

بررسی شرایط دما- فشار- سیال گابروی ناحیه سیلوانا در جنوب ارومیه بر اساس شیمی بلورها

منیر مجرد

دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

نویسنده مسئول: m.modjarrad@urmia.ac.ir *

نوع مقاله: پژوهشی

دریافت: ۱۴۰۳/۴/۲۱ پذیرش: ۱۴۰۳/۷/۲۳

چکیده

در این نوشتار بر روی گابروی مرتبط با افیولیت سیلوانا در جنوب ارومیه تمرکز شده است. هدف از این مطالعه، بررسی شیمی کانی‌های تشکیل‌دهنده و احصاء اطلاعات از نحوه تشکیل این گروه سنگی با استناد به شیمی بلورها می‌باشد. گابروی منطقه سیلوانا به صورت توده‌ای درون واحدهای الترامافیک سرپانتینی شده در منطقه نفوذ کرده و به همراه سایر اجزاء افیولیت درون آمیزه رنگی در امتداد گسل اسبی‌بنار برونزد یافته است. گروه سنگی غالب از نوع گابرو تا هورنبلند گابرو بوده و فازهای اصلی آن شامل کلینوپیروکسن، آمفیبول، پلاژیوکلاز و کانی‌های تیره می‌باشد. به‌علاوه مقادیری بیوتیت، تیتانیت، کلسیت و آپاتیت نیز در حد فرعی و متفرقه در سنگ‌ها دیده می‌شوند. نتایج تجزیه نقطه‌ای نشان می‌دهد ترکیب کلینوپیروکسن در این گابرو، دیوپسیدی، آمفیبول از نوع پارگازیتی-کرسوتیتی، پلاژیوکلاز آنورتیتی، کانی تیره ایلیمیتی و بیوتیت فلوگوپیتی بوده است. ترکیب شیمیایی دو فاز آمفیبول و کلینوپیروکسن معرف تشکیل این توده گابرویی در یک محیط فرفرورانشی/جلوی قوسی می‌باشد. همچنین فشاربخشی سیال اکسیژن/آب در ماگمای مولد بالا ارزیابی شده است. دمای تبلور آمفیبول در این گابروها ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد در فشار حدود ۵ تا ۸ کیلوبار و دمای تبلور برای کلینوپیروکسن ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در فشار پایین ارزیابی شده است.

واژه‌های کلیدی: گابرو، موقعیت فرفرورانشی، شیمی بلور، فشار بخشی سیال، سیلوانا

۱- پیشگفتار

بسیاری از افیولیت‌های نئوتتیس به‌ویژه در شمال غرب ایران در یک محیط فرفرورانشی^۱ یا جلوی قوسی^۲ (مقدم و همکاران، ۲۰۲۱) و تعدادی نیز در مناطق عمیق^۳ اقیانوسی (ساکانی و همکاران، ۲۰۱۳) تشکیل یافته‌اند. این افیولیت‌ها طی مراحل فرو/فرا رانش^۴ نئوتتیس یا هنگام برخورد دو ورقه عربی- اوراسیایی (علوی، ۱۹۹۴؛ محمدی و همکاران، ۲۰۲۰) در موقعیت‌های جغرافیایی متعددی از جمله در زون سنندج-سیرجان یا زون افیولیتی زاگرس (شکل ۱) نظیر هرسین کرمانشاه، گرماب کامیاران، سروآباد مریوان، پیرانشهر، سردشت، سیلوانا در جنوب ارومیه، سرو در شمال ارومیه، خوی و غرب ماکو برونزد یافته‌اند (مجرد و همکاران، ۲۰۲۴). در اغلب موارد توده‌های گابرویی در ابعاد گوناگون در کنار تکتونایت الترامافیک در این مناطق (مانند کرمانشاه، خوی، ماکو و سرو) مشاهده شده است. مطالعه چنین توده‌های مافیکی

درک ما را از افیولیت همراه ارتقاء بخشیده و در جهت تشخیص منشأ آن کمک کننده است (پوتریکا، ۲۰۰۸؛ دیوه و همکاران، ۲۰۰۹). در این میان به‌ویژه بررسی فازهای مافیکی نظیر آمفیبول و پیروکسن در بررسی شرایط تشکیل ماگمای مولد بسیار کارساز است (لتیر و همکاران، ۱۹۸۲؛ محمودی و همکاران، ۲۰۱۸؛ فرحی و همکاران، ۲۰۲۰). در مطالعه حاضر بر روی گابروهای دره بنار ناحیه سیلوانا در جنوب ارومیه (شکل ۲) و شمال غرب ایران تمرکز کرده و سعی شده است با بررسی روابط صحرایی و مطالعه ترکیب کانی‌ها رهیافت جدیدی درباره لکه افیولیتی جنوب ارومیه موسوم به گیسسیان منطقه سیلوانا (مجرد و همکاران، ۲۰۲۴؛ مجرد، ۲۰۲۳a؛ مجرد و مؤید، ۲۰۲۴) به دست آید. نتایج حاصل مشتمل بر تشخیص و طبقه‌بندی کانی‌ها، محیط احتمالی تکتونیکی تشکیل با استناد به ترکیب کانی‌ها، فشار بخشی سیال در ماگمای مولد و نیز تخمین دما و فشار تبلور برخی فازهای

³ Abyssal

⁴ Sub-/Obduction

¹ Supra Subduction Zone

² Fore-arc

اشنویه و مسکین در نزدیکی سرو بوده (مجرد، ۲۰۲۲a) و بر اساس تعیین سن رادیوایزوتوپی روی بلور آمفیبول در گابروی کوه دالامپر در جنوب منطقه (شکل ۳) حدود ۹۴ میلیون سال سن دارد (علیزاده، ۲۰۱۲).

اساسی با روش‌های مختلف بوده است. لازم به ذکر است که ژئوشیمی سنگ کل این توده نفوذی به همراه سایر سنگ‌های آذرین پلوتونیک در این ناحیه قبلاً در مقاله دیگری بررسی شده است (مجرد، ۲۰۲۴). این توده از نظر سن و جایگاه نکتونیک قابل قیاس با توده‌های پروانه در



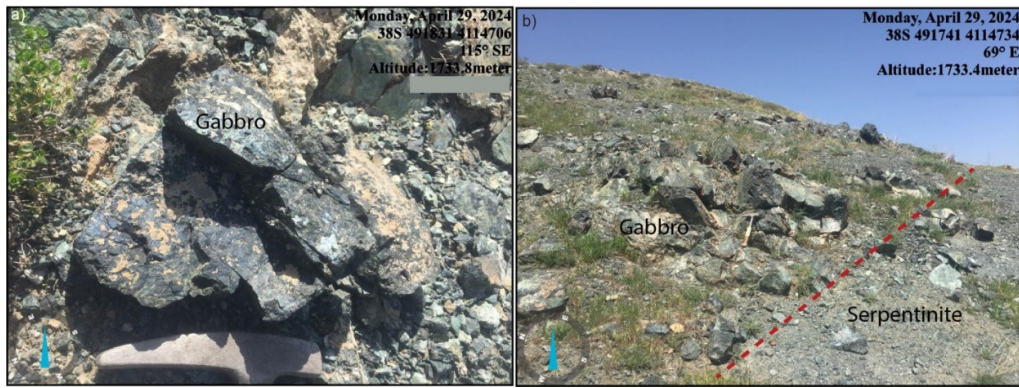
شکل ۱. نقشه زمین‌شناسی ساده شده از بلوک‌های مرتبط با نئوتتیس (واحدهای تکتونیک اصلی اقتباس شده از ون در بون و همکاران، ۲۰۱۸؛ آدامیا و همکاران، ۲۰۱۱؛ سنجور و همکاران، ۲۰۰۳؛ زانچتا و همکاران، ۲۰۰۹). افیولیت مورد بحث در شمال زون سندج-سیرجان با ستاره زرد مشخص شده است.

Fig. 1. Simplified geological map of the Neo-Tethyan related blocks (the main tectonic units modified after Van der Boon et al., 2018 and references therein; Adamia et al., 2011; Sengör et al., 2003; Zanchetta et al., 2009). Discussed ophiolite location in the north of Sanandaj-Sirjan zone is marked with a yellow star.

۲- زمین‌شناسی منطقه

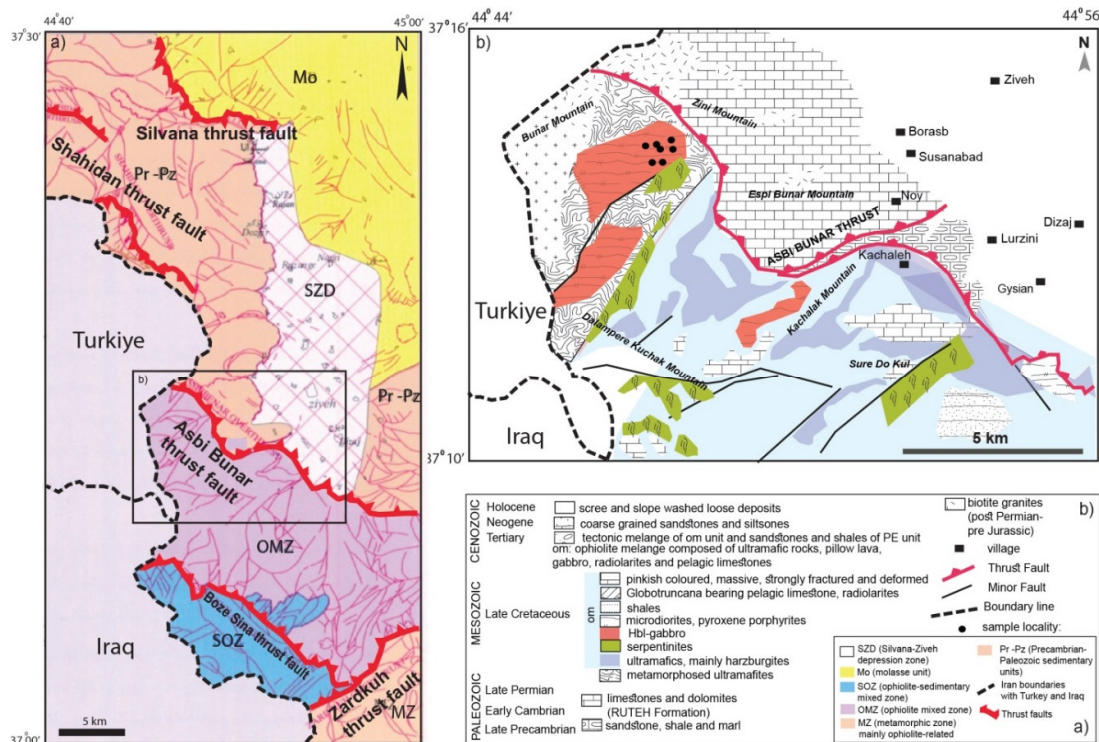
ارتفاعات بز سینا تا منطقه سوره دوکل (شکل ۳) از منظر ژئوشیمی سنگ کل (مجرد، ۲۰۲۳b) و شیمی بلور (مجرد و همکاران، ۲۰۲۴)، قبلاً مطالعه شده است. به علاوه سنگ‌های دگرگونی متاپلیتی درجه پایین در این منطقه (برجک مرزبانی کچله) وجود دارد که با شدت بالایی از هوازدگی از منبع سنگ‌های آذرین حاشیه فعال قاره مرتبط با فرورانش اقیانوس نئوتتیس، تشکیل یافته‌اند (مجرد، ۲۰۲۲b).

