

بررسی منشأ آمفیبول در هورنبلند - گابروهای الیون دار شمال باختری سلماس؛ شمال باختری ایران

معصومه آهنگری^{۱*} و محسن مؤذن^۲

استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران
استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۵/۱۲/۲۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۶/۰۶/۱۴

چکیده

آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای الیون دار در شمال باختری سلماس در بافت‌های متعددی همچون اویکو کریست و بین بلوری در زمینه سنگ، در بیرونی‌ترین قسمت حاشیه‌های واکنشی اطراف الیون و در حاشیه و محل رخ‌های کلینوپیروکسن‌ها تشکیل شده‌اند. بر اساس مطالعات بافتی و سنگ‌نگاری، این کانی‌ها در مراحل تأخیری تر نسبت به دیگر کانی‌های موجود در هورنبلند- گابروهای الیون دار شمال باختری سلماس تشکیل شده‌اند. بررسی ترکیب عناصر نادر خاکی و کمیاب آمفیبول‌های مورد مطالعه در دو بافت مجزا برای آمفیبول‌های موجود در متن سنگ و بین بلوری (گروه اول) و آمفیبول‌های تشکیل شده در حاشیه و محل رخ‌های کلینوپیروکسن (گروه دوم) بیانگر تشکیل این کانی از تبلور مذاب/سیال بین بلوری و یا برهم کنش این مذاب/سیال با کانی‌های تشکیل شده در مراحل اولیه همچون کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز است. از این رو با توجه به داده‌های موجود (روابط بافتی، مجموعه کانیایی و نیز ترکیب عناصر کمیاب آمفیبول‌ها)، هورنبلند- گابروهای الیون دار شمال باختری سلماس در طی دو مرحله تشکیل شده‌اند. مرحله اول شامل تبلور تفریقی و تشکیل کانی‌های الیون، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز و مرحله دوم شامل تأثیر مذاب باقیمانده غنی از آب بر روی کانی‌های متبلور شده در مرحله قبل به ویژه کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز و تبلور آمفیبول است.

کلیدواژه‌ها: آمفیبول، هورنبلند- گابرو، مذاب باقیمانده، سلماس.

***نویسنده مسئول:** معصومه آهنگری

E-mail: m.ahangari@urmia.ac.ir

۱- پیش‌نوشتار

آمفیبول‌های کلسیک به‌طور گسترده در انواع سنگ‌های آذرین و دگرگونی حضور دارند. استفاده از ترکیب این کانی می‌تواند کمک زیادی به درک فرایندهای لیئوسفری کند (Tiepolo et al., 2007). با در نظر گرفتن قابلیت بالای آمفیبول در پذیرش طیف وسیعی از عناصر اصلی و فرعی در ساختار بلوری خود، استفاده از ترکیب شیمیایی این کانی (عناصر اصلی و فرعی) می‌تواند در تعیین شرایط فیزیکی شیمیایی ماگما در حین تبلور آمفیبول بسیار مفید باشد (Anderson and Smith, 1995; Holland and Blundy, 1994). تشکیل و تبلور آمفیبول در سنگ‌های آذرین عمدتاً حساس به عمق جایگیری ماگماست و با استفاده از این ویژگی می‌توان با توجه به ترکیب شیمیایی این کانی (عناصر اصلی، فرعی و نادر خاکی) به بررسی سیر تحولی ماگماهای غنی از آب پرداخت (Murphy et al., 2012). معمولاً تفریق آمفیبول در اعماق متوسط پوخته از ماگمایی با مقدار آب فراوان صورت می‌گیرد. حضور آب فراوان در ترکیب ماگما، یکی از ویژگی‌های ماگماهای اولیه در زون‌های فرورانشی است (Fischer and Marty, 2005; Wallace, 2005).

بر اساس مطالعات صورت گرفته توسط محققان مختلف آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آذرین می‌توانند دارای منشأهای مختلفی همچون تبلور از مذاب/سیال بین بلوری interstitial باشند و در اثر فرایندهای هیدروترمالی همچون جایگزینی کانی‌های اولیه‌ای مثل پیروکسن‌ها (Mével, 1987) تشکیل شوند. بنابراین تشخیص و شناسایی نحوه تشکیل و منشأ آمفیبول در سنگ‌های آذرین از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از شواهد متعددی همچون روابط بافتی، ترکیب عناصر اصلی و فرعی و داده‌های ایزوتوپی جهت شناسایی منشأ این کانی مفید خواهد بود (Abd El-Rahman et al., 2012; Murphy et al., 2012). به عقیده برخی از محققین همچون Coogan et al. (2001) و Gillis and Meyer (2001) استفاده از داده‌های عناصر کمیاب شواهد ژئوشیمیایی محکمی به منظور تفکیک آمفیبول‌هایی با منشأ

ماگمایی و هیدروترمال در اختیار قرار می‌دهد. همچنین با استفاده از مدل‌سازی مناسب می‌توان با اندازه‌گیری میزان عناصر کمیاب در ترکیب کانی‌های حساس به فشار همچون آمفیبول روند تفریق در طول تحولات ماگمایی را تعیین کرد (Davidson et al., 2007; Macpherson et al., 2006).

در هورنبلند- گابروهای الیون دار رخنمون یافته در شمال باختری سلماس، شمال باختری ایران، آمفیبول در بافت‌های متعددی تشکیل شده است. تحقیق حاضر به بررسی شیمی کانی عناصر اصلی و فرعی و کمیاب در ترکیب آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها می‌پردازد و با استفاده از آن منشأ و نحوه تشکیل این کانی را مطالعه می‌کند.

۲- زمین‌شناسی عمومی

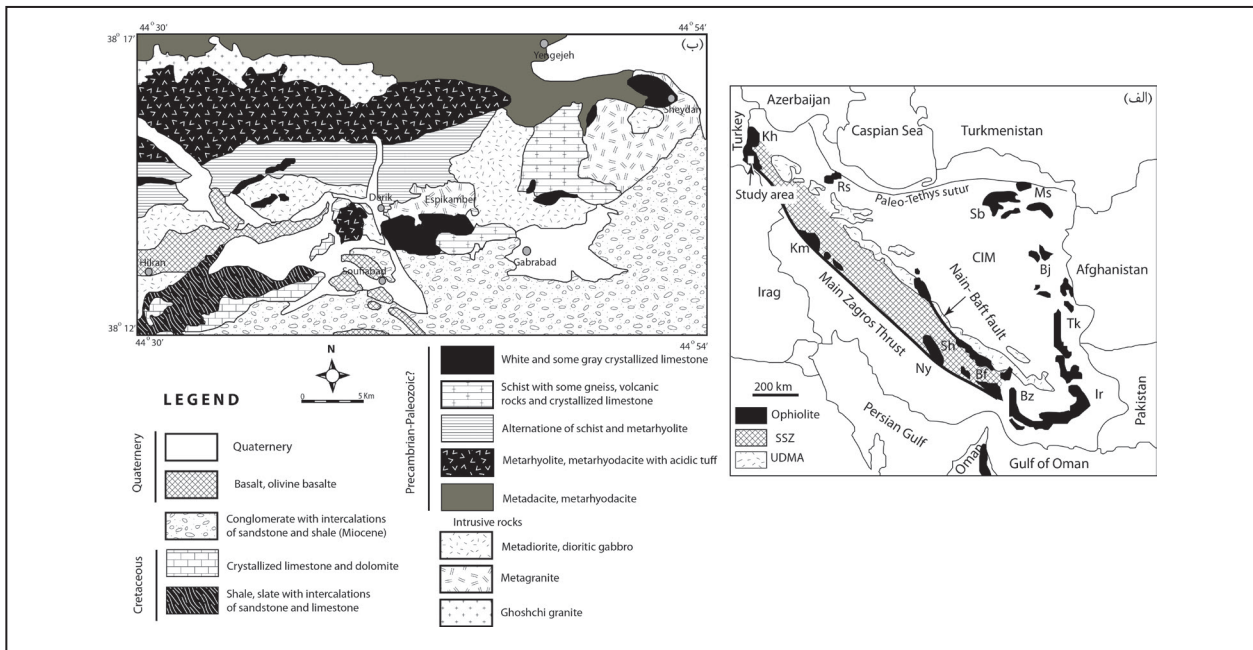
منطقه مورد مطالعه در شمال باختری ایران و شمال باختری شهرستان سلماس (استان آذربایجان غربی) واقع شده است. این منطقه با توجه به تقسیمات واحدهای ساختمانی- رسوبی ایران (Stöcklin, 1968) بخشی از زون سنندج- سیرجان به شمار می‌رود. گرچه خصوصیات اصلی و بارز زون سنندج- سیرجان در این منطقه قابل مشاهده نیست؛ ولی می‌توان این منطقه را به عنوان بخش پایانی زون سنندج- سیرجان در نظر گرفت (Sabzehi and Mohammadiha, 2003). در شکل ۱- الف موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران (Emami et al., 1993) نشان داده شده است. در این منطقه توده‌های نفوذی به همراه سنگ‌های دگرگونی (در حد شیبست سبز و آمفیبولیت) با سن پرکامبرین و سنگ‌های رسوبی با سن میوسن و کواترنری رخنمون دارند (Ghaffari et al., 2013; Khodabandeh et al., 2002). توده‌های نفوذی رخنمون یافته در منطقه شمال باختری سلماس دارای ترکیب سنگ‌شناسی متنوعی هستند. گرانیتوئیدها و گابروئیدها ترکیب عمده توده‌های نفوذی در این منطقه را تشکیل می‌دهند (شکل ۱- ب). سن این توده‌ها ناشناخته است ولی (Ghaffari et al., 2013) با توجه به جایگیری اکثر توده‌های نفوذی موجود در زون سنندج- سیرجان عمدتاً در طول دوره کرتاسه، سن توده‌های نفوذی شمال باختری سلماس را به کرتاسه نسبت داده‌اند. ایشان با توجه

