطراف توده نفوذی، کانی‌های بیوتیت، آندالوزیت، گارنت، کردیریت و در شرایط اوج دگرگونی در سنگ‌های میگماتیتی کانی‌های کردیریت به صورت شکسته شده و پنییتی، گارنت، سیلیمانیت و فیبرولیت تبلور می‌یابند. این تشابه تغییرات ترکیب کانی‌ها با شیسست و هورنفلس‌های منطقه و همچنین، وجود دگرشکلی و شیسستوزیته و مواردی مانند آن، گویای خاستگاه مشترک آنها است. این نشان می‌دهد که از نظر ساختاری با توجه به سنگ اولی ممکن است شیسستوزیته، فولیاسیون، لیتاژ، چین خوردگی و کلیواژ

خاستگاه زمین ساختی سنگ‌های میگماتیتی یا تکامل تکتونومورفوسم

نتایج فشار - دماسنجی نشان می‌دهد که شیسست‌های میگماتیتی در شرایط فشار ۳/۳ کیلوبار و دمای ۵۶۸ درجه سانتیگراد و سنگ‌های میگماتیتی در شرایط ۲/۸ کیلوبار و دمای ۶۶۲ درجه سانتیگراد رخ داده‌اند. بنابراین، الگوی کلی مسیر فشار - دما در جهت خلاف عقربه ساعت یا به عبارت دیگر پادساعت گرد است که با حضور توده‌های آذرین داغ و مناطق دگرگونی فشار پایین در قوس‌های ماگمایی حاشیه فعال قاره‌ای سازگار است. در نخستین مرحله، شیسست‌های میگماتیتی منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۰- A) احتمالاً متحمل گرم‌شدگی همراه با افزایش فشار بر اثر تدفین شده‌اند. در این مرحله گرادیان زمین گرمایی منطقه بر اثر جای‌گیری توده‌های عمیق مافیک (زینولیت‌های مافیک موجود در توده بروجرد) بالاتر از گرادیان صفحات پایدار بوده است.

وجود ریزچین‌های بعد از فرایند میلونیتی (چین‌های نسل سوم) در لایه مزوسوم



شکل ۱۰- A) مسیر P-T در سیستم KFMASH سنگ‌های میگماتیته منطقه بروجرده (شمال پهنه سنندج - سیرجان). منحنی‌های واکنش از Spear و Cheny (۱۹۸۹) است؛ B) رابطه خطی بین دما - عمق که گویای گرادیان زمین گرمایی است (Holdaway and Mukhopadhyay, 1993). گرادیان زمین گرمایی میگماتیته‌های بروجرده با خط چین نشان داده شده است که در منطقه دگرگونی مجاورتی و پهنه ماگمایی قرار گرفته است.

بحث و نتیجه‌گیری

مجموعه میگماتیته منطقه بروجرده، میگماتیته‌های مختلف با تنوع ساختاری و کانی‌شناسی قابل توجه را شامل می‌شود و به صورت بخش‌های روشن (لوکوسوم)، تیره (ملانوسوم) و تیره و روشن (مزوسوم) دیده می‌شود. مقدار ملانوسوم نسبت به لایه‌های کم دیگر و گاهی اوقات سنگ بدون ملانوسوم است. بخش‌های روشن عمدتاً از کانی‌های کوارتز،

در قسمت‌های مختلف یک میگماتیته به ویژه مزوسوم آن از سنگ مادر به ارث برده شده باشد. علاوه بر آن حرکات تکتونیکی و دگرگونی درجه بالا، میگماتیته‌ها را به شدت دگرشکل کرده است (همانند بیوتیت‌های چین خورده) که نتیجه این تغییر شکل‌ها، فولیاسیون‌ها، چین خوردگی‌ها، جریان یافتگی‌ها، شیستوزیته‌ها و ساخت‌های دیگر تکتونیکی است.

تحولات اوج دگرگونی سنگ‌های میگماتیته در اعماق کم‌تر از ۱۱ کیلومتر انجام شده است و گرادیان زمین گرمایی ۴۸ تا ۶۰ درجه سانتیگراد بر کیلومتر است. افزایش گرادیان زمین گرمایی را می‌توان با مدل تزریق یکنواخت ماگما توجیه کرد که موجب تولید ماگمای آناتکتیک و نفوذ آنها همراه با ماگماهای تفریق یافته حاصل از توده نفوذی اولی به سطوح بالاتر می‌شود. پدیده ذوب بخشی و صعود ماگما در مناطق ضعیف پوسته مانند شکستگی‌ها و پهنه‌های برشی راحت‌تر اتفاق می‌افتد و این شکستگی‌ها، صعود ماگما را تسهیل و هدایت می‌کنند. در نتیجه می‌توان گفت در منطقه مورد مطالعه ماگمای آناتکتیک بروجرده در پهنه برشی موجود در منطقه به افق‌های بالاتر نفوذ کرده است و موجب دگرگونی مجاورتی سنگ‌های میگماتیته درون گیر خود شده است.

