



## بررسی سنگ‌نگاری، شیمی‌کانی و زمین دما فشارسنجی آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر سیرجان، استان کرمان

لیلی غفوری، سید حسام‌الدین معین‌زاده\*

بخش زمین‌شناسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

(دریافت مقاله: ۱۴۰۱/۸/۲۳، نسخه نهایی: ۱۴۰۱/۱۱/۱۵)

**چکیده:** معدن سنگ آهن گل‌گهر، در جنوب‌غربی شهرستان سیرجان، از دیدگاه ساختاری در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان قرار دارد و بیشتر آن از سنگ‌های دگرگونه پالئوزوئیک تشکیل شده است. بالاترین درجه دگرگونی سنگ‌های منطقه مربوط به رخساره آمفیبولیت است. آمفیبولیت‌های منطقه آشکارا به دو نوع آمفیبولیت و بیوتیت آمفیبولیت تقسیم می‌شوند که شامل کانی‌های اصلی هورنبلند و پلاژیوکلاز همراه با کانی‌های فرعی بیوتیت، اسفن، کوارتز، تورمالین و کانی‌های کدر هستند. در بعضی از نمونه‌ها، بیوتیت نیز به عنوان کانی اصلی یافت شد. کانی‌های ثانویه کلریت، اپیدوت، کلسیت، اکسیدهای آهن و سریسیت به عنوان فازهای برآمده از دگرسانی و همچنین کلریتی و اپیدوتی شدن بیوتیت‌ها و آمفیبول‌ها به عنوان شواهدی از دگرگونی پسروده در حد رخساره اپیدوت آمفیبولیت گسترش یافته‌اند. بافت آمفیبولیت‌های منطقه اغلب دانه شکفتی است. براساس داده‌های شیمی‌کانی آمفیبول، نمونه‌های مورد بررسی در دو گروه کلسیمی، با ترکیب مگنزیوهورنبلند و پاراگاسیت و سدیمی-کلسیمی با ترکیب وینچیت قرار می‌گیرند. با توجه به نتایج دما-فشار سنجی، آمفیبول‌ها در شرایط گریزندگی اکسیژن بالا و در دمای ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتیگراد و فشار تقریبی ۳ تا ۷ کیلو بار تشکیل شده‌اند.

**واژه‌های کلیدی:** سنندج-سیرجان؛ گل‌گهر؛ آمفیبولیت؛ شیمی‌کانی؛ دما-فشار سنجی.

### مقدمه

های سبز روشن تا تیره و سیاه است که اغلب در اثر دگرگونی ناحیه‌ای متوسط تا شدید سنگ‌های آذرین بازی، حادواست و یا سنگ‌های آهکی ناخالص به وجود می‌آید [۲]. از آنجا که تا کنون پژوهشی پیرامون آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر سیرجان انجام شده است، بررسی آن‌ها از نظر کانی‌شناسی و شرایط دما و فشار تشکیل، می‌تواند گام موثری در روشن ساختن رخدادهای زمین‌شناسی در منطقه باشد.

### زمین‌شناسی عمومی و صحرایی

منطقه معدنی مورد بررسی با وسعت بیش از ۱٫۵ کیلومتر مربع در مجموعه گل‌گهر با مختصات جغرافیایی  $55^{\circ}19'23''$  تا  $55^{\circ}19'23''$  طول شرقی و  $29^{\circ}05'32''$  تا  $29^{\circ}05'05''$  عرض شمالی در لبه جنوب‌شرقی پهنه سنندج -سیرجان واقع

پهنه دگرگونی سنندج-سیرجان به طول تقریبی ۱۲۰۰ کیلومتر و پهنای متوسط بیش از ۳۰ کیلومتر گسترش دارد که انواع رخساره‌های دگرگونی و سنگ‌های دگرگونی در آن دیده می‌شوند. در بخش‌های جنوبی، میگماتیت‌ها، گنیس‌ها، میکاشیست‌ها، آمفیبولیت‌ها و مرم‌های فراوانی به سن پرکامبرین و ژوراسیک پایانی وجود دارند [۱]. ناحیه گل‌گهر در جنوب غربی شهرستان سیرجان به دلیل قرارگیری در پهنه ساختاری سنندج-سیرجان دستخوش دگرگونی‌های بسیاری شده است و رخنمون‌هایی از انواع سنگ‌های دگرگون شده در این منطقه دیده می‌شود. آمفیبولیت نوعی سنگ دگرگونی دانه متوسط تا دانه درشت، شامل هورنبلند و پلاژیوکلاز، به رنگ

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۹۱۳۱۴۱۴۱۰۳، نامبر: ۰۳۴۳۳۲۵۷۴۳۵، پست الکترونیکی: hmoeinzadeh@uk.ac.ir

### روش بررسی

طی بررسی‌های صحرایی، تعداد ۵۰ نمونه از آمفیبولیت‌های منطقه برداشت و بررسی سنگ‌نگاری شدند. قرار گرفت و برای تعیین ترکیب شیمیایی کانی‌های مورد نظر تعدادی از آن‌ها برای تجزیه‌ی نقطه‌ای با ریزپردازشگر الکترونی-JEOL JX8600M با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵ کیلوولت و جریان تابشی  $2 \times 10^{-8}$  A به بخش علوم‌زمین و محیط زیست دانشگاه یاماگاتای ژاپن ارسال شدند.