افیولیت ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیلوانا (حاج ملاعلی و شهرابی، ۲۰۰۶) در جنوب ارومیه که در مطالعات پیشین به دلیل نزدیکی به روستای گیسبان به این نام معرفی شده است، درست در نزدیکی مرز ایران با دو کشور ترکیه و عراق واقع شده و با توجه به ملاحظات امنیتی تا چند سال قبل هرگز شناخته نشده بود (عبدلله، ۲۰۱۷؛ رضائی، ۲۰۱۷). سنگ‌های الترامافیک این لکه کوچک افیولیتی در



شکل ۲. a, b) عکس‌های صحرایی و نمونه دستی از گابروی سیلوانا. طول و عرض جغرافیایی بر روی عکس‌ها درج شده است. همچنین در عکس b مرز بین واحد سرپانتینی با گابروها دیده می‌شود.

Fig. 2. a, b) Field photos and hand specimen of the Silvana gabbro. Grid references are plotted on the photos. Also, the contact between serpentinite unit with the gabbros is observed.



شکل ۳. a) نقشه واحدهای زمین‌شناختی منطقه و موقعیت گسل‌های تراسی ورقه سیلوانا (اقتباس از عربشاهی و سبزه‌ئی، ۲۰۱۳). مربع مشکی در نقشه b بزرگ‌نمایی شده و واحدهای سنگ‌شناختی در آن مشخص شده است. b) نقشه زمین‌شناسی ساده شده از منطقه مورد مطالعه (اقتباس شده از حاج ملاعلی و شهرابی، ۲۰۰۶). موقعیت نمونه‌برداری در نقشه علامت‌گذاری شده است.

Fig. 3. a) The Silvana ophiolite subzones and main thrust faults after Arabshahi and Sabzei (2013). The black rectangle illustrated in Fig. b and the lithologic units are indicated. b) The simplified geological map of the Silvana area (modified after Hajmolla Ali and Shahrabi, 2006). The analyzed samples locations are marked.

دقیق مورد مطالعه قرار گرفته و ارتباط آن‌ها با مراحل مختلف فروانش و تکوین اقیانوس نئوتتیس در این منطقه بررسی شده است (مجرد، ۲۰۲۴). معرفی این لکه افیولیتی منجر به اصلاح امتداد خطواره نئوتتیس در مرز ایران با ترکیه و عراق شده است. جایگیری سنگ‌های

سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه بالا در این منطقه تا کنون مشاهده نشده است. ژئوشیمی سنگ‌های آذرین درونی در این منطقه مشتمل بر گابروهای دره بنار، سینوگرانیت‌های نوع S ژارآباد و نیز گرانودیوریت‌های نوع I سوسن‌آباد بوده و از نقطه نظر ژئوشیمی سنگ کل به‌طور

به‌وسیله دستگاه تجزیه نقطه‌ای ریزکاونده الکترونی^۱ در آزمایشگاه دانشکده علوم زمین دانشگاه لودویگ ماکسی میلیان مونیخ در کشور آلمان انتخاب شد. دستگاه از نوع کامکا SX-100 بوده و کانی‌های اصلی نظیر کلینوپیروکسن، آمفیبول، پلاژیوکلاز، بیوتیت، تیتانیت، کانی‌های تیره و کلسیت در سنگ‌های مورد بحث مورد تجزیه قرار گرفتند. جداول ۱ تا ۵ نتایج این تجزیه را خلاصه کرده است. این دستگاه تمام خودکار بوده و طول موج پنج طیف پراکنده را در ابعاد ریز سنجیده است. فازهای متعددی نظیر الیون، پیروکسن، اسپینل، پلاژیوکلاز و آمفیبول و نیز مواد مرجع جهت استانداردسازی تجزیه استفاده شده است. اشعه با مشخصه ۱۵ کیلوولت و ۲۰ نانوانگستروم به طول ۱۰ تا ۳۰ ثانیه کانی‌های سیلیکاته را از نقطه نظر اکسید عناصر اصلی و کلر آزموده است. قطر اشعه یک میکرومتر بوده است. سپس جدول داده‌ها بر مبنای استانداردهایی به هنجار شده است (پاچو و پیچور، ۱۹۸۴).

۴- پتروگرافی و شیمی بلور

توده همسانگرد غیرمطبق گابرویی در کنار سنگ‌های الترامافیک گیسپان سیلوانا (به‌ویژه هارزبورژیت‌های سرپانتینی) در مناطقی از جمله نزدیکی روستای گیسپان و دره بنار برونزد دارد (مجرد و همکاران، ۲۰۲۴a) و مجرد (۲۰۲۴). این توده دارای کانی‌شناسی یکنواخت و مملو از آمفیبول و کلینوپیروکسن بوده و از حیث سنگ‌شناختی در قلمرو هورنبلند گابرو طبقه‌بندی می‌شود. کلینوپیروکسن با فراوانی ۱۵ تا ۳۰٪ حجمی (شکل ۴) و با ترکیب ۷۷ تا ۸۳٪ دیوپسیدی (شکل ۵)، آمفیبول با ۳۰ تا ۴۰٪ حجمی از نوع پارگازیت-کرسوتیت (اکسید سدیم ۲/۲٪ و آلومینیم تتراندراال سایت برابر است با ۲apfu) و در نمودار محتوای سیلسیم در برابر مجموع کلسیم، سدیم و پتاسیم در محدوده نوع ماگمایی (شکل ۶)، کانی تیره ایلمنیت خالص (حدود ۹۹٪) و پلاژیوکلاز با فراوانی ۱۰ تا ۲۰٪ حجمی با ترکیب ۹۰-۸۰٪ آنورتیت (جدول ۳)، فازهای اصلی گابروی مورد مطالعه را تشکیل داده‌اند. مقادیری بیوتیت با عدد منیزیم ۰/۶ تا ۰/۷ در کنار سرسیت (با ترکیب ۷۷٪ مسکوویت)، کلسیت، آپاتیت و تیتانیت به عنوان کانی‌های ثانویه، فرعی و متفرقه در

الترامافیک- مافیک لکه افیولیتی گیسپان و سنگ‌های همراه از جمله گابروهای مورد بحث در امتداد چند گسل تراسی اتفاق افتاده است که مهمترین آن‌ها عبارتند از گسل زردکوه با روندی شمال‌شرقی- جنوب‌غربی، گسل بزسینا با روندی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی، گسل سیلوانا با روندی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی در شمال منطقه، گسل شهیدان با روندی شمال‌غربی- جنوب‌شرقی و گسل اسبی بنار (عرب‌شاهی و سبزه‌ئی، ۲۰۱۳) که اصلی‌ترین امتداد جایگیری افیولیت گیسپان می‌باشد.

توده گابرویی مورد بحث (شکل ۲) از نقطه نظر ژنز مشابه توده‌های دیوریتی- گابرویی جنوب ارومیه نظیر دوربه، قمیشلو و یونسلو در حوالی اشنویه در جنوب و شرق سیلوانا (مجرد، ۲۰۲۴) بوده و حتی از نظر سنی با آن‌ها تشابه دارد (قلمقاش و همکاران، ۲۰۰۹). باید متذکر شد که دگرگونی مجاورتی قابل‌ملاحظه‌ای که در اطراف توده دوربه وجود دارد (هاله مجاورتی اسلاملو: مجرد و عمرانی، ۲۰۲۳) در اطراف دره بنار دیده نشده است. واحدهای گنیس، شیسست و آمفیبولیت با قدمت پراکمترین در منطقه به همراه دولومیت‌های تبلور مجدد یافته سازند سلطانیه (معدن دولومیت نوی و خوراسب) برونزد دارند. اجزاء توالی افیولیت مرزوثیک از قبیل سرپانتینیت‌ها، بازالت‌ها، دیاباز، شیل، آهک و چرت‌های رادیولریت‌دار و آمیزه رنگین بخش اعظم منطقه جنوب سیلوانا و تقریباً کل ورقه ۱:۲۵۰۰۰ سیلوانا را پوشانده‌اند (عرب‌شاهی و سبزه‌ئی، ۲۰۱۳). کنگلومرای قاعده‌ای ائوسن در این ناحیه حاوی مقادیر قابل‌توجهی از اجزاء افیولیتی اواخر کرتاسه است (حاج ملاعلی و شهرابی، ۲۰۰۶). واحدهای سنوزوئیک نظیر ماسه‌سنگ ائوسن، آهک‌های نومولیتی، و ماسه‌سنگ‌های نئوژن سازند قم بر روی آمیزه‌رنگین سیلوانا در منطقه گیسپان رسوبگذاری کرده‌اند (شکل ۳).