الیوندار شمال باختری سلماس، با انجام مطالعات سنگ‌نگاری آمفیبول‌های موجود در بافت‌های مختلف تعیین و توسط دستگاه میکروپروب JEOL, JXA-8200 با ولتاژ شتاب‌دهنده 15kV و شدت جریان nA20 به صورت نقطه‌ای تجزیه شدند. به منظور تعیین میزان عناصر کمیاب موجود در ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه در بافت‌های مختلف از دستگاه LA-ICP-MS مدل CETAC LSX-213G2 استفاده شد. از استانداردهای بین‌المللی و داخلی تهیه شده از کانی‌های طبیعی و مواد مصنوعی برای کالیبراسیون دستگاه‌ها استفاده شد. تمامی تجزیه‌های صورت گرفته در این تحقیق در دانشگاه پتسدام کشور آلمان صورت گرفته است.

به نتایج حاصل از مطالعات ژئوشیمیایی، تبلور تفریقی را در تشکیل سنگ‌های این منطقه عامل مهمی بیان کرده و سنگ‌های مافیک موجود در شمال باختری سلماس را ناشی از ذوب بخشی در حدود ۵ تا ۲۰٪ از منشأی با ترکیب اسپینل-پریدوتیت در عمق تقریبی ۵۲ کیلومتر در نظر گرفته‌اند. بر اساس مطالعات ایزوتوپی صورت گرفته توسط این محققان نقش آرایش پوسته‌ای در تحول این سنگ‌ها ناچیز است.

۳- روش کار

در مطالعه حاضر جهت بررسی منشأ آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای



شکل ۱- الف) موقعیت منطقه مورد مطالعه در نقشه تقسیم‌بندی ساختارهای زمین‌شناسی ایران (برگرفته از Emami et al., 1993). در این تقسیم‌بندی محدوده مورد مطالعه در زون سنندج- سیرجان واقع شده است؛ ب) نقشه زمین‌شناسی شمال باختری سلماس (برگرفته از Khodabandeh et al., 2002). SSZ: زون سنندج- سیرجان، UDMA: کمان ماگمایی ارومیه- دختر، CIM: خردقاره ایران مرکزی، افولیت‌های Kh: خوی، Km: کرمانشاه، Ny: نیریز، Sh: شهر بابک، Bf: بافت، Bz: بزمان، Ir: ایرانشهر، Tk: چهل کوره، Bz: بیرجند، Sb: سبزوار، Ms: مشهد و Rs: رشت.

۴- روابط بافتی آمفیبول

هورنبلند-گابروهای الیوندار از پلاژیوکلاز، آمفیبول، کلینوپیروکسن، ارتوپیروکسن به همراه مقادیر کمی الیون تشکیل شده‌اند. در این سنگ‌ها هورنبلند به عنوان کانی اصلی بوده و بخش قابل توجهی از ترکیب سنگ را به خود اختصاص داده است. مگنتیت و آپاتیت به عنوان کانی فرعی در این سنگ‌ها حضور دارند. الیون در هورنبلند- گابروهای الیوندار اغلب توسط حاشیه‌های واکنشی چندلایه شامل مجموعه سیمپلکتیت ارتوپیروکسن + مگنتیت و آمفیبول از پلاژیوکلازها جدا شده است.

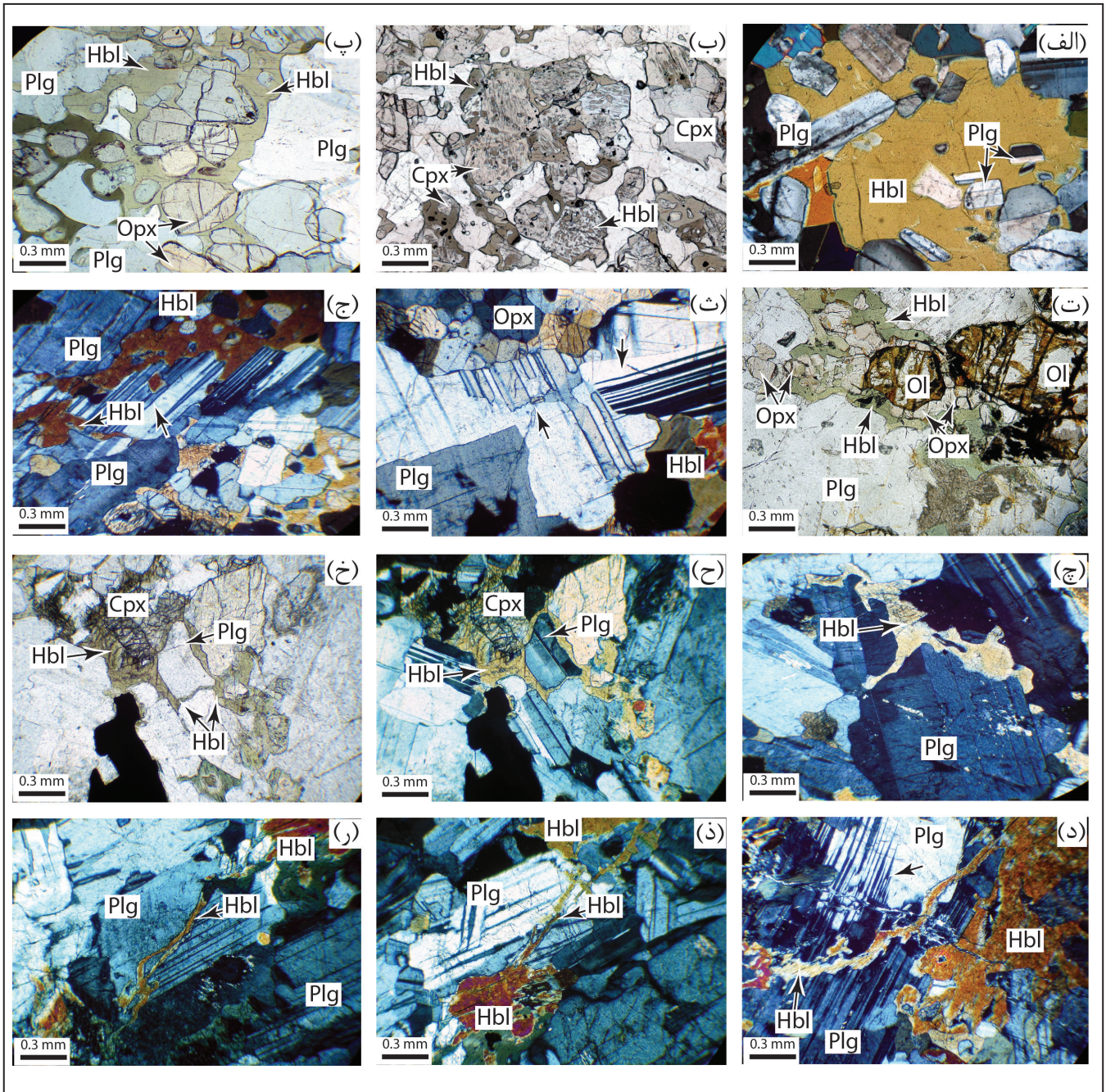
بر اساس مطالعات سنگ‌شناسی، آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های مورد مطالعه در بافت‌های مختلفی تشکیل شده‌اند. این بافت‌ها عبارتند از: ۱) آمفیبول‌های درشت در زمینه سنگ با بافت اویکوکریست که عمدتاً حاوی انکلوزیون‌هایی از پلاژیوکلازهای خودشکل تا نیمه‌خودشکل هستند (شکل ۲- الف)؛ ۲) آمفیبول‌هایی که حاصل تبدیل کلینوپیروکسن‌ها از حاشیه و محل رخ‌ها هستند (شکل ۲- ب)؛ ۳) آمفیبول‌هایی که در بیرونی‌ترین قسمت حاشیه‌های واکنشی موجود در اطراف الیون‌ها قرار گرفته‌اند (شکل ۲- ت)؛ ۴) آمفیبول‌هایی که به صورت بافت interstitial در بین کانی‌های دیگر به ویژه پلاژیوکلازها قرار گرفته‌اند (شکل‌های ۲- ث، ح و خ). درون آمفیبول‌هایی که بافت interstitial از خود نشان می‌دهند؛ بلورهای ارتوپیروکسن با اشکال تقریباً گرد قابل مشاهده هستند (شکل ۲- پ).