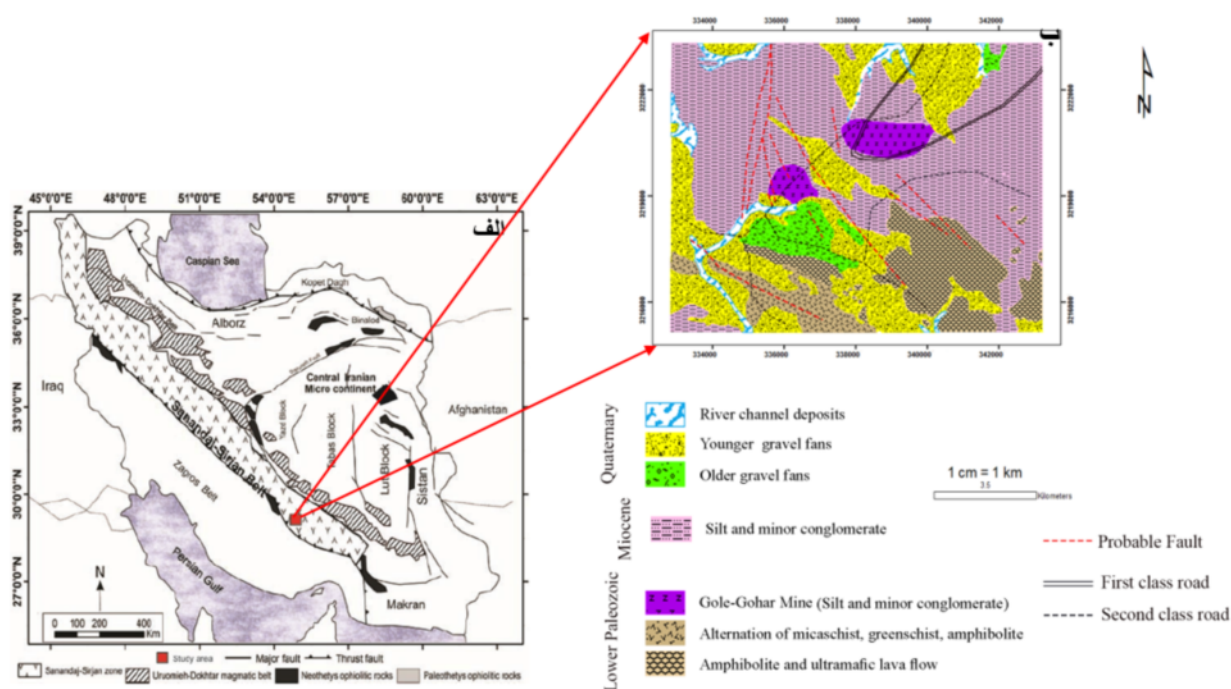
### بحث و بررسی

#### سنگ‌نگاری

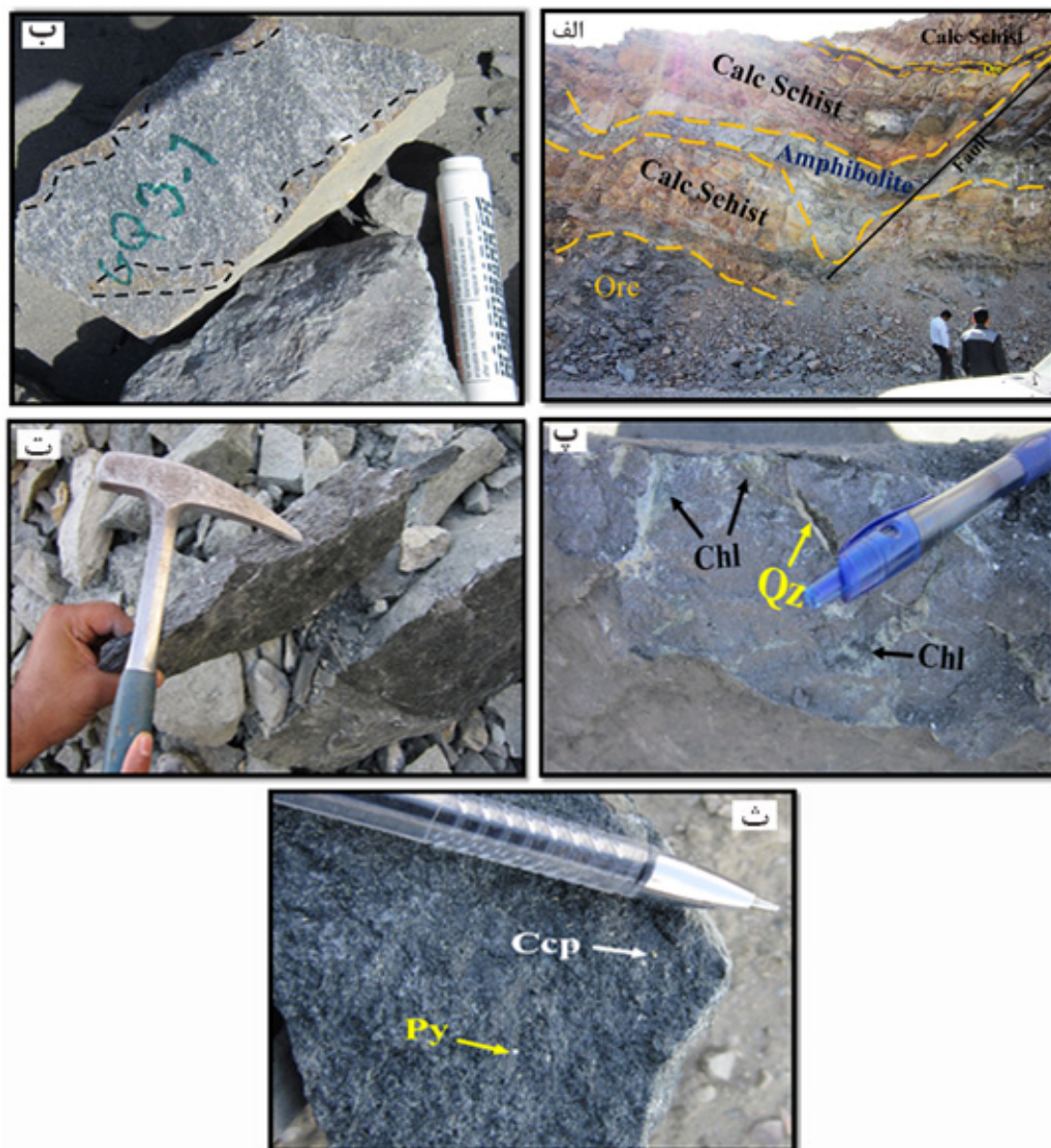
آمفیبولیت‌های منطقه در نمونه‌دستی به رنگ سبز تیره هستند که در بخش‌هایی از منطقه در اثر جدایش دگرگونی کانی‌های تیره آمفیبول و روشن پلاژیوکلاز از هم تفکیک شده‌اند و در نمونه‌دستی دیده می‌شوند (شکل ۲ ت). در برخی از نمونه‌های آمفیبولیتی، کانی‌های پیریت و کالکوپیریت نمایان هستند (شکل ۲ ث). آمفیبولیت‌های مشاهده شده از نوع اورتوآمفیبولیت می‌باشند و کانی کوارتز در آن‌ها نیست یا به ندرت وجود دارد و انواع اصلی آنها شامل آمفیبولیت و بیوتیت آمفیبولیت هستند.