بنابر بررسی‌های Ahmadi Khalaji (۲۰۰۶)، Tahmasbi و Ahmadi Khalaji (۲۰۱۰) عمق جای‌گیری توده‌های نفوذی منطقه بروجرده کم‌تر از ۱۰ کیلومتر است. بر اساس شکل A-۱۰ که پاراژنزهای اوج دگرگونی سنگ‌های میگماتیته در محدوده سیلیمانیت است و همچنین، با توجه به شکل B-۱۰، تحولات اوج دگرگونی سنگ‌های میگماتیته در اعماق کم‌تر از ۱۱ کیلومتر انجام شده است و گرادیان زمین گرمایی ۶۰ درجه سانتیگراد بر کیلومتر است.

سنگ‌های میگماتیته و با شبکه پتروژنتیکی دمایی حدود ۷۰۰ تا ۷۸۰ درجه سانتیگراد و فشاری حدود ۳ تا ۴ کیلوبار گزارش شده است (Baharifar and Ghafari, 2010). نتایج دما - فشارسنجی به دست آمده، محدوده دمایی ۵۶۸ تا ۶۶۲ درجه سانتیگراد و فشار ۲/۸ تا ۳/۳ کیلوبار را نشان می‌دهد. با توجه به دما و فشار محاسبه شده، گرادیان زمین گرمایی به ترتیب برای شیست‌های میگماتیته و میگماتیته‌ها ۴۸ و ۶۰ درجه سانتیگراد بر کیلومتر است. میگماتیته‌زایی اولی بر اثر دگرگونی ناحیه‌ای و همزمان یا قبل از تزریق گرانیته‌های نوع I اتفاق افتاده است. سپس با افزایش گرادیان زمین گرمایی این سنگ‌های میگماتیته متحمل دگرگونی مجاورتی نیز شده‌اند. انتشار حرارت ناشی از توده بروجرد و ماگماتیسم مافیک که انکلاوهایی از آنها در گرانیته‌ییدها دیده می‌شوند و سیالات فرورانشی سبب افزایش گرادیان زمین گرمایی و ایجاد میگماتیته‌ها شده است. این دگرگونی احتمالاً از طریق ورود سیالات آبگین از طرف توده گرانیته به سنگ‌های میگماتیته دربرگیرنده و همچنین، از راه رسانش گرمایی از نفوذ توده‌های مرتبط با کمان ماگمایی در همه سطوح پوسته کنترل می‌شود که ماگماتیسم مافیک که انکلاوهایی از آنها در گرانیته‌ییدها دیده می‌شود، هم اثرگذار بوده است؛ زیرا یک ماگمای گرانیته با دمای اولی حدود ۸۰۰ درجه سانتیگراد نمی‌تواند هاله دگرگونی با دمای حدود ۷۰۰ درجه سانتیگراد ایجاد کند و تنها تا حدود ۵۵۰ درجه سانتیگراد می‌تواند سنگ‌ها را داغ کند.

سپاس‌گزاری

نگارندگان این پژوهش از حمایت‌های معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه لرستان تشکر می‌کنند. در نهایت از داوران محترم مجله که با ارائه نظرات و پیشنهادهای ارزنده به ارتقای علمی مقاله کمک کرده‌اند، صمیمانه سپاس‌گزاری می‌شود.

پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت و مسکوویت تشکیل شده‌اند و بافت پرتیت، پویی‌کیلوبلاستیک، گرانوبلاستیک، گرافیک و میرمیکتی دارند. لوکوسوم‌ها معمولاً بافت سنگ‌های آذرین و بافتی شبیه گرانیته‌ها را دارند و از کوارتز، پلاژیوکلاز، آلکالی‌فلدسپار، بیوتیت، مسکوویت و کانی‌های تیره تشکیل شده‌اند. بافت آنها پرتیت، پویی‌کیلوبلاستیک، گرانوبلاستیک و میرمیکتی است و دو نوع لوکوسوم‌های آلکالی‌فلدسپار و لوکوسوم‌های پلاژیوکلازدار را دربرمی‌گیرند. هستند. ملانوسوم‌ها بافت لپیدوبلاستیک، لپیدوپورفیروبلاستیک و گاه بافت‌های ترکیبی گرانولپیدوبلاستیک، لپیدوگرانوبلاستیک، پورفیرولپیدوبلاستیک و لپیدوپورفیروبلاستیک نشان می‌دهند و علاوه بر کانی‌های تیره، بیش‌تر کانی‌های تشکیل‌دهنده بخش روشن نیز در آنها مشاهده می‌شود. بر اساس تجزیه شیمیایی سنگ‌های میگماتیته و بررسی‌های پتروگرافی، سنگ مادر غالب میگماتیته‌های مورد مطالعه، سنگ‌های پلیتی است که طی فرایندهای دگرگونی به شیست‌های میگماتیته، هورنفلس‌های میگماتیته و میگماتیته‌ها تبدیل شده است. مطابق تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها از بخش مزوسوم، ترکیب کلریت‌ها بین کلینوکلر و دافنیت، بیوتیت بین فلوگوپیت و آنیت، مسکوویت بین سلادونیت آهن‌دار و مسکوویت، گارنت بین اسپسارتین و آلماندن و غنی از آلماندن و کردیریت‌ها به‌طور معمول آهن‌دار است.

در بررسی‌های قبلی، حداکثر اوج دمای دگرگونی در سنگ‌های محدوده مورد مطالعه با استفاده از زوج گارنت - بیوتیت در حدود ۴۷۰ درجه سانتیگراد (Ahmadikhalaji, 2006)، با مجموعه کانی‌شناسی و نرم افزار ترموکالک، ۶۵۰ درجه سانتیگراد (Masoudi, 1997) و با شناسایی کردوم در کانی‌های اوج دگرگونی

منابع

- Ahmadi Khalaji, A. (2006) Petrology of the granitoid rocks of the Boroujerd area. PhD thesis, University of Tehran, Tehran, Iran (in Persian).
- Baharifar, A. K. and Ghafari, M. (2010) First report of Corundum occurrence and granulite grade metamorphism in migmatitic rocks of SE-Broujerd. 4th National Geological Conference of Payam Noor University, Mashhad, Iran (in Persian).
- Berthier, F., Billiaul, H. P., Halbrorom, B. and Marizot, P. (1974) Tude Stratigraphique, Petrologique et structural de La region de Khorramabad (Zagros, Iran). PhD thesi, University of Grenoble, France.
- Cogoon, R. and Holland, T. J. B. (2002) Mixing properties of phengitic micas and revised garnet-phengite thermobarometers. *Journal of Metamorphic Geology* 20(7): 683-696.
- Coleman, R. G., Lee, D. E., Beatty, L. B. and Brannock, W. W. (1965) Eclogites and eclogites: their differences and similarities. *Geological Society America Bulletin* 76(5): 483-508.
- Deer, W. A., Howie, R. A. and Zussman, J. (1962) Rock- forming minerals. 3rd vol., Longman, London.
- Droop, G. T. R. (1987) A general equation for estimating Fe³⁺ concentrations in ferromagnesian silicates and oxides from microprobe analyses, using stoichiometric criteria. *Mineralogical Magazine* 51(361): 431-435.
- Ghafari, M. (2010) Petrology of metamorphic rocks in the southeast of Boroujerd. MSc thesis, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran (in Persian).
- Heydarianmanesh, A., Tahmasbi, Z. and Ahmadi Khalaji, A. (2014) A study of macroscopic structures of migmatites in the Boroujerd area. 8th National Geological Conference of Payam Noor University, Arak, Iran (in Persian).
- Holdaway, M. J. and Mukhopadhyay, B. (1993) A re-evaluation of the stability relations of andalusite: thermochemical data and phase diagram for the aluminum silicates. *American Mineralogy* 78(3-4): 298-315.
- Kretz, R. (1983) Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68(3-4): 277-279.
- Kreulen, R. (1980) CO₂-rich fluids during regional metamorphism on Naxos (Greece): carbon isotopes and fluid Inclusions. *American Journal of Science* 280(8):745-771.
- Masoudi, F. (1997) Contact metamorphism and pegmatite development in the region SW of Arak, Iran. PhD thesis, Leeds University, UK.
- Mehnert, K. R. (1968) Migmatites and the origin of granitic rocks. Elsevier, Amsterdam.
- Mohajjel, M. (1997) Structure and tectonic evolution of Paleozoic-Mesozoic rocks, Sanandaj-Sirjan zone, Western Iran. PhD thesis, University of Wollongong, Wollongong, Australia.
- Olsen, S. N. (1984) Mass-balance and mass transfer in migmatites from the Colorado Front Range. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 85(1): 30-44.
- Pflumio, C. (1991) Evidences for polyphased oceanic alteration of the extrusive sequence of the Semail ophiolite from the Salahi Block (Oman). In: *Ophiolite genesis and evolution in the oceanic lithosphere* (Ed. Peters, T. J.) 313-351. Institute of Mineralogy and Petrology, University of Bren, Bren.
- Seifert, F. (1978) Bedeutung und Nachweis von thermodynamischem Gleichgewicht und die interpretation. von Ungleichgewichten, *Fortschr Mineral* 55: 111-134.
- Spear, F. S. (1993) Metamorphic phase equilibria and pressure-temperature time paths. *Mineralogical Society of America Monograph* (Mineralogical Society of America).
- Spear, F. S. and Cheney, J. T. (1989) A Petrogenetic grid for pelitic schist in the system SiO₂-Al₂O₃-FeO-MgO-K₂O-Na₂O. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 101(1): 149-164.