بررسی روابط بافتی بین پلاژیوکلاز و آمفیبول در سنگ‌های مورد مطالعه بیانگر دگرشکلی پلاژیوکلازهای درشت‌بلور در زمینه سنگ است. این کانی‌ها اغلب حاوی ماگل‌های خمیده هستند (شکل‌های ۲- ج، د، ذ و ر) و در برخی موارد ریزترک‌هایی در سطح آنها مشاهده می‌شود؛ در صورتی که هیچ‌گونه آثار دگرشکلی در آمفیبول‌ها وجود ندارد. همچنین ریزترک‌های موجود در سطح پلاژیوکلازها اغلب توسط هورنبلند پر شده‌اند (شکل‌های ۲- د، ذ و ر). در موارد متعددی نیز پلاژیوکلازها توسط لایه نازکی از آمفیبول احاطه شده‌اند (شکل‌های ۲- ح و خ). لازم به ذکر است که خوردگی در پلاژیوکلازهایی در تماس با آمفیبول به وفور قابل مشاهده است (شکل‌های ۲- پ تا ر).

۵- شیمی کانی آمفیبول

۵-۱. عناصر اصلی

بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، آمفیبول‌های موجود در نمونه‌های مورد مطالعه دارای بافت‌های مختلفی هستند. از این رو جهت بررسی شیمی کانی آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های مافیک شمال باختری سلماس، آمفیبول‌های موجود در هر یک از بافت‌ها به‌طور جداگانه مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تجزیه این کانی‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۲- تصاویر میکروسکوپی از آمفیبول در بافت‌های مختلف از هورنبلند- گابروهای الیون‌دار موجود در شمال‌باختری سلماس؛ الف) آمفیبول با بافت اویکو کریست در زمینه سنگ حاوی ادخال‌هایی از پلاژیوکلازهای خودشکل (نور XPL)؛ ب) جایگزینی کلینوپیروکسن از حاشیه و محل رخ‌ها با آمفیبول (نور PPL)؛ پ) حضور ارتوپیروکسن با حاشیه‌های گرد شده درون آمفیبول. به حاشیه‌های خورده شده در محل تماس آمفیبول با پلاژیوکلاز توجه شود (نور PPL)؛ ت) حضور آمفیبول در بیرونی‌ترین بخش حاشیه‌های واکنشی چندلایه در اطراف الیون (نور PPL)؛ ث، ج و چ) ماکل‌های خمیده و دگرشکل شده در پلاژیوکلاز و خوردگی پلاژیوکلاز توسط آمفیبول (نور XPL)؛ ح) وجود لایه نازکی از آمفیبول در حاشیه پلاژیوکلاز (نور XPL)؛ خ) تصویر (ح) در نور PPL؛ د، ذ و ر) پر شدن ریزترک‌های موجود در پلاژیوکلاز توسط آمفیبول (نور XPL)؛ Plg: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Opx: ارتوپیروکسن، Ol: الیون و Cpx: کلینوپیروکسن.

جدول ۱- نتایج حاصل از تجزیه نقطه‌ای کانی آمفیبول موجود در بافت‌های مختلف در هورنبلند- گابروهای الیونین دار شمال باختری سلماس.

Sample number	Reactin rim			Matrix			After Cpx		
	66	70	72	92	98	121	99	116	115
SiO ₂	44.29	44.71	44.83	44.61	43.90	45.41	46.47	47.09	47.16
TiO ₂	1.48	1.45	1.82	2.54	2.18	2.48	1.36	1.11	1.75
Al ₂ O ₃	12.70	12.21	11.39	10.37	10.19	10.09	6.31	8.79	8.72
FeO	11.35	11.09	12.38	14.86	14.26	14.80	12.68	12.82	12.22
MnO	0.11	0.09	0.15	0.14	0.16	0.15	0.13	0.10	0.12
MgO	15.02	14.94	14.43	12.86	12.78	12.81	14.23	14.94	15.27
CaO	11.44	11.50	11.45	11.19	11.40	11.39	12.92	11.61	11.41
Na ₂ O	2.15	1.92	1.92	1.93	1.80	1.81	1.15	1.34	1.53
K ₂ O	0.33	0.30	0.34	0.31	0.34	0.30	0.24	0.24	0.25
Cr ₂ O ₃	0.07	0.04	0.00	0.03	0.07	0.01	0.09	0.19	0.13
Total	98.94	98.24	98.71	98.83	97.05	99.24	95.57	98.23	98.55
Structural formula based on 23 O									
Si	6.23	6.33	6.36	6.41	6.43	6.50	6.95	6.69	6.67
Al ^{IV}	1.77	1.67	1.64	1.59	1.57	1.50	1.05	1.31	1.33
Al ^{VI}	0.34	0.36	0.27	0.17	0.19	0.21	0.06	0.16	0.12
Ti	0.16	0.15	0.19	0.27	0.24	0.27	0.15	0.12	0.19
Cr	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.02	0.01
Fe ³⁺	1.02	0.93	0.92	0.83	0.73	0.70	0.15	0.95	0.90
Fe ²⁺	0.32	0.39	0.55	0.95	1.02	1.07	1.43	0.58	0.54
Mn	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01
Mg	3.15	3.15	3.05	2.75	2.79	2.73	3.17	3.16	3.22
Ca	1.72	1.74	1.74	1.72	1.79	1.75	2.07	1.77	1.73
Na	0.59	0.53	0.53	0.54	0.51	0.50	0.33	0.37	0.42
K	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.05	0.05	0.04	0.05
OH*	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Total	17.37	17.32	17.33	17.32	17.36	17.31	17.45	17.18	17.19

در زمینه با Al₂O₃ (۱۰/۰۹-۱۰/۳۶۶ wt %) و MgO (۱۲/۷۷۹-۱۲/۸۶۱ wt %) نسبتاً پایین و TiO₂ (۲/۱۷۵-۲/۵۳۵ wt %) و FeO (۱۴/۲۵۵-۱۴/۸۵۷ wt %) بالا و آمفیبول‌های موجود در حاشیه و محل رخ کلتیوپروکسن‌ها با Al₂O₃ بسیار پایین (۶/۳۰۸-۸/۷۹۴ wt %)، TiO₂ (۱/۱۰۹-۱/۷۴۹ wt %) و SiO₂ (۱۴/۲۳۲-۱۴/۹۳۸ wt %) و FeO (۱۲/۲۱۹-۱۲/۸۲۲ wt %) پایین و (۴۶-۴۶۸-۴۷/۱۵۸ wt %) به ترتیب برای آمفیبول‌های موجود در اطراف حاشیه‌های واکنشی، آمفیبول‌های موجود در زمینه و حاشیه و محل رخ‌های کلتیوپروکسن‌ها به ترتیب برابر با ۰/۸۸-۰/۹۱، ۰/۷۲-۰/۷۴ و ۰/۸۶-۰/۶۹ است.

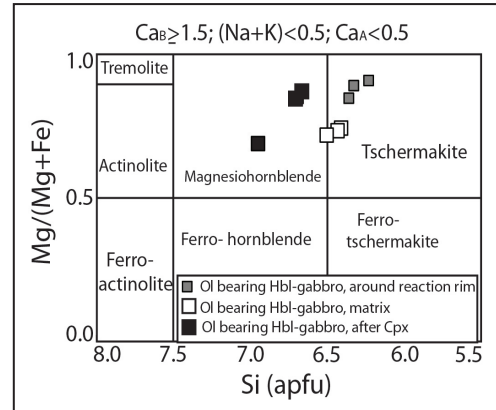
۵-۲. عناصر کمیاب

با توجه به تشکیل آمفیبول در بافت‌های متعدد در هورنبلند- گابروهای الیونین دار در شمال باختری سلماس، جهت تعیین فراوانی عناصر کمیاب، آمفیبول‌ها در دو بافت interstitial و آمفیبول‌هایی که در حاشیه کلتیوپروکسن‌ها واقع شده‌اند؛ مورد تجزیه قرار گرفتند. نتایج حاصل از تجزیه کانی آمفیبول موجود در ترکیب سنگ‌های گابرویی منطقه سلماس به تفکیک در جدول ۲ نشان داده شده است.