است (شکل ۱). منطقه گل‌گهر و مناطق پیرامون آن از سنگ‌های دگرگونی پرکامبرین، پالئوزوئیک، سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک، سنوزوئیک و آبرفت‌های کواترنر تشکیل شده است. توده‌های بازیک و گرانیتی تریاس پسین در مجموعه دگرگونی پالئوزوئیک و تریاس میانی نفوذ کرده‌اند. این مجموعه دگرگونی شامل تناوبی از گنیس، میکاشیست، آمفیبولیت، کوارتزشیست در بخش پایینی و گنیس و کوارتزشیست در بخش بالایی است. سنگ‌های کنگلومرا، آهک ریفی، ماسه‌سنگ آهکی، شیل و توربیدایت (سنگ‌های رسوبی مزوزوئیک) و پادگانه‌ها، مخروط-افکنه‌های قدیم و جدید (آبرفت‌های کواترنری) منطقه مورد بررسی را پوشانده‌اند [۳].

آمفیبولیت‌ها به صورت لایه‌هایی کنار شیست‌ها و سنگ‌های متابازیت و همچنین نهشته‌های معدنی تشکیل شده و در اثر نیروهای زمین‌ساختی فعال در طول پهنه برشی در منطقه به صورت چین خورده درآمده‌اند (شکل ۲ الف). وجود گسل‌های فراوان در منطقه نشان‌دهنده پویایی منطقه و عملکرد نیروهای زمین‌ساختی در منطقه است. درز و گسل‌های موجود موجب تسهیل نفوذ سیال‌ها و در نتیجه به وجود آمدن دگرسانی‌هایی چون اکسیدهای آهن (شکل ۲ ب) و رگه‌های کلریتی (شکل ۲ پ) در سنگ‌های منطقه شده است.



شکل ۱ الف) موقعیت منطقه مورد بررسی در نقشه زمین‌شناسی ایران. ب) نقشه ساده شده زمین‌شناسی منطقه، برگرفته از نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ گل‌گهر، [۴].



شکل ۲ الف) قرارگیری لایه آمفیبولیت در بین لایه‌های شیست و ماده معدنی در منطقه (دید به سمت جنوب)، ب) آثار اکسید آهن در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، پ) آثار دگرسانی کلریتی (Chl) همراه با رگه کوارتزی (Qz) در نمونه آمفیبولیتی. ت) نمایی از کانی‌های تیره آمفیبول و روشن پلاژیوکلاز در نمونه دستی از سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، ث) بلورهای پیریت (Py) و کالکوپیریت (Ccp) در نمونه دستی آمفیبولیت.