۳- روش کار

از بین ده‌ها نمونه سنگی از گابروهای منطقه دره بنار سیلوانا، تعداد ۲۰ نمونه جهت تهیه مقطع نازک انتخاب و توسط میکروسکوپ پلاریزان در گروه زمین‌شناسی دانشگاه ارومیه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. پس از پتروگرافی دقیق ۲ مقطع نازک معرف از متنوع‌ترین نمونه‌ها از نظر کانی‌شناسی و بافتی، جهت انجام تجزیه

¹ Electron Prob Micro Analyser (EPMA)

لیکن آمفیبول‌ها رشد قابل‌ملاحظه‌ای داشته (در ابعاد سانتی‌متر) و می‌توان گفت بصورت مگاگرست متن غالب سنگ‌ها می‌باشند. از نقطه نظر شیمیایی اغلب کانی‌های مافیک نظیر آمفیبول، بیوتیت، ایلمنیت و تیتانیت مقادیر بالایی از اکسید تیتانیم دارند (به ترتیب ۶٪، ۵٪، ۳٪ و ۳۹٪ وزنی). از اینرو شواهد نشان از متاسوماتیسم گسترده تیتانیم در فرایندهای تشکیل گابروهای مورد بحث دارد که ژئوشیمی سنگ کل نیز آنرا تایید کرده است (مجرد، ۲۰۲۴). محتوای غنی از آنورتیت پلاژیوکلازها (بیش از ۸۰٪) اغلب با تبلور پلاژیوکلاز از یک ماگمای غنی از آب تفسیر می‌شود. در حالی‌که مقادیر اندک آنورتیت در پلاژیوکلاز را با تبلور از ماگمای خشک در ارتباط می‌دانند (مانند سیسون و گرو، ۱۹۹۳). بنابراین می‌توان گفت ماگمای مولد گابروی دره بنار از آب غنی بوده است (بررسی‌های بعدی در ادامه مقاله این نکته را تایید می‌کند). در مقایسه با گابروهای افیولیتی دیگر برای مثال کرمانشاه (ساکانی و همکاران، ۲۰۱۳) این مورد مصداق ندارد.

سنگ‌ها دیده شده‌اند. از جمله ریزساختارهای قابل مشاهده در این سنگ‌ها می‌توان به پوئی‌کیلپتیک، تیغه‌های عدم امتزاجی اکسید آهن-تیتانیم در آمفیبول‌ها، افتیک، اینترگرانولار و خوردگی‌های حاشیه بلوری اشاره کرد. از منظر فراوانی حجمی کانی‌ها این سنگ‌ها در دسته گابرو تا هورنبلند گابرو قرار می‌گیرند. هیچ الیوین یا ارتوپروکسنی در آن‌ها دیده نشده و به‌جز پلاژیوکلازها که کاملاً شکل‌دار هستند مابقی بلورها مانند کلینوپروکسن، آمفیبول و ایلمنیت از نظر هندسی بی‌نظم و با حواشی تصادفی دیده می‌شوند. در بعضی نمونه‌ها فراوانی ایلمنیت در حد کانی اصلی است (بیش از ۱۰٪ حجمی) که خود نمودی از رشد متاسوماتیک آن در سنگ‌ها یا بجا ماندن بصورت باقیمانده‌ای از الیوین است. در سایر نمونه‌ها این کانی در حد فرعی و اولیه می‌باشد.

پلاژیوکلازهای الواری با دوقلویی مکرر و دگرسانی مختصر به سرسیت و کلسیت در ابعاد متوسط رشد کرده‌اند (چند میلی‌متر قطر). کلینوپروکسن‌ها کمی درشت‌تر از آن و ایلمنیت‌ها اغلب ریزدانه (در حد چند دهم میلی‌متر) بوده

جدول ۱. نتایج تجزیه نقطه‌ای توسط ریزکاونده الکترونی از کانی کلینوپروکسن در گابروهای سیلوانا و کاتیون‌های محاسبه شده بر حسب فرمول کانی. اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد و کاتیون‌ها بر حسب اتم در فرمول apfu آورده شده است.

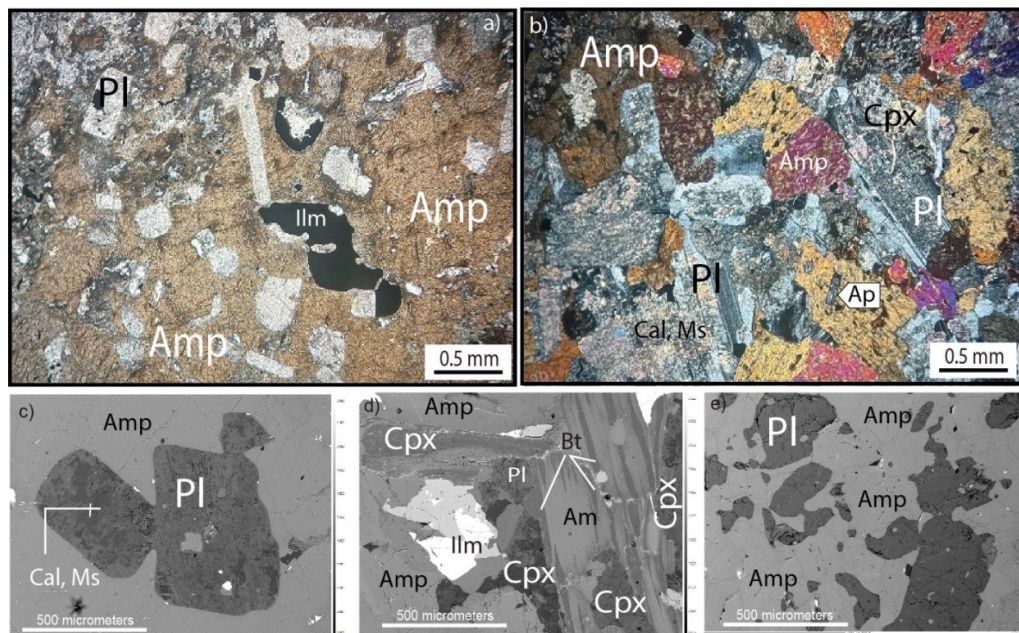
Table 1. Representative mineral chemistry and formula unit for analyzed clinopyroxene crystals in the Silvana gabbros. Major oxides in wt. % and cations in atom per formula unit. bdl: below detection limit.

GSN-01							GSN-07					
SiO ₂	52.32	51.38	54.01	53.93	49.24	52.59	51.99	52.3	54.24	53.75	53.65	51.99
TiO ₂	0.51	0.84	0.10	0.14	1.83	0.32	0.23	0.29	0.03	0.16	0.09	0.23
Al ₂ O ₃	2.08	2.75	0.67	0.78	5.10	1.89	1.96	1.70	0.50	1.25	0.22	1.96
FeO	6.46	7.66	5.85	5.83	6.77	5.92	7.93	7.55	6.18	6.90	7.93	7.55
MgO	15.06	14.06	15.02	15.14	13.20	14.66	13.91	14.07	14.39	14.39	13.91	14.07
MnO	0.14	0.22	0.25	0.19	0.20	0.12	0.34	0.32	0.25	0.27	0.34	0.32
CaO	23.29	22.10	24.12	24.44	22.74	24.18	23.17	23.26	24.76	24.02	23.17	23.26
Na ₂ O	0.31	0.45	0.15	0.13	0.60	0.31	0.32	0.32	0.21	0.27	0.32	0.32
Total	100.34	99.52	100.23	100.67	99.78	100.12	99.91	100.03	100.90	101.19	99.91	100.03
Si	1.925	1.914	1.991	1.979	1.829	1.938	1.932	1.945	1.994	1.97	2.005	1.951
Al	0.09	0.121	0.029	0.034	0.223	0.082	0.086	0.075	0.022	0.054	0.01	0.067
Fe ²⁺	0.199	0.239	0.18	0.179	0.21	0.182	0.246	0.234	0.19	0.212	0.196	0.229
Mg	0.826	0.781	0.825	0.828	0.731	0.805	0.771	0.778	0.789	0.786	0.763	0.779
Ca	0.918	0.882	0.953	0.961	0.905	0.955	0.923	0.925	0.975	0.943	1	0.936
Na	0.022	0.033	0.011	0.01	0.043	0.023	0.246	0.234	0.19	0.212	0.196	0.229
Al ^(IV)	0.075	0.086	0.009	0.021	0.171	0.062	0.068	0.055	0.006	0.03	0	0.049
Al ^(VI)	0.015	0.035	0.02	0.012	0.052	0.02	0.018	0.019	0.016	0.024	0.01	0.018
Mg [#]	0.806	0.766	0.821	0.822	0.776	0.815	75.8	76.9	80.6	78.8	79.5	77.3

جدول ۲. نتایج تجزیه نقطه‌ای توسط ریزکاونده الکترونی از کانی آمفیبول در گابروهای سیلوانا و کاتیون‌های محاسبه شده بر حسب فرمول کانی. اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد و کاتیون‌ها بر حسب اتم در فرمول apfu آورده شده است.

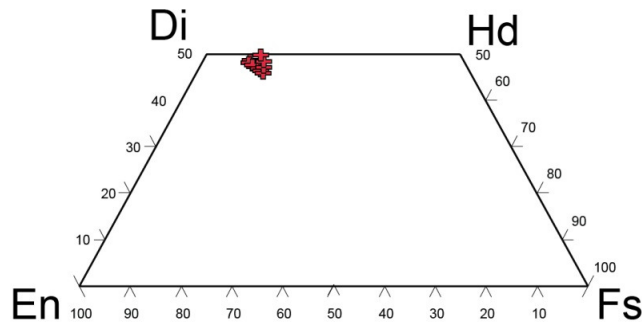
Table 2. Representative mineral chemistry and formula unit for analyzed amphibole crystals in the Silvana gabbro. Major oxides in wt. % and cations in atom per formula unit.