در تحقیق حاضر، با توجه به اینکه آمفیبول‌های interstitial و آمفیبول‌های موجود در متن سنگ دارای شیمی و ترکیب یکسان بودند؛ گروه اول و آمفیبول‌های موجود در حاشیه کلتیوپروکسن‌ها گروه دوم و آمفیبول‌های موجود در اطراف حاشیه‌های واکنشی الیونین گروه سوم در نظر گرفته شده‌اند. در این مطالعه، صرفاً شیمی عناصر اصلی آمفیبول‌های موجود در بیرونی‌ترین قسمت حاشیه‌های واکنشی (گروه سوم) بررسی شده است. با توجه به تقسیم‌بندی (Leake et al. 1997) کانی‌های مطالعه شده از نوع آمفیبول‌های کلسیک هستند. در نمودار تقسیم‌بندی ارائه شده برای آمفیبول‌های کلسیک توسط (Leake et al. 1997)، آمفیبول‌های موجود در زمینه و اطراف حاشیه‌های واکنشی در هورنبلند- گابروهای الیونین دار در محدوده چرماکیت و آمفیبول‌های تشکیل شده در حاشیه و محل رخ‌های کلتیوپروکسن‌ها در محدوده هورنبلند واقع شده‌اند (شکل ۳).

در هورنبلند- گابروهای الیونین دار، آمفیبول‌های واقع در بیرونی‌ترین قسمت حاشیه‌های واکنشی اطراف الیونین با Al₂O₃ (۱۱/۳۹۴-۱۲/۶۹۸ wt %) و MgO (۱۴/۴۳۴-۱۵/۰۱۸ wt %) بالا و TiO₂ (۱/۴۵۲-۱/۸۱۸ wt %) و FeO (۱۱/۰۹۱-۱۲/۸۲۲ wt %) پایین، آمفیبول‌های موجود

شکل ۳- نمودار طبقه‌بندی آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای الیون‌دار شمال باختری سلماس (برگرفته از Leake et al., 1997).



جدول ۲- نتایج حاصل از تجزیه عناصر کمیاب موجود در ترکیب کانی آمفیبول موجود در هورنبلند- گابروهای الیون‌دار شمال باختری سلماس (ppm) به روش LA-ICP-MS.

Element	interstitial amphibole							after Cpx amphibole			
	6	7	8	9	11	15	19	25	35	36	38
Sc	113.67	144.34	133.12	123.65	118.07	126.26	133.32	98.78	105.34	88.8	94.17
Ti	14094.58	15591.56	14458.87	14219.37	13816.37	14729.13	13871.05	12123.41	11213.57	9851.77	11288.28
V	945.46	1113.05	1103.17	1087.76	1010.33	846.81	980.8	849.68	776.13	712.64	856.03
Cr	86.1	156.61	133.78	113.61	141.59	92.56	83.83	137.65	303.8	185.64	145.59
Ni	88.15	80.44	74.76	70.95	75.09	84.52	80.17	87.89	102.29	85.86	109.27
Rb	4.16	1.42	4.71	4.09	12.3	5.44	1.49	9.35	12.1	14.72	8.73
Sr	78.74	70.55	72.39	59.59	73.78	77.24	64.99	78.96	123.91	60.73	56.25
Y	45.69	74.81	67.85	69.61	54.46	53.19	104.43	43.37	40.24	32.23	39.8
Zr	64.95	79.1	83.91	99.52	79.69	81.66	125.62	71.33	70.1	63.96	70.06
Nb	12.55	17.65	16.84	17.13	15.42	14.32	19.03	11.54	9.53	7.65	9.32
Ba	68.78	82.7	101.55	104.72	109.68	91.34	80.56	89.83	112.6	89.72	67.01
La	7.1	7.06	6.61	7.83	7.11	7.04	8.55	6.61	6.31	5.5	6.1
Ce	22.77	23.31	23.48	29.33	23.59	22.07	34.85	21.21	21.19	17.48	21.38
Pr	3.89	4.55	4.77	5.57	3.96	3.89	7.13	3.77	3.45	2.92	3.14
Nd	19.14	25.79	25.24	29.13	21.09	19.47	38.54	18.11	17.08	13.17	16.24
Sm	5.81	9	8.6	10.56	7.4	5.38	13.14	4.59	4.98	4.27	4.18
Eu	1.53	1.51	1.53	1.51	1.77	1.48	2.01	1.57	1.11	1.13	1.38
Gd	6.07	13.01	12.67	12.46	9.02	9.53	19.81	6.46	6.27	5.02	6.02
Tb	1.33	2.21	2.15	2.02	1.67	1.57	3.28	1.2	1.19	0.81	0.96
Dy	8.46	16.32	13.54	14.05	10.65	10.99	21.22	7.56	7.73	5.52	7.15
Ho	1.97	3.33	2.74	3.24	2.19	2.37	4.38	1.81	1.45	1.41	1.59
Er	5.63	9.04	8.68	8.44	7.38	6.76	12.77	5.59	5.09	3.76	4.64
Tm	0.893	1.08	1.103	1.013	1.03	0.801	1.32	0.774	0.701	0.513	0.522
Yb	5.6	5.95	5.86	7.13	5.52	6.42	9.67	4.65	4.32	3.81	4.77
Lu	0.86	0.91	0.87	1.13	0.99	0.71	1.25	0.85	0.57	0.63	0.81
Hf	1.96	3.12	3.17	4.19	2.75	2.66	6.49	2.3	2.11	1.8	1.78
Ta	0.72	0.97	0.74	0.79	0.67	0.76	0.94	0.67	0.56	0.45	0.49
Pb	1.5	1.14	1.85	1.67	5.97	1.84	0.8	3.43	4.37	2.78	3.14
Th	0.148	0.183	0.195	0.179	0.17	0.187	0.15	0.156	0.136	0.128	0.09
U	0.032	0.051	0.08	0.1	0.15	0.06	0.07	0.14	0.26	0.23	0.21

(شکل های ۴- پ و ت). آمفیبول های گروه اول در هورنبلند- گابروهای الیونین دار با آنومالی منفی U، Rb و Pb و آنومالی مثبت Hf مشخص می شوند (شکل ۴- پ). در حالی که آمفیبول های گروه دوم در این سنگ ها با آنومالی مثبت Rb و Pb مشخص می شوند. آنومالی منفی Ti در این نمونه ها در مقایسه با گروه اول از آمفیبول ها ضعیف تر هستند (شکل ۴- ت). دیگر ویژگی های مشاهده شده در نمودارهای چند عنصری نرمالیز شده به گوشته اولیه برای آمفیبول های موجود در هورنبلند- گابروهای الیونین دار مشابه است و در همه نمونه های تجزیه شده آنومالی منفی Sr و Th و آنومالی منفی ضعیف La نسبت به عناصر مجاور خود (Ce و Ta) دیده می شود. گرچه آنومالی منفی Sr برای گروه دوم در مقایسه با گروه اول ضعیف تر است.

۶- منشأ آمفیبول

بر اساس روابط بافتی موجود در سنگ های مورد مطالعه (حضور آمفیبول به صورت فاز بین بلوری، عدم دگرشکلی آمفیبول ها، دگرشکلی پلاژیو کلاز و رشد آمفیبول در فضای بین ترک های این کانی، تبدیل کلینوپیروکسن از حاشیه و محل رخ ها به آمفیبول و خوردگی پلاژیو کلازها در محل تماس با آمفیبول) به نظر می رسد آمفیبول های مورد مطالعه همزمان با دیگر کانی های موجود در این سنگ ها همچون الیونین، پلاژیو کلاز و کلینوپیروکسن تشکیل نشده و در مقایسه با کانی های مذکور به صورت تأخیری تشکیل شده اند. از این رو جهت بررسی منشأ آمفیبول های موجود در سنگ های مورد مطالعه و نحوه تشکیل آنها از روابط بافتی و ترکیب عناصر اصلی و کمیاب آمفیبول ها بهره گرفته شده است.