### آمفیبولیت

در آمفیبولیت‌های منطقه، شکفته بلورهای آمفیبول به صورت تیغه‌ای و منشوری نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار به رنگ سبز-قهوه‌ای در زمینه‌ای از پلاژیوکلاز، در هم قفل شده و بافت دانه شکفتی و ورقه شکفتی ایجاد کرده‌اند (شکل‌های ۳ الف و ب). کانی هورنبلند ۵۵-۶۰ درصد حجمی مقاطع میکروسکوپی را تشکیل داده و در کل، نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل، بدون ماکل، بدون منطقه‌بندی، با چندرنگی سبز-قهوه‌ای و سبز-آبی و با دو

راستای رخ غیرعمود است و در بعضی مقاطع، یک راستای دیده می‌شود. حدود ۳۵-۳۰ درصد حجمی مقاطع آمفیبولیتی را پلاژیوکلازها شامل می‌شوند که اغلب بدون شکل و گاهی نیمه شکل‌دار و بدون منطقه‌بندی هستند. کانی‌های فرعی در آمفیبولیت‌های بررسی شده شامل بیوتیت، اسفن، کوارتز، تورمالین و کانی‌های کدر هستند که در کل، حدود ۵ درصد حجمی مقاطع را تشکیل می‌دهند.

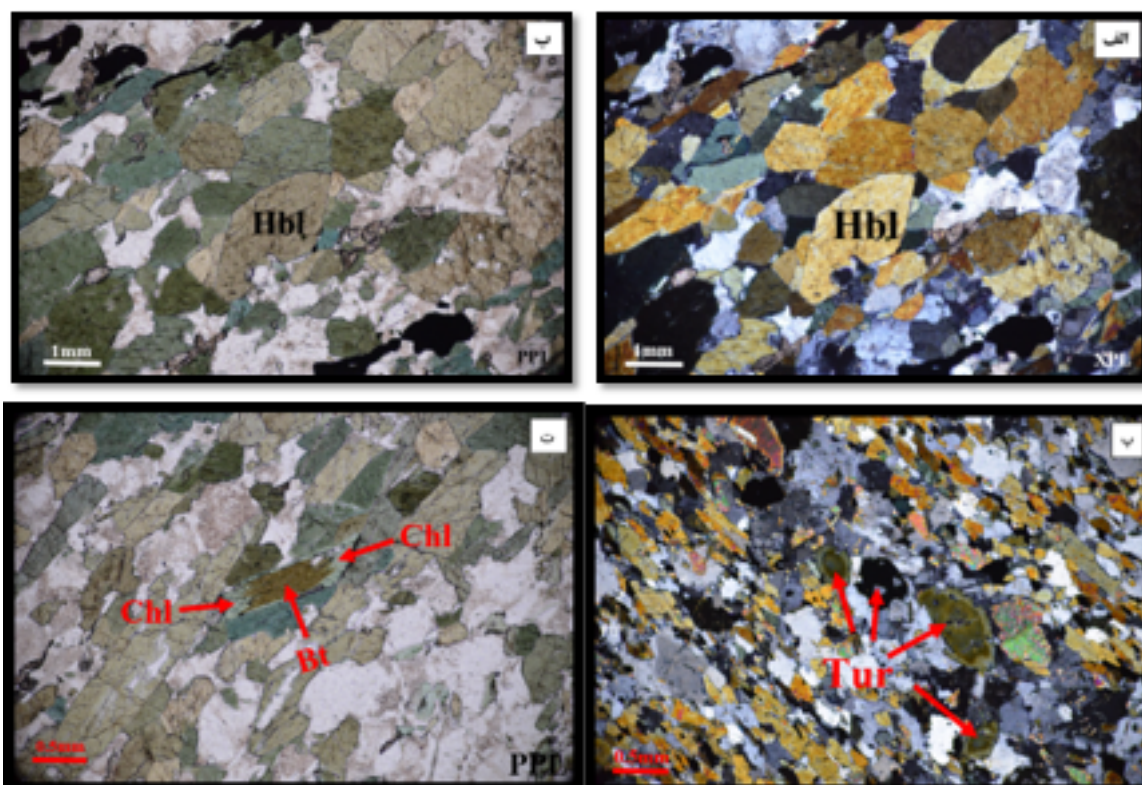
## بیوتیت آمفیبولیت

این سنگ ها نسبت به سایر آمفیبولیت ها بیشترین برونزد را در منطقه داشته و اغلب بافت دانه شکفتی دارند. افزون بر این بافت، آشکارا آرایش موازی و بافت ورقه شکفتی نیز نشان می دهند. بیوتیت آمفیبولیت دربردارنده ۴۵-۵۰ درصد هورنبلند با اندازه ۰/۱ تا بیش از ۲ میلی متر، ۳۵-۳۰ درصد پلاژیوکلاز در اندازه ۰/۲ تا ۲ میلی متر، ۱۰ درصد بیوتیت با اندازه ۰/۰۵ تا ۲ میلی متر و ۵ درصد کانی های فرعی و ثانویه شامل تورمالین، اسفن، اپیدوت، کلریت، سیریسیت، کلسیت و کانی های کدر است. تورمالین ها در بعضی مقاطع منطقه بندی نشان می دهند و با توجه به بررسی های پیشین [۵]، از نوع دراویت و غیرماگمایی هستند (شکل ۳ پ). بیوتیت ها اغلب در راستای برگواگی به کلریت تبدیل شده اند (شکل ۳ ت) و با توجه به بررسی های غفوری [۶] از نوع منیزیم دار هستند. در بعضی مقاطع، بیوتیت آمفیبولیت ها در اثر دگرسانی شدید به اپیدوت و کلریت تبدیل شده و اپیدوت آمفیبولیت تشکیل داده اند که این روابط واکنشی از شواهد دگرگونی پسروده در حد رخساره اپیدوت آمفیبولیت در منطقه هستند.