- Spear, F. S. and Peacock, S. M. (1989) Metamorphic pressure-temperature-time paths. American Geophysical Union, Washington, Short Course in Geology 7: 102.
- Speer, J. A. (1984) Micas in igneous rocks. Review in Mineralogy and geochemistry 13(1): 299-356.
- Tahmasbi, Z. and Ahmadi Khalaji, A. (2010) Using of mineral chemistry to determine the formation conditions of Boroujerd granitoid complex and its metamorphic aureole. Petrology 1(2): 77-94 (in Persian).
- Vernon, R. H. and Collins, W. J. (1988) Igneous microstructures in migmatites. Geology 16(12): 1126-1129.
- Vidal, O. and Parra, T. (2000) Exhumation paths of high pressure metapelites obtained from local equilibria for chlorite-phengite assemblages. Geological Magazine 35: 139-161.
- Ward, R. A., Steven, G. and Kisters, A. F. M. (2007) Deformation-controlled, fluid-induced anatexis: a field and experimental study on the Damara Orogen, Namibia. Sixth Hutton Symposium, Stellenbosch, South Africa, Abstract Volume, 222-223.
- Will, T. M. (1998) Phase Equilibria in Metamorphic Rocks, Thermodynamic Backgrounds and Petrological Applications. Lecture Notes in Earth Sciences, Springer.
- Winkler, H. G. F. (1976) Petrogenesis of Metamorphic Rocks. 4th Ed. Springer-Verlag, New York onc.
- Yardley, B. W. D. (1983) Quartz veins and devolatilization during metamorphism. Journal of the Geological Society of London 140(4): 657-663.

Mineral chemistry and thermobarometry of migmatitic rocks of Boroujerd area (north of Sanandaj-Sirjan zone)

Arefeh Heydarianmanesh, Zahra Tahmasbi * and Ahmad Ahmadi Khalaji
Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

Abstract

Migmatites have formed an important part of high-grade metamorphism in the Boroujerd area aureole (north of Sanandaj-Sirjan zone). Migmatitic complex including: migmatites, schist migmatites and hornfelse migmatites with a different range of structural and mineralogical compositions. These rocks are observed as light (leucosome), dark (melanosome) and dark and light (mesosome). Leucosomes mainly composed from quartz, plagioclase, K-feldspar, biotite and muscovite and also have perthite, poikiloblastic, granoblastic, graphic and myrmekite textures. Melanosomes formed from minerals such as biotite, garnet, andalusite, tourmaline and sillimanite have lepidoblastic, porphyroepidoblastic and lepidoporphyroblast textures. Mesosomes formed from dark and light minerals and show porphyroblast, lepidoblastic and granoblastic textures. According to petrographic studies and whole rock chemical analyses for these rocks revealed that dominant protolith is pelitic rocks. The thermobarometry results showed temperature range of 568°C to 662 °C and pressure of 2.8 to 3.3 kbars. According to the calculated temperature and pressure, the geothermal gradient of schist migmatites and hornfels migmatites determined 48 °C/km and 60 °C/km, respectively. Heat release of the Bourojerd pluton, mafic magmatism in area (that enclaves of them can be seen in the granitoids) and subduction fluid causes migmatites that it shows the main factor increasing geothermal gradient is the presence of hot igneous plutons and enter intrusion fluid in the magmatic arcs.

Key words: Geothermobarometry, Partial melting, Migmatite, Magmatic arc, Boroujerd, Sanandaj-Sirjan zone

* tahmasebi.z@lu.ac.ir