	GSN-01						GSN-02					
SiO ₂	39.34	39.80	41.49	39.80	39.75	43.71	39.49	39.86	43.93	44.49	39.95	40.48
TiO ₂	6.05	5.32	3.47	6.09	4.87	1.48	5.62	5.34	1.25	1.13	6.14	5.65
Al ₂ O ₃	13.08	13.42	12.39	13.17	13.15	11.93	12.75	13.33	12.76	12.48	12.95	12.47
FeO	11.01	10.67	11.58	10.88	11.41	10.97	10.96	11.31	10.49	10.37	10.63	10.90
MgO	12.51	12.80	13.18	11.97	12.38	13.51	12.27	12.26	14.13	14.42	12.27	12.41
MnO	0.10	0.06	0.13	0.14	0.17	0.16	0.09	0.09	0.10	0.12	0.13	0.16
CaO	11.97	12.17	11.84	12.13	11.93	12.77	11.91	11.91	12.10	12.27	11.89	12.01
Na ₂ O	2.27	2.38	2.22	2.11	2.05	2.08	2.09	2.27	2.11	2.21	2.26	2.19
K ₂ O	1.34	1.39	1.25	1.39	1.41	0.58	1.31	1.34	0.62	0.56	1.36	1.36
P ₂ O ₅	0.00	0.03	0.01	0.03	0.02	0.01	0.02	bdl	0.02	0.02	0.02	bdl
Cl	0.02	0.01	0.01	0.01	bdl	bdl	0.01	0.0115	bdl	bdl	0.02	0.02
Total	97.73	98.27	97.82	97.97	97.30	97.50	96.85	97.82	97.72	98.44	97.76	97.92
Si	5.85	5.89	6.13	5.92	5.94	6.42	5.94	5.92	6.38	6.42	5.94	6.02
Ti	0.68	0.59	0.39	0.68	0.55	0.16	0.64	0.6	0.14	0.12	0.69	0.63
Al	2.29	2.34	2.16	2.31	2.31	2.07	2.26	2.33	2.19	2.12	2.27	2.18
Fe ²⁺	1.42	1.39	1.32	1.53	1.41	1.32	1.45	1.45	1.09	1.09	1.47	1.49
Mg	2.78	2.82	2.91	2.66	2.76	2.96	2.75	2.71	3.06	3.1	2.72	2.75
Ca	1.91	1.93	1.88	1.93	1.91	2.01	1.92	1.9	1.88	1.9	1.9	1.91
Na	0.66	0.68	0.64	0.61	0.6	0.59	0.61	0.65	0.59	0.62	0.65	0.63
K	0.26	0.26	0.24	0.27	0.27	0.11	0.25	0.26	0.12	0.1	0.26	0.26
Total	15.8	15.86	15.78	15.76	15.78	15.71	15.76	15.79	15.65	15.67	15.77	15.77
Al ^(IV)	2.15	2.11	1.87	2.08	2.06	1.58	2.06	2.08	1.62	1.58	2.06	1.98
Al ^(VI)	0.15	0.23	0.29	0.23	0.25	0.49	0.19	0.25	0.57	0.55	0.21	0.2



شکل ۴. (a, b) تصاویر میکروسکوپی از گابروهای سیلوانا و (c-e) تصاویر BSE از نمونه‌های تجزیه شده توسط EPMA. علائم اختصاری از ویتنی و ایوانس (۲۰۱۰) اخذ شده است.

Fig. 4. a, b) Microphotographs of the Silvana gabbro. c-e) BSE images from analysed thin sections by EPMA. Abbreviations are after Whitney and Evans (2010).



شکل ۵. دوزنقه پیروکسن‌ها یک ترکیب غنی از دیوپسید را برای کلینوپیروکسن‌های گابروی سیلوانا شده نشان می‌دهد.

Fig. 5. The pyroxene quadrangle shows a diopside-rich composition for the Silvana gabbro's clinopyroxenes.

جدول ۳. نتایج تجزیه نقطه‌ای توسط ریزکاونده الکترونی از کانی پلاژیوکلاز در گابروهای سیلوانا و کاتیون‌های محاسبه شده بر حسب فرمول کانی. اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد و کاتیون‌ها بر حسب اتم در فرمول apfu آورده شده است.

Table 3. Representative mineral chemistry and formula unit for analyzed plagioclase crystals in the Silvana gabbro. Major oxides in wt. % and cations in atom per formula unit.

	GSN-07						GSN-01	
SiO ₂	46.70	45.99	46.47	46.13	45.56	45.44	45.05	47.73
Al ₂ O ₃	33.48	33.90	33.67	34.12	34.12	33.65	33.74	33.12
FeO	0.22	0.39	0.16	0.40	0.15	0.35	0.25	0.26
CaO	17.20	17.20	17.47	17.56	17.67	17.44	17.36	16.51
Na ₂ O	1.64	1.58	1.50	1.45	1.30	1.55	1.58	2.13
Total	99.37	99.22	99.34	99.78	98.91	98.59	98.16	100.05
Si	2.16	2.134	2.15	2.129	2.12	2.124	2.117	2.192
Al	1.826	1.855	1.837	1.856	1.872	1.856	1.869	1.793
Fe ³⁺	0.009	0.015	0.007	0.015	0.006	0.014	0.01	0.01
Ca	0.852	0.855	0.867	0.869	0.881	0.874	0.874	0.813
Na	0.148	0.142	0.135	0.131	0.117	0.145	0.146	0.191
Total	4.997	5.003	4.995	5	4.99	5.014	5.017	5
An%	0.88	0.88	0.88	0.89	0.9	0.88	0.88	0.85

جدول ۴. نتایج تجزیه نقطه‌ای توسط ریزکاونده الکترونی از کانی‌های تیره در گابروهای سیلوانا و کاتیون‌های محاسبه شده. اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد و کاتیون‌ها بر حسب اتم در فرمول apfu آورده شده است.

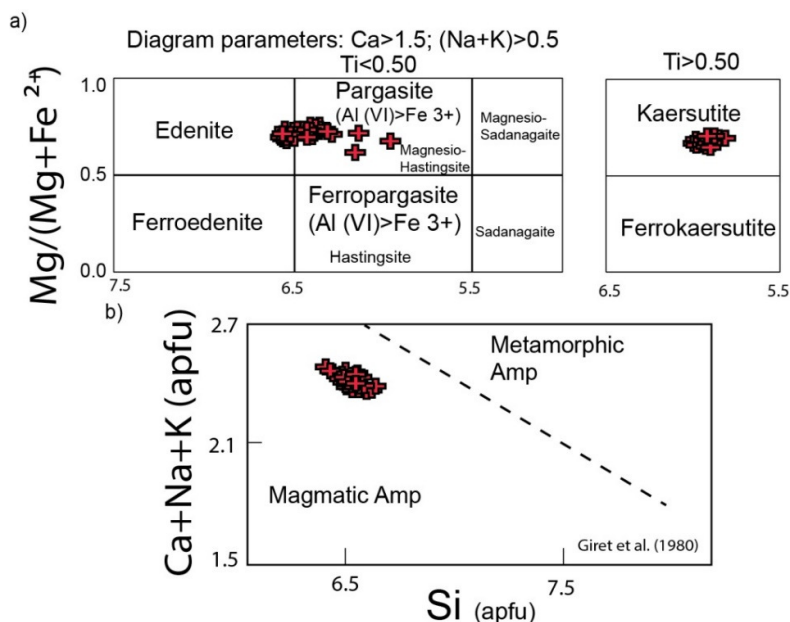
Table 4. Representative mineral chemistry and formula unit for analyzed ore minerals in the Silvana gabbro. Major oxides in wt. % and cations in atom per formula unit.

	GSN-01					
TiO ₂	51.43	53.65	53.32	52.69	52.64	52.81
FeO	47.77	45.47	46.21	45.52	45.53	44.25
MgO	1.01	0.65	0.52	0.68	0.75	3.06
MnO	0.90	0.98	1.01	1.43	1.23	0.53
Total	101.46	101.13	101.28	100.85	100.72	101.08
Ti	0.956	1.004	0.998	0.991	0.992	0.972
Fe ³⁺	0.087	-	0.004	0.018	0.016	0.056
Fe ²⁺	0.901	0.947	0.959	0.935	0.938	0.849
Mn	0.01	0.021	0.021	0.031	0.026	0.011
Mg	0.037	0.024	0.019	0.026	0.028	0.112

جدول ۵. نتایج تجزیه نقطه‌ای توسط ریزکاونده الکترونی از کانی بیوتیت در گابروهای سیلوانا و کاتیون‌های محاسبه شده. اکسید عناصر اصلی بر حسب درصد و کاتیون‌ها بر حسب اتم در فرمول apfu آورده شده است.

Table 5. Representative mineral chemistry and formula unit for analyzed biotite crystals in the Silvana gabbro. Major oxides in wt. % and cations in atom per formula unit.

GSN-01				
SiO ₂	37.19	36.77	37.12	36.15
TiO ₂	4.50	4.41	4.45	4.63
Al ₂ O ₃	15.53	15.54	14.36	14.73
FeO	12.97	13.38	14.64	15.85
MgO	16.00	15.72	14.73	14.10
MnO	0.08	0.06	0.05	0.09
CaO	0.01	0.02	0.06	0.07
Na ₂ O	0.32	0.32	0.14	0.21
K ₂ O	9.20	9.18	9.29	8.92
Cl	0.00	0.04	0.07	0.03
F	0.27	0.16	0.15	0.16
Total	96.45	96.33	95.34	95.22
Si	2.74	2.723	2.783	2.731
Ti	0.249	0.246	0.251	0.263
Al	1.347	1.356	1.27	1.312
Fe ²⁺	0.798	0.829	0.918	1.0
Mn	0.005	0.004	0.003	0.006
Mg	1.753	1.735	1.65	1.587
Ca	0.002	0.002	0.005	0.006
Na	0.046	0.047	0.02	0.029
K	0.863	0.868	0.889	0.86
Total	7.78	7.811	7.89	7.8
Mg#	0.69	0.676	0.64	0.61



شکل ۶. a) نمودار طبقه‌بندی آمفیبول‌ها از لیک و همکاران (۱۹۹۷). b) نمودار مجموع CNK در برابر کاتیون سیلیسیم در آمفیبول‌های منطقه جهت تمایز بین آمفیبول‌های ماگمایی و دگرگونی (گیرت و همکاران، ۱۹۸۰) که نشان می‌دهد آمفیبول‌های مورد مطالعه از نوع ماگمایی بوده‌اند.