## شیمی کانی آمفیبول

براساس سنگ شناسی سنگ های دگرگونی مافیک، آمفیبول یک کانی شاخص به حساب می آید. کانی های گروه آمفیبول با فرمول کلی  $AB_2C_5T_8O_{22}W_2$  معرفی شده اند [۷] که جایگاه A با Na, K, Ca, Pb, Li، جایگاه B با  $Mn^{+2}$ , Na, Ca, Mg,  $Fe^{2+}$ , Mn, Al,  $Fe^{+3}$ ، جایگاه C با  $Fe^{+3}$ , Mg, Li، جایگاه  $T$  با  $Mn^{+2}$ , Cr,  $Ti^{+4}$ , Li، جایگاه  $W$  با  $OH$ , F, Cl,  $O^{+2}$  اشغال می شوند. عناصر فرعی چون Zn, Zr,  $Ni^{+2}$ ,  $Co^{+2}$ ,  $V^{+3}$  و Sc نیز احتمال حضور در جایگاه C به صورت کاتیون را دارند.

بر پایه پارامتر  $(Ca+Na)^B$ ، آمفیبول ها در سه گروه جای می گیرند [۷]: (۱) آمفیبول کلسیمی با  ${}^B Ca / (Ca+Na) \geq 0.75$ ، (۲) آمفیبول سدیمی-کلسیمی با  $0.25 < {}^B Ca / (Ca+Na) < 0.75$ ، (۳) آمفیبول سدیمی با  ${}^B Ca / (Ca+Na) \geq 0.25$  بر این اساس، آمفیبول نمونه های مورد بررسی در منطقه گل گهر در دو گروه کلسیمی و سدیمی-کلسیمی قرار دارند (جدول های ۱ و ۲).



شکل ۳ الف و ب) بلورهای درهم قفل شده آمفیبول در آمفیبولیت های منطقه، به ترتیب در نور قطبیده متقاطع (xpl) و نور قطبیده صفحه ای (ppl). پ) تورمالین های دارای منطقه بندی در بیوتیت آمفیبولیت ها. ت) بیوتیت کلریتی شده در بیوتیت آمفیبولیت ها.

جدول ۱ نتایج تجزیه نقطه‌ای آمفیبول‌های کلسیمی موجود در آمفیبولیت معدن گل‌گهر.