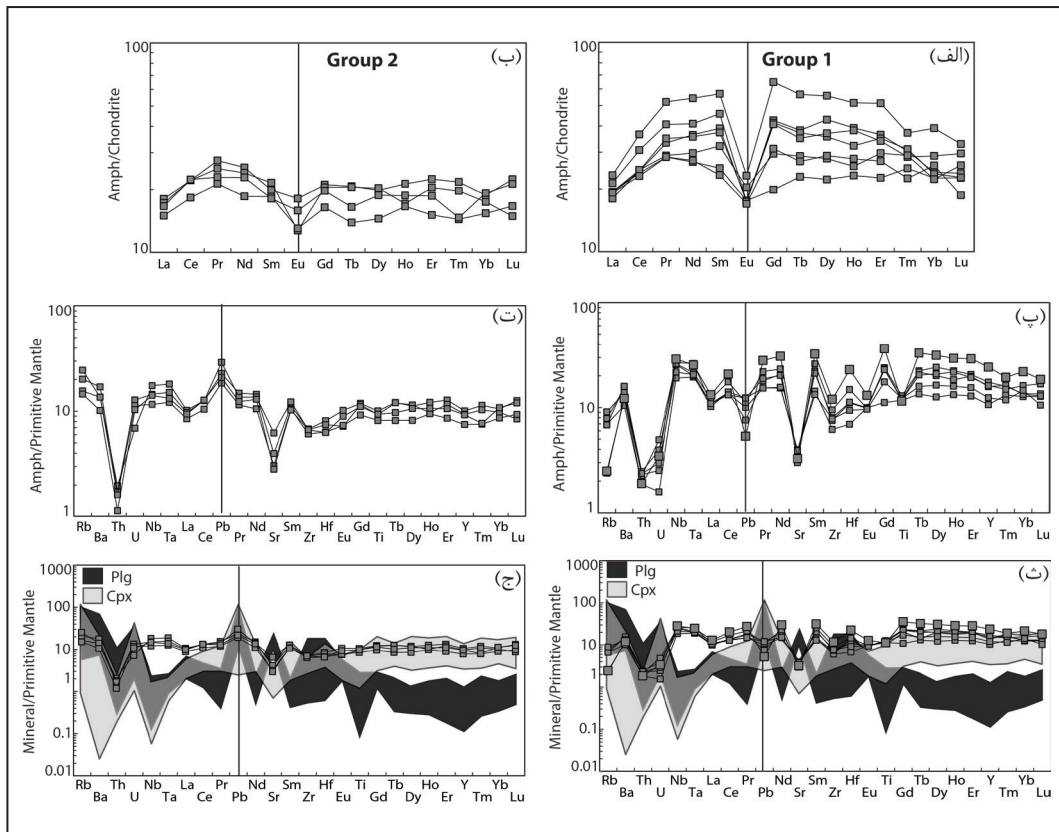
جهت تشخیص منشأ آمفیبول ها می توان از فراوانی و تغییرات عناصر سازگار همچون وانادیم بهره جست (Abd El-Rahman et al., 2012; Meurer and Claeson, 2002). آمفیبول های در مراحل اولیه در مقایسه با آمفیبول های متبلور شده در مراحل نهایی و از مذاب به شدت تحول یافته، مقادیر بالاتری از V در ترکیب خود دارند. بررسی فراوانی V در آمفیبول های موجود در سنگ های مافیک شمال باختری سلماس بیانگر متغیر بودن فراوانی این عنصر است. لازم به ذکر است که فراوانی عناصر کمیاب موجود در ترکیب آمفیبول های تجزیه شده (هم عناصر سازگار و هم عناصر ناسازگار) در نمونه های مورد مطالعه بسیار متغیر است (جدول ۲). این امر می تواند در نتیجه تغییر منظم ترکیب مذاب/سیال در طی تبلور پیشرونده آمفیبول باشد (Meurer and Claeson, 2002; Claeson and Meurer, 2004). مقدار V در آمفیبول های تجزیه شده از نمونه های هورنبلند- گابروهای الیونین دار از ۷۱۲ تا ۱۱۱۳ قسمت در میلیون در تغییر است. وجود چنین تغییرات زیادی در فراوانی V در ترکیب آمفیبول می تواند بیانگر تبلور آمفیبول های با V زیاد در مراحل اولیه تر نسبت به آمفیبول های با V کمتر باشد (Abd El-Rahman et al., 2012). در مقابل عناصری همچون Th، Nb، Zr و U جز عناصر نسبتاً تا به شدت ناسازگار هستند (Abd El-Rahman et al., 2012; Tiepolo et al., 2007) و حضور مقادیر زیادی از عناصر ناسازگار در ترکیب آمفیبول می تواند بیانگر تبلور این کانی از یک مذاب به شدت تحول یافته باشد. در شکل ۵ رفتار این عناصر در برابر V نشان داده شده است. آمفیبول های موجود در هورنبلند- گابروهای الیونین دار تطابق مثبتی برای عناصر Th، Nb و Zr در برابر V از خود نشان می دهند. رفتار U در برابر V برای تمامی نمونه های مطالعه شده چندان مشخص نیست و تطابق منفی ضعیفی از خود نشان می دهند. بررسی فراوانی عناصر سازگار دیگر همانند Ni و Cr در ساختار آمفیبول های مورد مطالعه بیانگر پایین بودن مقدار این عناصر است (جدول ۲). مقدار این عناصر به ترتیب برابر با ۷۰/۹۵ تا ۱۰۹/۲۷ و ۸۶/۱ تا ۳۰۳/۸ پی پی ام است.

الگوی عناصر نادر خاکی نرمالیز شده به کندریت برای این کانی، به طور مجزا برای آمفیبول های گروه اول و دوم موجود در هورنبلند- گابروهای الیونین دار در شکل های ۴- الف و ب ارائه شده است. الگوی عناصر کمیاب نرمالیز شده به کندریت (McDonough and Sun, 1995) برای آمفیبول های interstitial (گروه اول) در هورنبلند- گابرو الیونین دار به شکل کمائی با تحذب به سمت پایین است که با شیب مثبت LREE ها، شیب منفی HREE، غنی شدگی MREE ها و آنومالی منفی بارز Eu ($Eu/Eu^* = 0.738 - 0.666$) مشخص می شوند (شکل ۴- الف).

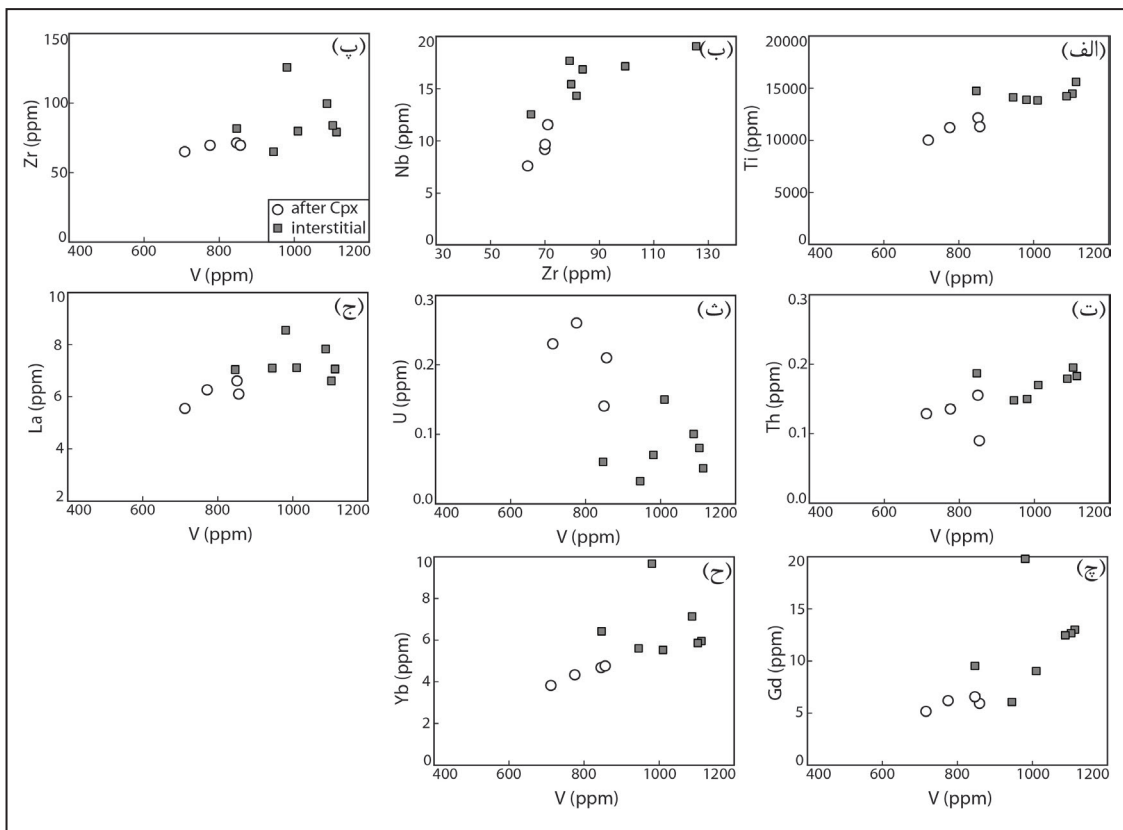
معمولاً با افزایش غلظت عناصر نادر خاکی و کمیاب در ترکیب آمفیبول ها میزان آنومالی منفی Eu در این کانی نیز افزایش می یابد. (Schilling et al., 2011) تفریق پلاژیو کلاز و اکسیدهای Fe-Ti از ماگمای اولیه را عاملی برای افزایش آنومالی منفی Eu همراه با افزایش عناصر کمیاب در ترکیب آمفیبول ها در نظر گرفته اند. ضریب توزیع عناصر نادر خاکی برای کانی های پلاژیو کلاز و اکسیدهای Fe-Ti به استثنای Eu در پلاژیو کلاز برای سیستم های بازالتی کمتر از یک است (Bindeman and Davis, 2000; Lemarchand et al., 1987). از این رو با پیشرفت تبلور در این سیستم، غلظت REE در ترکیب ماگما افزایش می یابد. گرچه تبلور آپاتیت از ماگمای بازالتی نیز منجر به تهی شدگی Eu از ترکیب ماگما می شود. ضریب توزیع Eu در این کانی در مقایسه با دیگر عناصر نادر خاکی بسیار بالاست (Paster et al., 1974). هر چند بررسی های پتروگرافی انجام شده بر روی هورنبلند- گابروهای الیونین دار حاکی از حضور کانی آپاتیت نیز در ترکیب این سنگ ها است؛ ولی بررسی شیمی عناصر نادر خاکی پلاژیو کلازهای موجود در هورنبلند- گابروهای الیونین دار نشان از آنومالی شدید مثبت Eu در این کانی دارد. بنابراین با توجه به رفتار Eu در ساختار کانی آمفیبول و نیز روابط بافتی مشاهده شده برای آمفیبول و پلاژیو کلاز، تبلور آمفیبول پس از پلاژیو کلاز صورت گرفته است. گرچه در این خصوص Murphy et al. (2012) آنومالی منفی Eu در آمفیبول را به تبلور همزمان آمفیبول و پلاژیو کلاز نسبت داده اند. نسبت $(La/Sm)_N$ در این نمونه ها از ۰/۴۱ تا ۰/۸۲ و نسبت $(Dy/Er)_N$ از ۰/۹۴ تا ۱/۱۸ در تغییر است. ویژگی های یاد شده، با ضریب توزیع عناصر نادر خاکی در کانی آمفیبول همخوانی چشمگیری دارد. MREE ها در مقایسه با LREE ها و HREE دارای ضریب توزیع بالایی در ساختمان کانی آمفیبول هستند (Bottazzi et al., 1999; Dessimoz et al., 2012; Hilyard et al., 2000; Klein et al., 1997; Tiepolo et al., 2007).