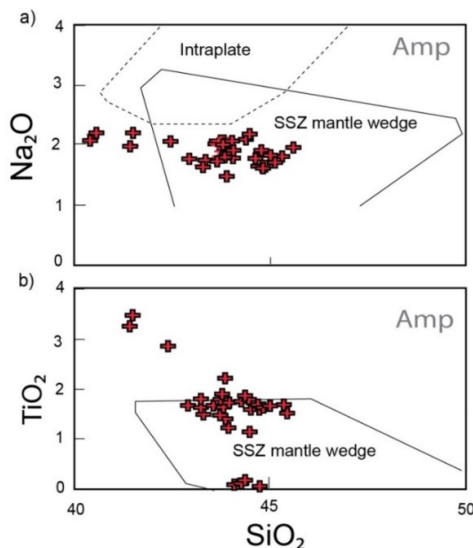
Fig. 6. a) Amphibole classification after Leake et al. (1997). b) The Si vs. CNK (apfu) diagram for discrimination between magmatic and metamorphic amphiboles (after Giret et al., 1980), shows the magmatic nature of the studied amphiboles.

۵- بحث

۵-۱- محیط تکتونیکی

با هدف تعیین جایگاه تکتونیکی تشکیل گابروها، برخی نمودارهای متمایزکننده ترسیم و نتیجه عبارت از موقعیت فرافروانشی (جلوی قوسی) با استناد به محتوای اکسیدهای سدیم و تیتانیوم در برابر سیلیس (از کلتورتی و همکاران، ۲۰۰۷)، در ترکیب کانی آمفیبول می‌باشد (شکل ۷). همین ارزیابی با عنایت به ترکیب کانی کلینوپیروکسن

هم بدست آمده است (شکل ۸). نمودارهای اکسید تیتانیوم در برابر فاکتور ویژه آلومینیم (از لوکاس، ۱۹۹۰؛ شکل ۸a)، اکسید آلومینیم در برابر عدد منیزیم در کلینوپیروکسن (از بکالوا و همکاران، ۱۹۸۹؛ شکل ۸b)، عدد منیزیم کلینوپیروکسن در مقابل آنورتیت درصد در پلاژیوکلاز (از بارنز، ۱۹۸۵؛ شکل ۸c) و نیز سه‌وجهی اکسیدهای تیتانیوم، سدیم و سیلیس در کلینوپیروکسن از آن جمله می‌باشند (از بکالوا و همکاران، ۱۹۸۹؛ شکل ۸d).



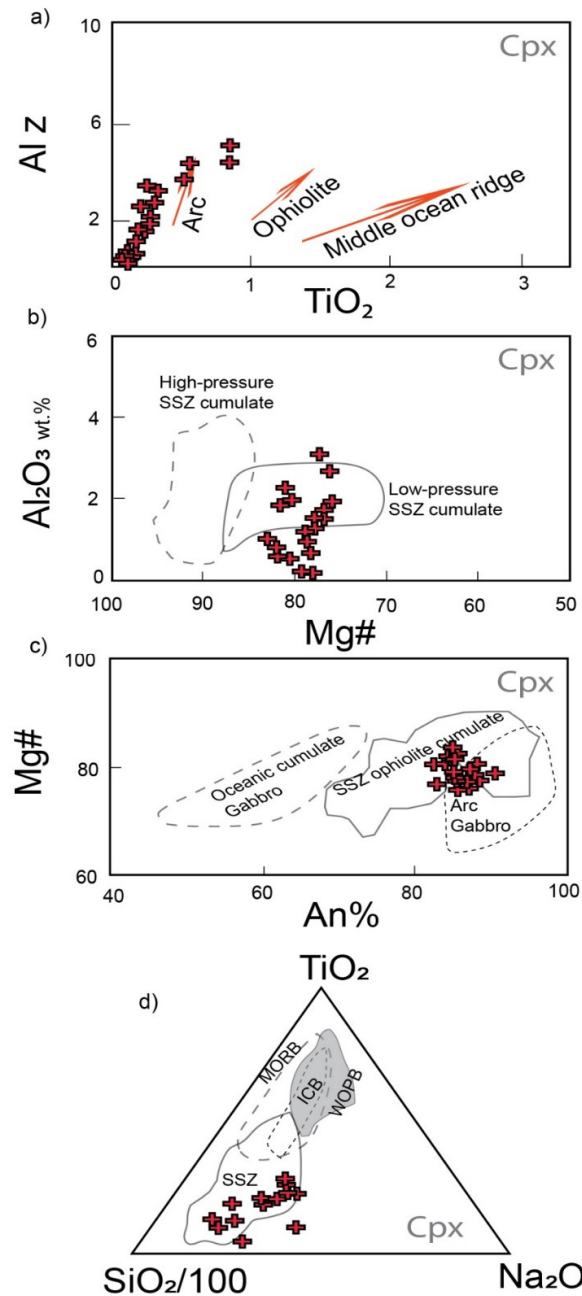
شکل ۷. نمودارهای متمایزکننده بر اساس شیمی کانی آمفیبول در گابروی سیلوانا، (a) نمودار اکسید سدیم در برابر سیلیس از کلتورتی و همکاران (۲۰۰۷) که در آن آمفیبول‌های مورد مطالعه در محدوده فرافروانشی پیاپی شده‌اند. (b) نمودار اکسید تیتانیوم در مقابل سیلیس از همان مرجع که نتیجه قبلی را نشان می‌دهد.

Fig. 7. The discrimination diagrams are based on the mineral chemistry of the Silvana gabbro amphiboles, a) SiO_2 vs. Na_2O diagram for tectonic-magmatic classification of the studied amphiboles after Coltorti et al. (2007). The studied gabbroic rocks amphiboles plotted on the supra subduction zone (SSZ) field. b) SiO_2 vs. TiO_2 diagram for the studied amphiboles in the gabbros after the same reference shows the same setting.

۵-۲- فشاربخشی سیال

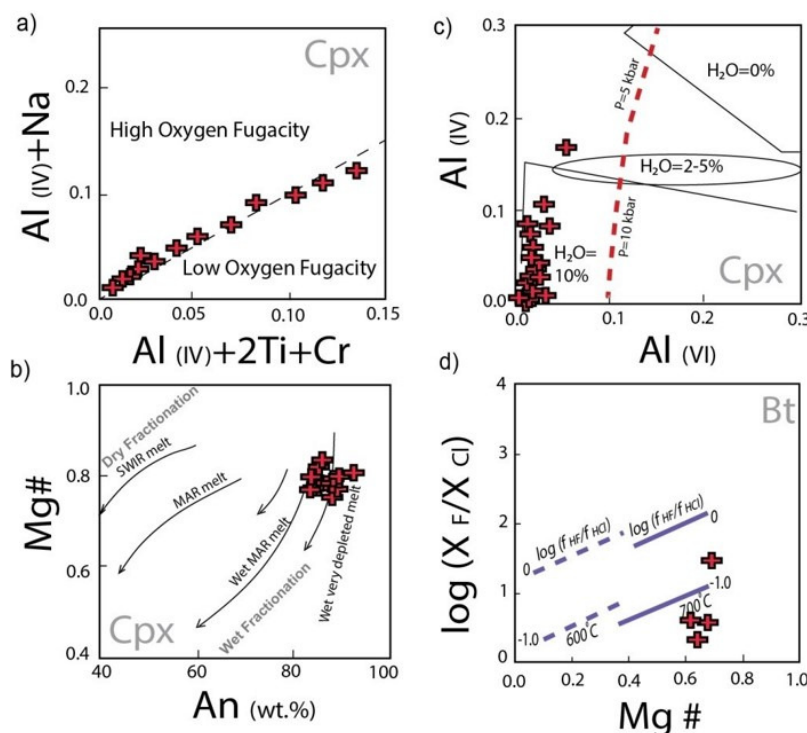
فراوانی بالای حجمی آمفیبول در سنگ‌های مورد مطالعه شاهدی مبنی بر بالا بودن فشاربخشی اکسیژن و/یا آب در ماگمای مولد می‌باشد. این فاکتور اساسی می‌تواند در دمای لیکوئیدوس و نیز ترکیب مذاب نیز مؤثر بوده باشد (مورتی، ۲۰۰۵). جهت ارزیابی این مورد از ترکیب فاز کلینوپیروکسن استفاده شده است. نمودار مجموع آلومینیم در تتراندراال سایت کلینوپیروکسن و سدیم در برابر آلومینیم تتراندراال علاوه کاتیون‌های کروم و تیتانیوم بیانگر فشاربخشی نسبتاً بالای اکسیژن (از شوایتزر و همکاران، ۱۹۷۹؛ شکل ۹a)، نمودار عدد منیزیم در کلینوپیروکسن در برابر آنورتیت درصد در پلاژیوکلاز روند امتداد تفریق از ماگمای پرآب (از کاواسنس و همکاران، ۲۰۰۴؛ شکل ۹b)

و نمودار آلومینیم در تتراندراال سایت در برابر همین کاتیون در اکتاندراال سایت کلینوپیروکسن ماگمایی با بیش از ۱۰٪ آب و تبلوری در فشار کمتر از ۵ کیلوپا را برای گابروی دره بنار نشان می‌دهد (از هلز، ۱۹۷۳؛ شکل ۹c). مقادیر سیال ممکن است از ابتدا در منبع و به‌عنوان یک خصوصیت ذاتی بالا بوده باشد و یا اینکه بعدها در اثر فرایندهای متاسوماتیک افزایش یافته باشد. از سیالات دیگر دخیل در ماگمای مولد گابروی سیلوانا باید به هالوژن‌ها اشاره کرد. غلظت فلوئور چند برابر کلر موجود در بیوتیت‌ها می‌باشد (جدول ۵). لگاریتم فشار بخشی اسید فلوئوریدریک به کلریدریک حدود ۱- بوده است (از مونز، ۱۹۹۲؛ شکل ۹d).