| نمونه    | SiO <sub>2</sub> (wt.%) | TiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | FeO   | MnO  | MgO   | CaO   | Na <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | مجموع        |
|----------|-------------------------|------------------|--------------------------------|-------|------|-------|-------|-------------------|------------------|--------------|
| ۱-۱-۲GQ  | ۴۵.۵۹                   | ۰.۸۰             | ۱۰.۸۷                          | ۱۷.۵۶ | ۰.۱۸ | ۱۰.۰۰ | ۱۰.۲۰ | ۲.۳۰              | ۰.۷۰             | ۹۸.۲         |
| ۱-۱-۲GQ  | ۴۵.۸۴                   | ۰.۸۷             | ۱۰.۴۶                          | ۱۸.۴۰ | ۰.۱۰ | ۱۰.۳۰ | ۱۰.۸۲ | ۲.۱۶              | ۰.۷۲             | ۹۹.۱۶, ۸۹.۶۷ |
| ۱-۱-۲GQ  | ۴۵.۵۲                   | ۰.۵۸             | ۱۱.۱۳                          | ۱۶.۲۹ | ۰.۱۹ | ۱۰.۱۷ | ۱۱.۲۶ | ۲.۱۲              | ۰.۵۸             | ۹۷.۸۴        |
| ۲-۱-۲GQ  | ۴۶.۲۴                   | ۰.۷۶             | ۱۰.۸۱                          | ۱۸.۳۴ | ۰.۱۵ | ۱۰.۷۰ | ۱۰.۰۳ | ۲.۱۰              | ۰.۵۹             | 10.81        |
| ۲-۱-۲GQ  | ۴۵.۶۱                   | ۰.۷۳             | ۱۱.۲۳                          | ۱۸.۲۳ | ۰.۰۹ | ۱۰.۳۰ | ۱۰.۶۳ | ۲.۱۵              | ۰.۷۲             | 9.52         |
| ۲-۱-۲GQ  | ۴۴.۵۸                   | ۰.۷۱             | ۱۲.۲۶                          | ۱۸.۵۷ | ۰.۲۱ | ۹.۸۹  | ۹.۶۶  | ۲.۳۱              | ۰.۶۹             | ۹۸.۸۸        |
| ۱-۱۳-۲GQ | ۴۷.۲۵                   | ۰.۶۳             | ۱۱.۱۳                          | ۱۷.۳۹ | ۰.۲۳ | ۱۰.۰۹ | ۱۰.۱۹ | ۲.۵۱              | ۰.۴۸             | 18.31        |
| ۱-۱۳-۲GQ | ۴۷.۶۵                   | ۰.۵۵             | ۱۰.۵۸                          | ۱۷.۲۸ | ۰.۱۴ | ۱۰.۳۱ | ۱۰.۲۰ | ۲.۱۰              | ۰.۴۲             | ۹۹.۲۳        |
| ۱-۱۳-۲GQ | ۴۷.۰۶                   | ۰.۶۵             | ۱۰.۴۰                          | ۱۷.۸۱ | ۰.۱۷ | ۱۰.۱۳ | ۱۰.۳۴ | ۲.۳۵              | ۰.۴۵             | 17.09        |
| ۱-۱۳-۲GQ | ۴۶.۹۱                   | ۰.۵۳             | ۱۰.۵۹                          | ۱۷.۹۴ | ۰.۲۲ | ۱۱.۰۷ | ۹.۱۸  | ۲.۱۹              | ۰.۴۵             | ۹۹.۰۸        |
| ۱-۱۳-۲GQ | ۴۶.۸۹                   | ۰.۶۰             | ۱۰.۲۹                          | ۱۶.۲۴ | ۰.۱۶ | ۱۰.۹۷ | ۱۰.۲۱ | ۲.۱۷              | ۰.۴۹             | ۹۸.۰۲        |
| ۳-۱۳-۲GQ | ۴۷.۲۹                   | ۰.۷۰             | ۱۰.۴۳                          | ۱۷.۶۶ | ۰.۲۵ | ۱۰.۰۴ | ۱۰.۳۲ | ۲.۲۳              | ۰.۴۷             | ۹۹.۲۹        |
| ۳-۱۳-۲GQ | ۴۶.۸۵                   | ۰.۵۲             | ۱۰.۶۴                          | ۱۷.۴۳ | ۰.۱۶ | ۱۰.۲۳ | ۱۰.۵۹ | ۲.۳۰              | ۰.۴۲             | 33.98        |
| ۳-۱۳-۲GQ | ۴۷.۲۳                   | ۰.۴۶             | ۱۰.۹۷                          | ۱۶.۶۵ | ۰.۱۸ | ۱۰.۸۹ | ۱۰.۶۹ | ۱.۹۹              | ۰.۴۶             | ۹۹.۵۲        |
| ۳-۱۳-۲GQ | ۴۷.۰۶                   | ۰.۵۱             | ۱۰.۵۶                          | ۱۶.۰۹ | ۰.۲۴ | ۱۱.۲۵ | ۱۰.۶۶ | ۲.۲۴              | ۰.۴۹             | 11.16        |
| ۳-۱۳-۲GQ | ۴۶.۲۳                   | ۰.۳۸             | ۱۰.۲۰                          | ۱۸.۰۵ | ۰.۱۲ | ۱۰.۶۹ | ۱۰.۵۹ | ۲.۱۴              | ۰.۵۳             | 7.58         |
| ۶-۱۳-۲GQ | ۴۶.۳۰                   | ۰.۵۸             | ۱۰.۲۷                          | ۱۷.۴۹ | ۰.۲۱ | ۱۱.۱۵ | ۱۰.۳۱ | ۲.۴۸              | ۰.۴۳             | ۹۹.۲۲        |
| ۱۳-۲GQ   | ۴۷.۱۸                   | ۰.۶۴             | ۱۰.۴۷                          | ۱۷.۲۳ | ۰.۲۵ | ۱۰.۳۹ | ۱۰.۳۳ | ۲.۲۳              | ۰.۴۵             | -106.86      |
| ۱۳-۲GQ   | ۴۵.۱۰                   | ۰.۵۵             | ۱۲.۰۰                          | ۱۷.۱۲ | ۰.۱۲ | ۹.۸۵  | ۱۰.۶۹ | ۲.۵۲              | ۰.۵۴             | ۹۸.۵۹        |
| ۱۲-۴GQ   | ۴۴.۱۵                   | ۰.۴۰             | ۱۳.۴۶                          | ۱۶.۰۱ | ۰.۰۷ | ۹.۷۱  | ۹.۵۴  | ۳.۴۰              | ۰.۳۰             | ۹۷.۰۴        |
| ۵-۱-۵GQ  | ۴۴.۵۶                   | ۰.۸۱             | ۱۰.۷۴                          | ۱۹.۲۰ | ۰.۲۵ | ۹.۲۵  | ۱۰.۳۰ | ۲.۴۳              | ۰.۷۸             | ۹۸.۳۲        |
| ۶-۱-۵GQ  | ۴۴.۸۰                   | ۰.۴۸             | ۱۱.۹۰                          | ۱۷.۵۷ | ۰.۱۷ | ۹.۹۰  | ۱۰.۸۸ | ۲.۳۱              | ۰.۷۰             | ۹۸.۷۱        |
| ۷-۱-۵GQ  | ۴۶.۰۵                   | ۰.۶۳             | ۱۱.۲۰                          | ۱۷.۸۸ | ۰.۲۲ | ۱۰.۴۲ | ۱۰.۶۳ | ۲.۱۰              | ۰.۵۹             | ۹۹.۷۲        |
| ۱۴-۲GQ   | ۴۴.۶۴                   | ۰.۸۴             | ۱۱.۴۸                          | ۱۸.۷۷ | ۰.۳۲ | ۹.۵۹  | ۱۰.۲۷ | ۲.۲۲              | ۰.۷۸             | ۹۸.۹۱        |
| ۱۵-۲GQ   | ۴۵.۳۴                   | ۰.۶۹             | ۱۱.۰۱                          | ۱۷.۸۲ | ۰.۱۵ | ۱۰.۰۹ | ۱۰.۸۳ | ۱.۹۹              | ۰.۷۶             | ۹۸.۶۸        |
| ۱۶-۲GQ   | ۴۵.۵۶                   | ۰.۶۲             | ۱۱.۴۸                          | ۱۷.۶۰ | ۰.۱۶ | ۱۰.۳۰ | ۱۰.۱۳ | ۲.۰۳              | ۰.۴۵             | -1.06        |