الگوی عناصر نادر خاکی نرمالیز شده به کندریت برای آمفیبول های واقع در حاشیه کلینوپیروکسن ها (گروه دوم)، از لحاظ شکل کلی مشابه با آمفیبول های گروه اول (به شکل کمائی با تحذب به سمت پایین) است (شکل ۴- ب). تفاوت اساسی موجود در الگوی عناصر نادر خاکی آمفیبول های مورد مطالعه در فراوانی عناصر نادر خاکی و تفاوت در میزان آنومالی منفی Eu در این دو گروه است. فراوانی عناصر نادر خاکی در آمفیبول های تشکیل شده در گروه دوم در مقایسه با آمفیبول های گروه اول پایین بوده و آنومالی منفی Eu در این گروه از آمفیبول ها کمتر است. نسبت Eu/Eu^* برای آمفیبول های موجود در حاشیه کلینوپیروکسن ها برابر با ۰/۶۱ تا ۰/۸۸ است. در این گروه از آمفیبول ها نسبت $(La/Sm)_N$ برابر با ۰/۸۰ تا ۰/۹۲ و نسبت $(Dy/Er)_N$ به صورت ۰/۸۸ تا ۱/۰۱ است.

بررسی نمودارهای چند عنصری نرمالیز شده به کندریت برای آمفیبول های موجود در سنگ های گابروی منطقه سلماس بیانگر وجود تفاوت های بارز برای دو گروه آمفیبول تجزیه شده در سنگ های مورد مطالعه است



شکل ۴- الف و ب) نمودار عناصر نادر خاکی نرمالیز شده به کندریت برای آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای الیون‌دار شمال‌باختری سلماس (McDonough and Sun, 1995)؛ پ و ت) نمودارهای عنکبوتی نرمالیز شده به گوشته اولیه آمفیبول‌های مورد مطالعه؛ ث و ج) نمودارهای عنکبوتی نرمالیز شده به گوشته اولیه برای کانی‌های آمفیبول، پلاژیوکلاز و کلیئوپروکسن موجود در هورنبلند- گابروهای الیون‌دار شمال‌باختری سلماس. گروه اول: آمفیبول‌هایی که در زمینه سنگ و به‌صورت بافت *interstitial* در بین کانی‌های دیگر واقع شده‌اند؛ گروه دوم: آمفیبول‌های تشکیل شده در حاشیه کلیئوپروکسن‌ها.

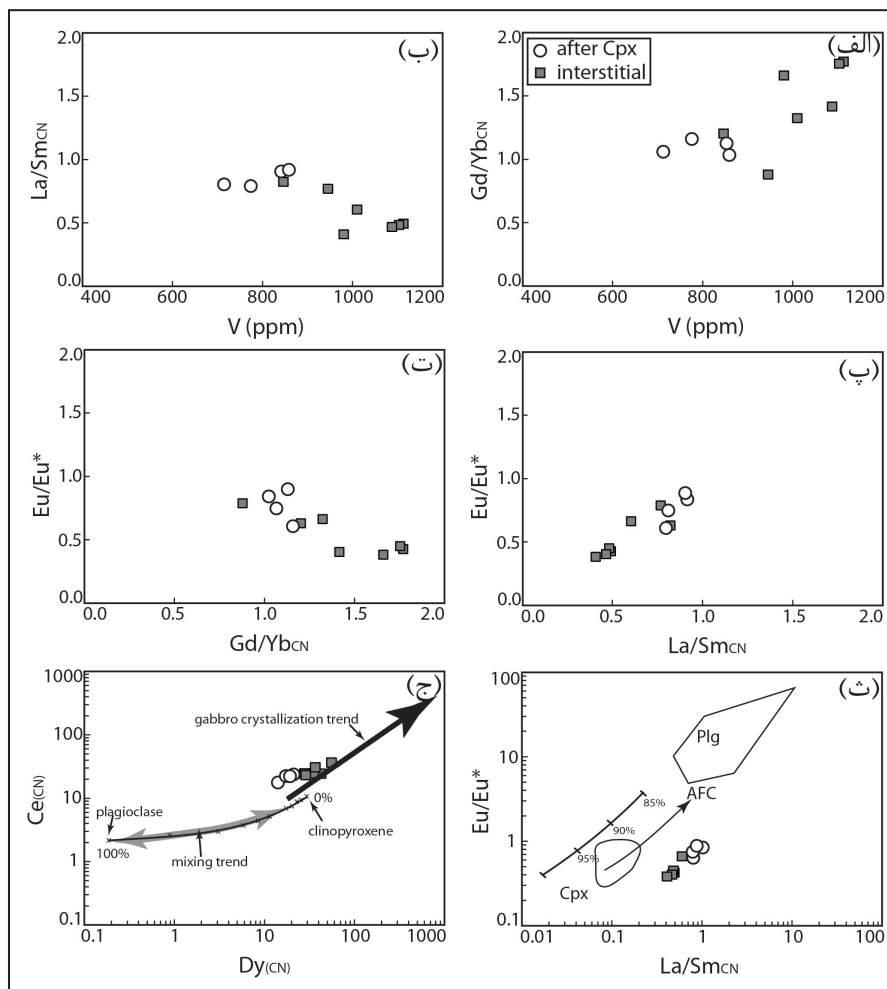


شکل ۵- نمودار دوتایی عناصر کمیاب در برابر V به جز شکل (ب)؛ ب) نمودار دوتایی Nb در برابر Zr.

AFC ارائه شده توسط DePaolo (1981) و Coogan et al. (2001) تأثیر پلاژیوکلاز در تشکیل آمفیبول‌های منطقه شمال باختری سلماس زیاد است (شکل ۶-ث). گرچه در نمودار $Ce_{(CN)}$ در برابر $Dy_{(CN)}$ (Gillis and Meyer, 2001) تأثیر کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در تشکیل آمفیبول‌های مورد مطالعه مشهود است (شکل ۶-ج). در این خصوص، مقایسه الگوی عناصر نادر خاکی بین آمفیبول و کلینوپیروکسن‌های موجود در هورنبلند-گابروهای شمال باختری سلماس (به ویژه آمفیبول‌های گروه دوم) بیانگر شباهت این دو الگو با یکدیگر است (شکل‌های ۴-ث و ج). این امر می‌تواند تأثیر کلینوپیروکسن بر تبلور آمفیبول در سنگ‌های مورد مطالعه را آشکار کند. همانطور که در بخش شیمی عناصر کمیاب آمفیبول نیز ذکر شد؛ دو گروه آمفیبول در سنگ‌های مورد مطالعه وجود دارد. گروه اول با آنومالی منفی U، Th، Rb و Pb و مقادیر نسبتاً بالای LREE و HREE و گروه دوم با آنومالی مثبت Rb و Pb و در مقایسه با گروه اول مقادیر پایین تری از REE مشخص می‌شوند. بررسی نمودارهای عنکبوتی نرمالیز شده به گوشته اولیه برای پلاژیوکلازهای موجود در سنگ‌های مورد مطالعه بیانگر وجود آنومالی مثبت U، Pb، Rb و Sr در ترکیب این کانی است. از این رو مقایسه میزان عناصر کمیاب موجود در آمفیبول‌های موجود در بافت‌های مختلف سنگ‌های مورد مطالعه (آمفیبول‌های موجود در زمینه بافت interstitial و آمفیبول‌هایی که پس از کلینوپیروکسن تشکیل شده‌اند) بیانگر تأثیر کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز در ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه است.