شکل ۸. (a) نمودار فاکتور ویژه آلومینیم در برابر اکسید تیتانیم در کانی کلینوپیروکسن که در آن $Al_2 = Al^{IV} \times 100/2$ می‌باشد (لوکاس، ۱۹۹۰)، نشان می‌دهد که گابروی سیلوانا در یک محیط قوس به‌وجود آمده است. (b) نمودار اکسید آلومینیم در برابر عدد منیزیم در کلینوپیروکسن (بکالوا و همکاران، ۱۹۸۹) جهت تعیین فشار تشکیل سنگ‌های مافیک سیلوانا. منطقه فشار بالا (۸ تا ۱۰ کیلوپار) موقعیت تکتونیکی فراقروانشی از التون و همکاران (۱۹۸۲) و باغچی و همکاران (۲۰۰۶)، منطقه کم فشار از پارلاک و همکاران (۲۰۰۲)، باغچی و همکاران (۲۰۰۶) و تانریلی و رضاوغلو (۲۰۱۶) می‌باشد. (c) نمودار عدد منیزیم کلینوپیروکسن در برابر آنورتیت درصد پلاژیوکلاز از بارنز (۱۹۸۵). (d) نمودار مثلثی اکسیدهای تیتانیم-سدیم و سیلیس برای تفکیک کلینوپیروکسن‌های محیط‌های گوناگون از بکالوا و همکاران (۱۹۸۹). مخفف‌ها در زیر آمده است.

Fig. 8. a) TiO_2 vs. Al_2 diagram in which $Al_2 = Al^{IV} \times 100/2$ (after Loucks, 1990) in clinopyroxene show an arc related setting for Silvana gabbro. b) $Mg\#$ vs. Al_2O_3 clinopyroxene (Beccaluva et al., 1989) for determination of the pressure of the Silvana mafic rocks. The field of high-pressure (8-10 kbar) SSZ-type cumulates is from Elthon et al. (1982), and Bağcı et al. (2006). The field of low-pressure (2.5-3.5 kbar) SSZ type cumulates is from Parlak et al. (2002), Bağcı et al. (2006), and Tanirli & Rizaoglu (2016). c) $An\%$ plagioclase vs. $Mg\#$ clinopyroxene (Burns, 1985). d) TiO_2 - Na_2O - $SiO_2/100$ diagram for discriminating clinopyroxenes in basalts/gabbros from different oceanic settings (Beccaluva et al., 1989). Abbreviations, E-MORB: enriched mid-ocean ridge basalt; N-MORB: normal mid-ocean ridge basalt; WOPB: within oceanic plate basalts; ICB: Iceland basalts; and SSZ: supra-subduction zone basalts. All the diagrams show the SSZ setting for the SGO gabbros.



شکل ۹. تخمین فشار بخشی اکسیژن برای ماگمای مولد گابروی سیلوانا، (a) براساس شیمی کلینوپیروکسن (شوایتزر و همکاران، ۱۹۷۹)، (b) آنورتیت درصد در پلاژیوکلاز در برابر عدد منیزیم در کلینوپیروکسن (کاواسنس و همکاران، ۲۰۰۴) و (c) محتوای آلومینیم در کلینوپیروکسن (هلز، ۱۹۷۳) که نشان می‌دهد ماگمای مولد گابروها بیش از ۱۰٪ آب داشته و در فشار کمتر از ۵ کیلوپار متبلور شده است. (d) نمودار عدد منیزیم در برابر لگاریتم نسبت غلظت فلوئور به غلظت کلر در بیوتیت. خطوط معرف نسبت فشار بخشی فلوئورین به کلرین (اسید فلوئوریدریک به اسید کلریدریک) در سیال در حال تعادل با بیوتیت‌ها در دماهای ۶۰۰ و ۷۰۰ درجه سانتیگراد می‌باشد. خطوط از مونز (۱۹۹۲) می‌باشد.

Fig. 9. Oxygen fugacity estimation for Silvana gabbro parental magma based on a) clinopyroxene mineral chemistry (after Schweitzer et al., 1979). b) Plagioclase anorthite percent vs. Mg# (from Kavassnes et al., 2004). c) Al content in clinopyroxene (Helz, 1973), show that the magma had high H₂O abundance (10%) and magma crystallization in low pressure setting (5 kbar). d) Plot of XMg vs. log (X_F/X_{Cl}) for biotite, Contours represent the logarithm of the fluorine-chlorine fugacity ratios (f_{HF}/f_{HCl}) for a fluid in equilibrium with biotite at average temperature of 700 °C and 600 °C for biotites after Munoz (1992).

کلینوپیروکسن در توده مذکور باشد که البته نیاز به بررسی‌های بیشتر دارد.

۶- نتیجه‌گیری

- گابروی مورد مطالعه در ورقه سیلوانا درون آمیزه‌رنگین افیولیتی موسوم به گیسپان در امتداد گسل اسبی بنار در ابعاد کوچک به‌صورت توده‌ای برونزد یافته است. کانی‌های اصلی مشتمل بر کلینوپیروکسن، آمفیبول و پلاژیوکلاز می‌باشد.
- تجزیه نقطه‌ای کانی‌ها نشان داد کلینوپیروکسن تا حدود ۸۰٪ از نوع دیوپسید، آمفیبول از نوع پارگازیت تا کرسوتیت، پلاژیوکلاز غنی از ۸۰٪ آنورتیت، بیوتیت بیشتر فلوگوپیتی و کانی‌های تیره به‌طور خالص ایلمنیتی بوده‌اند.

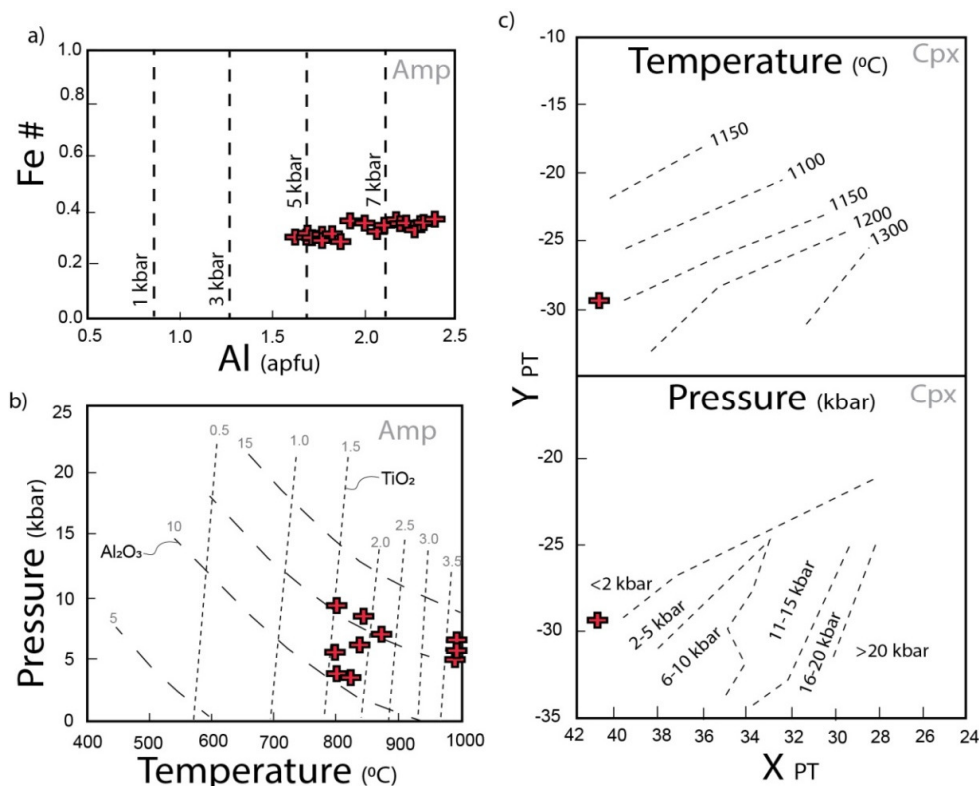
۵-۳- تخمین دما و فشار تبلور

شیمی دو فاز آمفیبول و کلینوپیروکسن جهت ارزیابی دما و فشار تبلور سنگ‌های ماگمایی بسیار کاربردی است. نسبت عدد آهن در مقابل کاتیون کل آلومینیم در آمفیبول فشاری حدود ۵ تا ۸ کیلوپار را برای گابروهای دره بنار پیشنهاد می‌کند (اشمیت، ۱۹۹۲؛ شکل ۱۰a). همچنین بر مبنای اکسیدهای آلومینیم و تیتانیم که هر یک به ترتیب حساس به فشار و دمای تبلور می‌باشند، فشار حدود ۵ تا ۸ کیلوپار و دمای ۸۰۰ تا بیش از ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد برای آمفیبول‌های سنگ‌های مذکور بدست آمده است (ارنست و لیو، ۱۹۹۸؛ شکل ۱۰b). همانگونه که دماسنجی مبتنی بر X_{PT} و Y_{PT} در کلینوپیروکسن این نتیجه را تأیید می‌کند (سوئسو، ۱۹۹۷؛ شکل ۱۰c) و لیکن فشار بدست آمده از طریق کلینوپیروکسن پایین‌تر است (شکل ۱۰c). این شاید نشانه‌ای از تبلور ثانوی و متاسوماتیک

■ دمای تبلور برای فازهای آمفیبول و کلینوپیروکسن حدود ۸۰۰ تا ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد در فشاری معادل ۵ تا ۸ کیلو بار برای آمفیبول و کمتر از ۲ کیلو بار برای کلینوپیروکسن بوده است.