| ۱-۱-۶GQ  | ۴۴.۴۹                   | ۰.۸۵             | ۱۱.۴۴                          | ۱۹.۸۵ | ۰.۳۱ | ۸.۷۹  | ۱۰.۳۹ | ۱.۸۸              | ۰.۹۸             | ۹۸.۹۸        |
| ۱-۱-۶GQ  | ۴۴.۳۴                   | ۰.۵۴             | ۱۱.۴۶                          | ۲۰.۴۸ | ۰.۳۸ | ۸.۷۳  | ۱۰.۵۲ | ۲.۳۰              | ۰.۹۶             | 33.77        |
| ۱-۱-۶GQ  | ۴۵.۳۰                   | ۰.۷۳             | ۱۱.۰۰                          | ۱۸.۸۲ | ۰.۳۷ | ۹.۲۶  | ۱۰.۴۳ | ۲.۳۱              | ۰.۹۲             | 25.91        |
| ۱-۱-۶GQ  | ۴۴.۰۵                   | ۰.۷۰             | ۱۲.۰۹                          | ۲۰.۵۱ | ۰.۴۵ | ۸.۲۴  | ۱۰.۶۳ | ۲.۰۷              | ۰.۹۸             | 14.21        |
| ۲-۱-۶GQ  | ۴۳.۶۲                   | ۰.۹۷             | ۱۱.۶۳                          | ۲۰.۵۰ | ۰.۴۰ | ۸.۹۸  | ۱۰.۶۱ | ۲.۱۰              | ۰.۹۶             | 30.02        |
| ۲-۱-۶GQ  | ۴۳.۹۳                   | ۰.۹۴             | ۹.۹۵                           | ۲۰.۲۰ | ۰.۴۱ | ۸.۳۸  | ۱۰.۴۷ | ۲.۳۰              | ۰.۹۷             | ۹۷.۵۵        |
| ۲-۱-۶GQ  | ۴۳.۲۳                   | ۰.۹۱             | ۱۰.۴۱                          | ۱۹.۷۴ | ۰.۳۸ | ۹.۲۰  | ۱۰.۳۷ | ۲.۵۰              | ۰.۹۲             | 36.45        |
| ۲-۱-۶GQ  | ۴۶.۰۳                   | ۰.۸۰             | ۱۰.۲۸                          | ۱۹.۱۹ | ۰.۲۹ | ۹.۳۱  | ۱۰.۸۷ | ۱.۷۹              | ۰.۸۲             | 95.01        |
| ۱-۴-۷GQ  | ۴۶.۱۵                   | ۰.۸۳             | ۱۱.۰۰                          | ۱۷.۳۱ | ۰.۳۳ | ۱۰.۶۵ | ۱۰.۶۴ | ۲.۰۴              | ۰.۶۱             | ۹۹.۵۶        |
| ۱-۴-۷GQ  | ۴۶.۱۰                   | ۰.۷۱             | ۱۱.۰۲                          | ۱۷.۳۰ | ۰.۳۲ | ۱۰.۶۲ | ۱۰.۸۱ | ۱.۹۰              | ۰.۶۵             | ۹۹.۴۳        |
| ۱-۴-۷GQ  | ۴۵.۶۹                   | ۰.۷۵             | ۱۰.۹۷                          | ۱۷.۸۵ | ۰.۳۹ | ۱۰.۵۶ | ۱۰.۷۹ | ۲.۰۶              | ۰.۵۹             | ۹۹.۶۵        |
| ۱-۴-۷GQ  | ۴۶.۵۴                   | ۰.۷۵             | ۱۰.۴۷                          | ۱۷.۲۵ | ۰.۳۹ | ۱۰.۹۳ | ۱۰.۴۷ | ۲.۰۰              | ۰.۶۰             | 21.34        |
| ۳-۴-۷GQ  | ۴۵.۰۳                   | ۰.۹۴             | ۱۱.۲۸                          | ۱۷.۷۳ | ۰.۳۳ | ۱۰.۲۵ | ۱۰.۷۶ | ۱.۹۰              | ۰.۷۰             | ۹۹.۰۲        |
| ۳-۴-۷GQ  | ۴۶.۳۶                   | ۰.۷۴             | ۱۱.۰۷                          | ۱۷.۳۵ | ۰.۳۴ | ۱۰.۸۱ | ۱۰.۶۴ | ۱.۹۵              | ۰.۶۸             | ۹۹.۹۴        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۵.۹۹                   | ۰.۸۴             | ۱۱.۳۳                          | ۱۷.۴۳ | ۰.۲۰ | ۱۰.۳۶ | ۱۰.۹۶ | ۱.۹۹              | ۰.۷۷             | 119.93       |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۵.۵۹                   | ۰.۷۴             | ۱۰.۰۱                          | ۱۷.۶۶ | ۰.۲۳ | ۱۰.۹۴ | ۱۰.۸۸ | ۱.۸۴              | ۰.۶۶             | 107.49       |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۵.۱۳                   | ۰.۴۱             | ۱۱.۱۸                          | ۱۸.۳۳ | ۰.۱۹ | ۱۰.۰۳ | ۱۱.۴۵ | ۱.۹۱              | ۰.۵۲             | 99.15        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۹.۵۴                   | ۰.۳۴             | ۵.۸۳                           | ۱۷.۶۱ | ۰.۳۷ | ۱۱.۶۷ | ۱۱.۰۸ | ۱.۳۳              | ۰.۳۹             | 54.11        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۸.۰۳                   | ۰.۶۰             | ۱۰.۱۳                          | ۱۶.۸۰ | ۰.۲۶ | ۱۱.۴۴ | ۱۰.۸۰ | ۱.۳۴              | ۰.۴۴             | 45.36        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۵.۷۷                   | ۰.۹۴             | ۱۱.۲۲                          | ۱۷.۳۴ | ۰.۳۳ | ۱۰.۷۲ | ۱۰.۶۷ | ۲.۰۶              | ۰.۷۲             | 15.61        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۶.۶۰                   | ۰.۸۴             | ۱۰.۶۴                          | ۱۵.۷۷ | ۰.۳۰ | ۱۱.۳۴ | ۱۰.۵۸ | ۱.۸۹              | ۰.۶۵             | ۹۸.۶۱        |
| ۲-۵-۷GQ  | ۴۶.۶۵                   | ۰.۸۱             | ۱۰.۰۲                          | ۱۷.۱۹ | ۰.۳۳ | ۱۱.۰۱ | ۱۰.۸۶ | ۲.۱۵              | ۰.۶۹             | 11.92        |
| ۱۱-۸GQ   | ۵۰.۰۹                   | ۰.۳۸             | ۱۰.۳۶                          | ۸.۴۷  | ۰.۱۲ | ۱۶.۰۲ | ۱۱.۳۴ | ۱.۸۳              | ۰.۳۵             | ۹۸.۹۶        |
| ۱۱-۸GQ   | ۵۰.۳۰                   | ۰.۴۰             | ۹.۷۹                           | ۷.۸۱  | ۰.۲۱ | ۱۵.۷۰ | ۱۱.۸۷ | ۱.۶۴              | ۰.۳۶             | ۹۸.۰۸        |
| ۱۱-۸GQ   | ۵۰.۰۹                   | ۰.۴۱             | ۱۰.۱۲                          | ۸.۹۲  | ۰.۱۷ | ۱۵.۶۸ | ۱۲.۰۰ | ۱.۷۲              | ۰.۳۹             | ۹۹.۵         |
| ۱۱-۸GQ   | ۵۰.۱۸                   | ۰.۴۱             | ۱۰.۳۷                          | ۹.۰۱  | ۰.۱۶ | ۱۵.۳۹ | ۱۱.۲۳ | ۱.۷۴              | ۰.۳۸             | 82.86        |