استفاده از ترکیب REE‌ها در آمفیبول با در نظر گرفتن رفتار منسجم این عناصر می‌تواند کمک زیادی در تشخیص و شناسایی منشأ آمفیبول‌ها کند (Coogan et al., 2001). بررسی‌های انجام شده بر روی ضریب توزیع REE‌ها در ساختمان آمفیبول، بیانگر شرکت بالای MREE‌ها در مقایسه با LREE‌ها و HREE‌هاست (Dessimoz et al., 2012; Hilyard et al., 2000; Klein et al., 1997) از این رو، به منظور بررسی رفتار REE‌ها، از نمودارهای Eu/Eu^* در برابر $(La/Sm)_N$ (شکل‌های ۶-پ و ث) و Eu/Eu^* در برابر $(Gd/Yb)_N$ (شکل ۶-ت) استفاده شده است. همه نمونه‌های تجزیه شده در نمودار Eu/Eu^* در برابر $(La/Sm)_N$ تطابق مثبت خوب و در نمودار Eu/Eu^* در برابر $(Gd/Yb)_N$ تطابق منفی خوبی از خود نشان می‌دهند. آمفیبول‌های موجود گروه اول در هورنبلند-گابروهای البویندار در مقایسه با آمفیبول‌های گروه دوم دارای مقادیر بالاتری از نسبت $Gd/Yb(N)$ و مقادیر پایین تری از نسبت $(La/Sm)_N$ هستند (شکل‌های ۶-الف و ب). بر اساس مطالعات Abd El-Rahman et al. (2012) این خصوصیات نشان‌دهنده تبلور آمفیبول‌های گروه اول قبل از آمفیبول‌های گروه دوم است. این ویژگی با تطابق مثبت بین Gd و Yb در برابر V نیز تأیید می‌شود (شکل‌های ۵-چ و ح).

در این خصوص Coogan et al. (2001) با استفاده از نمودار Eu/Eu^* در برابر $(La/Sm)_N$ و وجود تطابق مثبت بین این دو نسبت در آمفیبول‌ها تشکیل آمفیبول را در اثر واکنش مذاب باقیمانده غنی از آب با پلاژیوکلاز در نظر می‌گیرد. بر اساس روند



شکل ۶- الف) نمودار $Gd/Yb_{(CN)}$ در برابر V؛ ب) نمودار $La/Sm_{(CN)}$ در برابر V؛ پ) نمودار Eu/Eu^* در برابر $(La/Sm)_{CN}$ ؛ ت) نمودار Eu/Eu^* در برابر $(Gd/Yb)_{CN}$ ؛ ث) نمودار Eu/Eu^* در برابر La/Sm_{CN} جهت نشان دادن تأثیر پلاژیوکلاز بر ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه (برگرفته از DePaolo, 1981 و Coogan et al., 2001)؛ ج) نمودار Ce_{CN} در برابر Dy_{CN} به منظور شناسایی تأثیر پلاژیوکلاز و کلینوپیروکسن بر ترکیب آمفیبول (نمودار برگرفته از Gillis and Meyer, 2001).

۷- نتیجه‌گیری

دارد. بر اساس مطالعات ایشان، آمفیبول‌های حاوی مقادیر پایین V، مقادیر پایینی از REE نیز در ترکیب خود دارند و میزان آنومالی منفی Eu در آنها کاهش می‌یابد و یا از بین می‌رود. بررسی الگوی REE نرمالیز شده به کندریت برای آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای شمال باختری سلماس نیز بیانگر وجود چنین رابطه‌ای است (شکل‌های ۴- الف و ب). در این خصوص Costa et al. (2002) وجود ماکل‌های خمیده در پلاژیوکلاز و نیز پرشدگی ریزترک‌های موجود در این کانی را با هورنبلند به عنوان شاهد بافتی مبنی بر خروج مذاب/ سیال از یک ماگمای غنی از بلور به واسطه فشردگی تفسیر می‌کنند. شواهد بافتی نظیر بافت‌هایی که توسط Costa et al. (2002) در زئولیت‌های گابرویی کوه‌های سن‌پدرو شیلی گزارش شده است؛ در هورنبلند- گابروهای الیون‌دار شمال باختری سلماس نیز قابل مشاهده است (شکل ۲).

با در نظر گرفتن داده‌های موجود (روابط بافتی، مجموعه کانیایی و نیز ترکیب عناصر کمیاب آمفیبول‌ها)، به نظر می‌رسد هورنبلند- گابروهای شمال باختری سلماس در طی دو مرحله تشکیل شده‌اند. مرحله اول شامل تبلور تفریقی و تشکیل کانی‌های الیون، کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز بوده و مرحله دوم شامل تأثیر مذاب باقیمانده غنی از آب بر روی کانی‌های متبلور شده در مرحله قبل بویژه کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز و تبلور آمفیبول است. تبلور دوم‌مرحله‌ای در سنگ‌های مافیک و تشکیل مقادیر زیادی از آمفیبول که در قوس‌های وابسته به مناطق فرورانش تشکیل شده‌اند؛ امری عادی بوده و توسط محققان مختلفی همچون (Larocque and Canil, 2010)، (Smith, 2014)، (Cooper et al., 2016) و (Tiepolo and Tribuzio, 2008) گزارش شده است.

سپاسگزاری

از خانم کریستینا گونتر برای کمک در تجزیه نمونه‌ها، از دکتر اووه آلتبرگر از دانشگاه پسدام جهت راهنمایی‌های ارزنده‌شان و از آقای دکتر قرشی سردبیر محترم و همکاران ایشان در دفتر فصلنامه برای راهنمایی‌ها و کمک‌های بی‌شائبه‌شان بسیار سپاسگزاری می‌شود.

بر اساس روابط بافتی و نیز ترکیب عناصر کمیاب کانی آمفیبول در هورنبلند- گابروهای شمال باختری سلماس، به نظر می‌رسد این کانی از بلور مذاب/سیال بین بلوری (interstitial) و/یا واکنش بین مذاب/سیال بین بلوری با کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز تشکیل شده است. با در نظر گرفتن این موضوع که آمفیبول در حین عبور مذاب/سیال بین بلوری از میان نمونه‌های مورد مطالعه متبلور شده است؛ بایستی از عناصر سازگار تھی و از عناصر ناسازگار غنی شود. بررسی ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه بیانگر غنی‌شدگی این کانی‌ها هم از عناصر ناسازگار همچون Zr و هم از عناصر سازگار همچون V در ترکیب خود نسبت به دیگر کانی‌های موجود در سنگ‌های مورد مطالعه مانند کلینوپیروکسن و پلاژیوکلاز هستند. گرچه تغییرات مشاهده شده در فراوانی این عناصر نیز بسیار زیاد است. با این وجود رابطه مستقیمی بین فراوانی عناصر سازگار و ناسازگار در آمفیبول‌های مورد مطالعه وجود دارد و با افزایش مقدار عناصر سازگار مانند V بر مقدار عناصر ناسازگار مانند Nb و Zr نیز افزوده می‌شود. روند مشاهده شده برخلاف روند مورد انتظار برای تبلور آمفیبول است. معمولاً آمفیبول‌هایی که در مراحل اولیه تبلور از مذاب جدا می‌شوند؛ از عناصر سازگار غنی و در مقابل آن از عناصر ناسازگار تھی هستند. به منظور بررسی نحوه تبلور آمفیبول از مذاب/سیال بین بلوری مدل‌های مختلفی همچون تبلور در سیستم بسته، تبلور در سیستم باز و تبلور در سیستم اشباع از بخار توسط (Meurer and Claesson, 2002) ارائه شده است.

مدل تبلور در سیستم بسته با توجه به روابط ترکیبی مشاهده شده در آمفیبول‌های موجود در هورنبلند- گابروهای شمال باختری سلماس (رفتار مشابه عناصر سازگار و ناسازگار و نیز بالا بودن فراوانی عناصر سازگار در ترکیب آمفیبول) قابل استفاده در توجه منشأ و نحوه تبلور این کانی‌ها نیست. در مدل سیستم باز، تبلور آمفیبول را معمولاً در طی فشردگی و یا در طول جریان همرفت ترکیبی درون یک crystal mush در نظر می‌گیرند (Shirley, 1987; Smith, 2014; Sparks et al., 1985). بر اساس مطالعات (Meurer and Claesson, 2002) در این مدل نرخ تھی‌شدگی مقدار V (عناصر سازگار) در سیال/ مذاب به اندازه سیستم بسته سریع نیست و الگوی توزیع REE برای آمفیبول‌ها با فراوانی V وابستگی نزدیک