■ بررسی نسبت‌های عناصر سازنده کانی‌های آمفیبول و کلینوپیروکسن نشان از تشکیل ماگمای مولد در یک موقعیت فرفرورانشی/جلوی قوسی دارد.

■ فشاربخشی اکسیژن/آب در ماگمای گابروی مورد مطالعه با استناد به ترکیب فازهای مافیک بالا بوده است.



شکل ۱۰. (a) تخمین فشار تبلور گابروی سیلوانا بر اساس آلومینیم کل در برابر عدد آهن در آمفیبول‌ها (اشمیت، ۱۹۹۲) که فشاری معادل ۵ تا ۸ کیلو بار را نشان می‌دهد. (b) نمودار دما-فشارسنجی بر مبنای اکسیدهای آلومینیم و تیتانیم آمفیبول (ارنست و لیو، ۱۹۹۸) که تایید کننده همان فشار در دمای ۸۰۰ تا ۱۰۰۰ درجه سانتی‌گراد است. (c) نمودار پارامترهای X_{PT} در برابر Y_{PT} برای کلینوپیروکسن (سوئسو، ۱۹۹۷) که فشار حدود پایین (کمتر از ۲ کیلو بار) و دمای ۱۱۵۰ درجه سانتی‌گراد را برای گابروی سیلوانا نشان می‌دهد. فاکتورهای مورد محاسبه در زیر آمده است.

Fig. 10. a) Pressure estimation of the Silvana gabbro based on total Al content vs. Fe# in amphiboles (after Schmidt, 1992) shows a pressure of 5-8 kbar for them. b) PT grid based on amphibole Al_2O_3 and TiO_2 content confirms the above pressure and 800-1000 °C temperature (after Ernst and Liu, 1998). c) X_{PT} vs. Y_{PT} designed (by Soesoo, 1997) based on clinopyroxene chemistry suggests a pressure of 2-5 kbar in 1150 °C temperature for Silvana gabbro. The factors are calculated as below:

$$X_{PT} = 0.446SiO_2 + 0.187TiO_2 - 0.404Al_2O_3 + 0.346FeO - 0.052MnO + 0.309MgO + 0.431CaO - 0.446Na_2O$$

$$Y_{PT} = -0.369SiO_2 + 0.535TiO_2 - 0.317Al_2O_3 + 0.323FeO + 0.235MnO - 0.516MgO - 0.167CaO - 0.153Na_2O$$

References

- Abdollah, K., Modjarrad, M (2017) Geochemistry of Ziveh serpentinites: Tehran, Iran. In: 36th National and 3rd international congress of Earth sciences.
- Adamia, S. A., Zakariadze, G., Chkhotua, T., Sadradze, N., Tsereteli, N., Chabukiani, A., Gventsadze, S (2011) Geology of the Caucasus: a review. Turkish Journal of Earth Sciences, 20: 489-544.

۷- تشکر و قدردانی

لازم به ذکر است که این پژوهش از محل حمایت‌های معاونت پژوهشی دانشگاه ارومیه میسر شده است. همکاری پروفسور ابراهیم یوسال در مراحل انجام این پژوهش شایسته تقدیر است. همچنین نویسنده از زحمات دکتر دیرک مولر از دانشگاه لودویگ ماکسی ملیان در تجزیه میکروپروب مقاطع میکروسکوپی، قدردانی می‌کند.

- Giret, A., Bonin, B., Leger, J. M (1980) Amphibole compositional trends in oversaturated and undersaturated alkaline plutonic ring-complexes. *Canadian Mineralogist*, 18: 481-495.
- Hajmolla Ali, A., and Shahrabi, M (2006) 1:100000 geological map of the Slivana, No. 4964: Geological Survey of Iran, Tehran.
- Helz, R. T (1973) Phase reactions of basalts in their melting range at $P_{H_2O}=5\text{kb}$ as a function of oxygen fugacity. *Journal of Petrology*, 17: 139–193.
- Kavassnes, A. J. S., Strand, H. A., Moen Eikeland, H. and Pedersen, R. B (2004) The Lyngen gabbro: the lower crust of Ordovician incipient arc. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 148: 358- 379.
- 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., Youshi, 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.
- Leterrier, J., Maury, R. C., Thonon, P., Girard, D., Marchal, M (1982) Clinopyroxene composition as a method of identification of the magmatic affinities of paleo-volcanic series. *Earth and Planetary Science Letters*, 59: 139- 154.
- Loucks, R. R (1990) Discrimination of ophiolitic from nonophiolitic ultramafic- mafic allochthons in orogenic belts by the Al/Ti ratio in clinopyroxene. *Geology*, 18: 346- 349.
- Mahmoudi, S., Veisania, A., Mokhtari, A (2018) Mineral chemistry and geothermobarometry of gabbroic dykes of the Garmab Ophiolite sequence (Northeast of Kamyaran). *Petrology (Isfahan)*, 9 (35): 121-146.
- Modjarrad, M., Omrani, H (2023) Mineral chemistry and thermobarometry of Dorbeh diorite metamorphic aureole, south of Urmia. *Petrology (Esfahan)*, 14 (54): 59-88. (in Persian). doi. 10.22108/ijp.2023.137037.1295.
- Modjarrad, M., Uysal, I., Whitney, D. L., Muller, D. (under review) Petrologic evolution of ultramafic-mafic rocks from the Late Cretaceous Silvana-Gysian ophiolite; a central Neo-Tethyan (CNT) realm missing link.
- Modjarrad, M (2023b) Serpentinites of Gysian Silvana ophiolites-South of Urmia petrography and geochemistry; relationship with Neo-Tethys subduction at the Northwest border of Iran: *Researches Iran Earth Sciences (Iran)*, 13(4): 75-98. (in Persian).
- Modjarrad, M (2022b) The provenance studies and metamorphic conditions of the Gysian colored
- Alavi, M (1994) Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229: 211–238.
- Alizadeh, A (2012) Emplacement dating of SW Urmia ophiolite mélanges: Tehran, Iran, 30th National Congress of Earth Sciences.
- Arabshahi, A. H., Sabzeie, M (2013) Geological 1:25000 map of Silvaneh1: No. 4964 II NW. Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bağcı, U., Parlak, O., Höck, V (2006) Geochemical character and tectonic environment of ultramafic to mafic cumulates from the Tekirova (Antalya) ophiolite (southern Türkiye). *Geological Journal*, 41: 193–219.
- Beccaluva, L., Macciotta, G. B., Piccardo, Zeda, O (1989) Clinopyroxene composition of ophiolite basalts as petrogenetic indicator. *Chemical Geology*, 77: 165-182.
- Burns, L. E (1985) The Border Ranges ultramafic and mafic complex, south central Alaska: cumulate fractionates of island arc volcanics. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22: 1020-1038.
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., Ntaflos, T., Siena, F (2007) Slab melt and intraplate metasomatism in Kapfenstein mantle xenoliths (Styria Basin, Austria. In: Coltorti, M., Downes, H., Piccardo, G.B. (Eds.), *Melting, Metasomatism and Metamorphic Evolution in the Lithospheric Mantel. Lithos (Special Issue)*, 94: 66–89.
- Dioh, E., Béziat, D., Grégoire, M, Debat, P (2009) Origin of rare earth element variations in clinopyroxene from plutonic and associated volcanic rocks from the Foulde basin, Northern Kedougou inlier, Senegal, West Africa. *European Journal of Mineralogy*, 21: 1029-1043.
- Elthon, D., Casey, J. F. and Komor, S (1982) Mineral chemistry of ultramafic cumulates from the North Arm Mountain massif of the Bay of Islands ophiolite: Evidence of high pressure crystal fractionation of oceanic basalts. *Journal of Geophysical Research*, 87: 8717-8734.
- Ernst, W. G., Liu, J (1998) Experimental phase-equilibrium study of Al- and Ti-contents of calcic amphibole in MORB, a semiquantitative thermobarometer. *American Mineralogist*, 83 (9-10): 952–969.
- Farahi, F., Taki, S., Salavati, M (2020) Mineral chemistry and geothermobarometry of gabbroic rocks from the Gysel area, Alborz mountains, north Iran. *Nexo*, 33: 392-408. doi.org/10.5377/nexo.v33i02.10779.
- Ghalamghash, J., Nedelec, A (2009) The Urumieh plutonic complex (NW Iran): A record of the geodynamic evolution of the Sanandaj–Sirjan zone during Cretaceous times – Part I: Petrogenesis and K/Ar dating. *Asian Journal of Earth Science*, 35: 401-415.