References

- Abd El-Rahman, Y., Helmy, H. M., Shibata, T., Yoshikawa, M., Arai, S. and Tamura, A., 2012- Mineral chemistry of the Neoproterozoic Alaskan-type Akarem Intrusion with special emphasis on amphibole: Implications for the pluton origin and evolution of subduction-related magma, *Lithos*, 155: 410-425.
- Anderson, J. L. and Smith, D. R., 1995- The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer, *American Mineralogist*, 80: 549-559.
- Bindeman, I. and Davis, A., 2000- Trace element partitioning between plagioclase and melt: Investigation of dopant influence on partition behavior, *Geochemica et Cosmochimica Acta*, 64: 2863-2878.
- Bottazzi, P., Tiepolo, M., Vannucci, R., Zanetti, A., Brumm, R., Foley, S. F. and Oberti, R., 1999- Distinct site preferences for heavy and light REE in amphibole and the prediction of Amph/LDREE, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 137: 36-45.
- Claesson, D. T. and Meurer, W. P., 2004- Fractional crystallization of hydrous basaltic "arc-type" magmas and the formation of amphibole-bearing gabbroic cumulates, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 147: 288-304.
- Coogan, L. A., Wilson, R. N., Gillis, K. M. and MacLeod, C. J., 2001- Near-solidus evolution of oceanic gabbros: Insights from amphibole geochemistry, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 65: 4339-4357.
- Cooper, G. F., Davidson, J. P. and Blundy, J. D., 2016- Plutonic xenoliths from Martinique, Lesser Antilles: evidence for open system processes and reactive melt flow in island arc crust, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 171: 87.
- Costa, F., Dungan, M. A. and Singer, B. S., 2002- Hornblende- and Phlogopite-Bearing Gabbroic Xenoliths from Volcán San Pedro (36°S), Chilean Andes: Evidence for Melt and Fluid Migration and Reactions in Subduction-Related Plutons, *Journal of Petrology*, 43: 219-241.
- Davidson, J., Turner, S., Handley, H., Macpherson, C. and Dosseto, A., 2007- Amphibole "sponge" in arc crust?, *Geology*, 35: 787-790.
- DePaolo, D. J., 1981- Trace element and isotopic effects of combined wallrock assimilation and fractional crystallization, *Earth and Planetary Science Letters*, 53: 189-202.

- Dessimoz, M., Müntener, O. and Ulmer, P., 2012- A case for hornblende dominated fractionation of arc magmas: the Chelan Complex (Washington Cascades), *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 163: 567-589.
- Emami, M. H., Sadeghi, M. M. and Omrani, S. J., 1993- Magmatic map of Iran, 1/1000000, Geological Survey of Iran.
- Fischer, T. P. and Marty, B., 2005- Volatile abundances in the sub-arc mantle: Insights from volcanic and hydrothermal gas discharges, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140: 205-216.
- Ghaffari, M., Rashidnejad-Omran, N., Dabiri, R., Chen, B. and Santos, J. F., 2013- Mafic-intermediate plutonic rocks of the Salmas area, northwestern Iran: their source and petrogenesis significance, *International Geology Review*, 55: 2016-2029.
- Gillis, K. M. and Meyer, P. S., 2001- Metasomatism of oceanic gabbros by late stage melts and hydrothermal fluids: Evidence from the rare earth element composition of amphiboles, *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2: 2000GC000087.
- Hilyard, M., Nielsen, R. L., Beard, J. S., Patin-Douce, A. and Blencoe, J., 2000- Experimental determination of partitioning behavior of rare earth and high field strength elements between paragonitic amphibole and natural silicate melts, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 64: 1103-1120.
- Holland, T. J. B. and Blundy, J. D., 1994- Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole plagioclase thermometry, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 116: 433-447.
- Khodabandeh, A. A., Soltani, G. A., Sartipi, A. H. and Emami, M. H., 2002- Geological map of Iran, 1:100,000 series sheet Salmas, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Klein, M., Stosch, H. G. and Seck, H. A., 1997- Partitioning of high field-strength and rare earth elements between amphibole and quartz-dioritic to tonalitic melts: an experimental study, *Chemical Geology*, 138: 257-271.
- Larocque, J. and Canil, D., 2010- The role of amphibole in the evolution of arc magmas and crust: the case from the Jurassic Bonanza arc section, Vancouver Island, Canada, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 159: 475-492.
- Leake, B. E., Woolley, A. R., Arps, C. E. S., Birch, W. D., Gilbert, M. C., Grice, J. D., Hawthorne, F. C., Kato, A., Kisch, H. J., Krivovichev, V. G., Linthout, K., Laird, J., Mandarino, J. A., Maresch, W. V., Nickel, E. H., Rock, N. M. S., Schumacher, J. C., Smith, D. C., Stephenson, N. C. N., Ungaretti, L., Whittaker, E. J. W. and Youzhi, G., 1997- Nomenclature of amphiboles: Report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names, *American Mineralogist*, 82: 1019-1037.
- Lemarchand, F., Benoit, V. and Calais, G., 1987- Trace element distribution coefficients in alkaline series, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 51: 1071-1081.
- Macpherson, C. G., Dreher, S. T. and Thirlwall, M. F., 2006- Adakites without slab melting: High pressure differentiation of island arc magma, Mindanao, the Philippines, *Earth and Planetary Science Letters*, 243: 581-593.
- McDonough, W. F. and Sun, S. S., 1995- The composition of the Earth, *Chemical Geology*, 120: 223-253.
- Meurer, W. P. and Claeson, D. T., 2002- Evolution of crystallizing interstitial liquid in an arc-related cumulate determined by LA ICP-MS mapping of a large amphibole oikocryst, *Journal of Petrology*, 43: 607-629.
- Mével, C., 1987- Evolution of oceanic gabbros from DSDP Leg 82: influence of the fluid phase on metamorphic crystallizations, *Earth and Planetary Science Letters*, 83: 67-79.
- Murphy, J. B., Blais, S. A., Tubrett, M., McNeil, D. and Middleton, M., 2012- Microchemistry of amphiboles near the roof of a mafic magma chamber: Insights into high level melt evolution, *Lithos*, 148: 162-175.
- Paster, T. P., Schauwecker, D. S. and Haskin, L. A., 1974- The behavior of some trace elements during solidification of the Skaergaard layered series, *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 38: 1549-1577.
- Sabzehi, M. and Mohammadiha, K., 2003- Geological map of Gangejin (Serow), Scale 1:100000, Geological Survey of Iran.
- Schilling, J., Marks, M. A. W., Wenzel, T., Vennemann, T., Horvath, L., Tarassof, P., Jacob, D. E. and Markl, G., 2011- The magmatic to hydrothermal evolution of the intrusive Mont Saint-Hilaire complex: Insights into the late-stage evolution of peralkaline rocks, *Journal of Petrology*, 52: 2147-2185.
- Shirley, D. N., 1987- Differentiation and Compaction in the Palisades Sill, New Jersey, *Journal of Petrology*, 28: 835-865.
- Smith, D. J., 2014- Clinopyroxene precursors to amphibole sponge in arc crust, *Nature Communications*, 5.
- Sparks, R. S. J., Huppert, H. E., Kerr, R. C., McKenzie, D. P. and Tait, S. R., 1985- Postcumulus processes in layered intrusions, *Geological Magazine*, 122: 555-568.
- Stöcklin, J., 1968- Structures history and tectonic of Iran, A review, *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 52: 1229-1258.
- Tiepolo, M. and Tribuzio, R., 2008- Petrology and U-Pb Zircon Geochronology of Amphibole-rich Cumulates with Sanukitic Affinity from Husky Ridge (Northern Victoria Land, Antarctica): Insights into the Role of Amphibole in the Petrogenesis of Subduction-related Magmas, *Journal of Petrology*, 49: 937-970.
- Tiepolo, M., Oberti, R., Zanetti, A., Vannucci, R. and Foley, S. F., 2007- Trace-Element Partitioning Between Amphibole and Silicate Melt, *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 67: 417-452.
- Wallace, P. J., 2005- Volatiles in subduction zone magmas: Concentrations and fluxes based on melt inclusion and volatile gas data, *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 140: 217-240.

Investigations on amphibole origin in olivine-bearing hornblende gabbros from NW of Salmas; NW Iran

M. Ahangari^{1*} and M. Moazzen²

¹Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

²Professore, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

Received: 2017 March 11

Accepted: 2017 September 05

Abstract

Amphiboles in olivine-bearing hornblende- gabbros from NW of Salmas were crystallized in various textures including oikocryst and interstitial textures in the matrix, outer part of reaction rims around olivine, and at the rim and cleavages of clinopyroxene. On the basis of petrographical and textural studies, amphiboles were formed later than the other minerals in the olivine-bearing hornblende- gabbros. The REE and trace element composition of amphiboles from two different textures including interstitial and matrix amphiboles (group one) and amphiboles after clinopyroxenes (group two), indicate that the studied amphiboles were formed by either crystallization of interstitial melt/fluid or interaction of interstitial melt/fluid with early crystalized minerals such as clinopyroxene and plagioclase. Hence, according to the textural and mineralogical data and trace element composition of amphiboles, olivine-bearing hornblende- gabbros were crystallized at least at two stages. The first stage include fractional crystallization and formation of olivine, clinopyroxene and plagioclase and the second stage was interaction of the relict melt/fluid with early crystalized minerals, specially clinopyroxene and plagioclase and formation of amphibole.

Keywords: Amphibole, Hornblende- gabbro, Relict melt, Salmas.

For Persian Version see pages 223 to 232

*Corresponding author: M. Ahangari; E-mail: m.ahangari@urmia.ac.ir