- 25th symposium of Iranian crystallography and mineralogy, Yazd, Iran.
- Saccani, E., Allahyari, K., Beccaluva, L., Bianchini, G (2013) Geochemistry and petrology of the Kermanshah ophiolites (Iran): implication for the interaction between passive rifting, oceanic accretion, and OIB-type components in the Southern Neo-Tethys Ocean Gondwana Research, 24 (1): 392–411.
- Schmidt, M. W (1992) Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. Contributions to Mineralogy and Petrology, 110: 304–310.
- Schweitzer, E. L., Papike, J. J. and Bence, E (1979) Statistical analysis of clinopyroxene from deep sea basalts. American Mineralogist, 64: 501–513.
- Sengör, A., M. C., O' zeren, S., Genc, T. & Zor, E (2003) East Anatolian high plateau as a mantle-supported, north–south shortened domal structure. Geophysical Research Letters, 30: 8.1–8.4.
- Sisson, T. W. and Grove, T. L (1993) Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline differentiation and subduction zone magmatism. Contributions to Mineralogy and Petrology, 113: 143–166.
- Soesoo, A (1997) A multivariate statistical analysis of clinopyroxene composition: Empirical coordinates for the crystallisation PT-estimations. – Geological Society of Sweden (Geologiska Föreningen), 119: 55–60.
- Tanirli, M., Rizaoglu, T (2016) Whole-rock and mineral chemistry of mafic cumulates from the Low-Ti ophiolite in the southern part of Kahramanmaras, Türkiye. Russian Journal of Geology and Geophysics, 57 (10): 1398–1418. doi.org/10.1016/j.rgg.2016.01.018.
- van der Boon, A., van Hinsbergen, D. J. J., Rezaeian, M., Güre, D., Honarmand, M., Pastor-Galán, D., Krijgsman, W., Langereis, C. G (2018) Quantifying ArabiaEurasia convergence accommodated in the Greater Caucasus by paleomagnetic reconstruction. Earth and Planetary Science Letters, 482: 454–469. doi.org/10.1016/j.epsl.2017.11.025.
- Whitney, D. L., and Evans, B. W (2010) Abbreviations for names of rock-forming minerals: American Mineralogist, 95(1): 185–187.
- Zanchetta, S., Zanchi, a., Villa, I., Poli, S., Muttoni, G (2009) The Shanderman eclogites: a Late Carboniferous high-pressure event in the NW Talesh Mountains (NW Iran). Geological Society of London Special Publication, 312: 57–78.
- mélange low-grade active continental margin mica schists–south of Urmia. Researches in the Earth Sciences (Iran), 12(4): 147–165. doi.org/10.29252/ESRJ.2021.215184.0.
- Modjarrad, M (2024) Intrusive rocks petrogenesis related to the Gysian ophiolitic area, NW Iran. Himalayan Geology, 45 (2): 155–170.
- Modjarrad, M (2022a) Geochemistry and crystal shape, size and spatial distribution in arc-related gabbro, Urmia, NW Iran. Acta Geochimica, doi.org/10.1007/s11631-022-00557-8.
- Modjarrad, M (2023a) Microstructures and crystal size distribution (CSD) of chromites from Gysian Silvana ophiolite serpentinites, Urmia, Iran. Iranian Journal of Science, Islamic Republic of Iran, 34(3): 227 – 238.
- Modjarrad, M. and Moayyed, M (2024) Geochemistry of Central part of the NeoTethys Suture zone serpentinites (From NW Iran to Iraqi Zagros and Eastern Anatoly). Iranian Journal of Geology, 18 (69): 49–66 (in Persian with English abstract).
- Modjarrad, M., Whitney, D. L., Omrani, H (2024a) Petrologic evolution of the Gysian ophiolitic serpentinites, NW Iran. Acta Geochimica, doi.org/10.1007/s11631-024-00682-6.
- Moghadam, H. S., Li, Q., Griffin, W., Stern, R., Santos, J., Lucci, F., Beyarslan, M., Ghorbani, G., Ravankhah, A., Tilhac, R (2021) Prolonged magmatism and growth of the Iran-Anatolia Cadomian continental arc segment in Northern Gondwana. Lithos, 384, 105940.
- Mohammadi, A., Burg, J. P., & Guillong, M (2020) The Siah Cheshmeh-Khoy-Misho-Tabriz fault (NW Iran) is a cryptic neotethys suture: evidence from detrital zircon geochronology, Hf isotopes, and provenance analysis, International Geology Review.
- Moretti, R (2005) Polymerization, basicity, oxidation state and their role in ionic modelling of silicate melts. Geophysics, 48(4–5): 583–608.
- Munoz, J. L. (1992) Calculation of HF and HCl fugacities from biotite compositions: revised equations. Geological Society of America Abstract Programme 26.
- Parlak, O., Höck, V., and Delaloye, M (2002) The suprasubduction zone Pozanti-Karsanti ophiolite, southern Türkiye: evidence for high-pressure crystal fractionation of the ultramafic cumulates: Lithos, 65: 205–224.
- Pouchou, J. L., and Pichoir, F (1984) A new model for quantitative X-ray micro-analysis: Part I. Application to the analysis of homogeneous samples. Recherche Aerospatiale, 5: 13–38.
- Putirka, K. D (2008) Thermometers and barometers for volcanic systems. Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 69: 61–120.
- Rezaei, A., and Modjarrad, M (2017) Ultramafic rocks of Silvana ophiolite south of Urmia. The

Investigations on the Silvana region gabbro, south of Urmia, pressure-temperature- fluid conditions based on the crystal chemistry

M. Modjarrad

Assoc. Prof., Dept., of Geology, Faculty of Science, Urmia University, Urmia, Iran

* m.modjarrad@urmia.ac.ir

Received: 2024.7.21 Accepted: 2024.10.14

Abstract

In this manuscript, we focused on the Silvana ophiolite-related gabbro, south of Urmia. The essential aim is studying constituent minerals classification and understanding formation conditions of this rock type based on the mineral chemistry. The mentioned gabbro was intruded in the serpentinized ultramafic unit in the area and outcropped along the Asbi Bunar fault as colored mélange accompanied by other ophiolitic members. Abundant rock types are gabbro and hornblende gabbro with clinopyroxene, amphibole, plagioclase, and ore minerals as major minerals. Additionally, some biotite, calcite and apatite as minor or accessory phases exist. Clinopyroxenes composition in these rocks is diopsidic, amphiboles are parasitic-kaersutite, plagioclases are anorthite-rich, opaque minerals are ilmenite and biotites are phlogopitic, based on the EPMA analyses. Mineral chemistry of both amphibole and clinopyroxene in the studied gabbro, shows a supra subduction zone/fore-arc setting for them. Also, the oxygen/water fugacity of the parent magma was high. The crystallization temperature of 800-1000 °C at the 5-8 kbar pressure using amphibole composition and 1150 °C at low pressure by clinopyroxene are evaluated.

Keywords: gabbro, supra subduction zone setting, crystal chemistry, fluid fugacity, Silvana

Introduction

Most of the Neo-Tethyan ophiolites especially in NW Iran formed in a supra subduction zone (SSZ)/fore-arc setting and some others in an abyssal oceanic situations. These ophiolites were outcropped at the several geographic positions including Sanandaj-Sirjan zone or Zagros ophiolitic belt such as Kermanshah, Kamyaran, Marivan, Piranshahr, Sardasht, Silvana, Serow, Khoy and Maku, during sub-/obduction of the Neo-Tethyan or Arabia-Eurasian plate's collision. In most cases some massive gabbroic intrusions accompanied with the ultramafic suites and studying such intrusive evaluate our understanding of the ophiolites. The mineral chemistry investigations on the mafic phases particularly amphibole and clinopyroxene is useful to interpretation on the magma formation conditions.

Material and Methods

Some representative mafic thin sections were analyzed by EPMA at this stage. Electron microprobe analyses were performed at the Department of Earth and Environmental Sciences in the Ludwig Maximilian University

of Munich (Germany) using a Cameca SX-100 system that was equipped with a LaB6 cathode. It is a fully automated instrument employing five wavelength dispersive spectrometers for the detection and nondestructive analysis of almost all elements from boron down in the periodic table. The analyzed phases including clinopyroxene, amphibole, plagioclase, biotite, titanite and apatite.

Discussions and Results

The studied gabbro petrography and mineral chemistry studies show the below results: clinopyroxene (15-30 modal %; diopside: 77-83%), amphibole (30-40 modal %; pargasite-kaersutite in Leake, 1995 classification; Na₂O: 2.2 wt.%; Al^(IV): 2 apfu), pure ilmenite (up to 99%) and plagioclase (10-20 modal %, anorthite: 80%) are the main minerals in these rocks. There is some biotite (phlogopite: 60-70%), sericite (muscovite end member: 77%), and calcite as alteration products beside some apatite (F content: 1.2 wt.%) and titanite as accessory phases. The composition of the studied gabbro's pargasitic-tschermakitic amphibole is detected magmatic and related to an SSZ setting for their formation. Such

similarity is established by clinopyroxenes composition, too. Also, the studied clinopyroxenes confirmed an arc-related trend based on the clinopyroxenes Al and Ti content. The diagrams showing the Al, Na, Ti, Cr, and Mg# of clinopyroxene, Fe#, and even anorthite percent of the gabbro plagioclases could record the fluid fugacity of the magma. Amphibole, biotite and pyroxene chemistry is known as a useful parameter to evaluate the crystallization pressure and temperature. Total Al content (apfu) vs. Fe# in amphiboles shows a pressure of 5-8 kbar for their crystallization accompanied by a temperature of 800-1000 °C. Another calibration gives temperatures of 1150 °C in pressures of 2 to 5 kbar for the gabbro's clinopyroxene crystallization. The biotite crystal composition confirmed a 700 °C temperature and high HF fugacity relative to HCl in the equilibrated fluid with the crystals.

Conclusions

This investigation concentrated on the Silvana ophiolite-related gabbro, south of Urmia.

The critical purpose is studying constituent minerals classification and understanding formation conditions of this rock type based on the mineral chemistry.

The mentioned gabbro was intruded in the serpentinized ultramafic unit in the area and

outcropped along the Asbi Bunar fault as colored mélange accompanied by other ophiolitic members.

Mostly the mafic rock types at the region are gabbro and hornblende gabbro with clinopyroxene, amphibole, plagioclase, and ore minerals as major minerals. Some biotite, calcite and apatite as minor or accessory phases exist.

EPMA analyses show that the clinopyroxenes composition in these rocks is diopsidic, amphiboles are parasitic-kaersutite, plagioclases are anorthite-rich, opaque minerals are ilmenite and biotites are phlogopitic.

Mineral chemistry of both amphibole and clinopyroxene in the studied gabbro, shows a supra subduction zone/fore-arc setting for them.

The oxygen/water fugacity of the parent magma was high. The Ti-rich composition of amphiboles, biotites, ilmenites, and titanites in the gabbro is evidence for Ti-metasomatism in the magma formation.

The crystallization temperature of 800-1000 °C at the 5-8 kbar pressure using amphibole composition and 1150 °C at low pressure by clinopyroxene are evaluated.