ادامه جدول ۱ محاسبه کاتیون بر اساس ۲۳ اکسیژن.

| نمونه    | Si(apfu) | Ti   | Al   | Fe   | Mn   | Mg   | Ca   | Na   | K    |
|----------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ۱-۱۰-۲GQ | ۶/۵۶     | ۰/۰۹ | ۱/۸۸ | ۲/۲۰ | ۰/۰۲ | ۲/۲۴ | ۱/۶۹ | ۰/۶۴ | ۰/۱۴ |
| ۱-۱۰-۲GQ | ۶/۵۶     | ۰/۰۹ | ۱/۹۳ | ۲/۲۰ | ۰/۰۱ | ۲/۲۰ | ۱/۶۶ | ۰/۶۰ | ۰/۱۳ |
| ۱-۱۰-۲GQ | ۶/۷۲     | ۰/۰۶ | ۱/۹۴ | ۲/۰۱ | ۰/۰۲ | ۲/۲۴ | ۱/۷۸ | ۰/۶۱ | ۰/۱۱ |
| ۲-۱۰-۲GQ | ۶/۶۱     | ۰/۰۸ | ۱/۸۲ | ۲/۱۹ | ۰/۰۲ | ۲/۲۸ | ۱/۶۹ | ۰/۵۸ | ۰/۱۱ |
| ۲-۱۰-۲GQ | ۶/۵۲     | ۰/۰۸ | ۱/۸۹ | ۲/۳۰ | ۰/۰۱ | ۲/۲۰ | ۱/۶۳ | ۰/۶۰ | ۰/۱۳ |
| ۲-۱۰-۲GQ | ۶/۴۴     | ۰/۰۸ | ۲/۰۹ | ۲/۲۴ | ۰/۰۳ | ۲/۱۳ | ۱/۴۹ | ۰/۶۵ | ۰/۱۳ |
| ۱-۱۳-۳GQ | ۶/۶۷     | ۰/۰۷ | ۱/۸۵ | ۲/۰۵ | ۰/۰۳ | ۲/۲۳ | ۱/۵۴ | ۰/۶۹ | ۰/۰۹ |
| ۱-۱۳-۳GQ | ۶/۷۶     | ۰/۰۶ | ۱/۷۳ | ۲/۰۴ | ۰/۰۲ | ۲/۳۹ | ۱/۵۷ | ۰/۵۷ | ۰/۰۷ |
| ۱-۱۳-۳GQ | ۶/۷۱     | ۰/۰۷ | ۱/۷۵ | ۲/۱۲ | ۰/۰۲ | ۲/۲۳ | ۱/۵۸ | ۰/۶۵ | ۰/۰۸ |
| ۱-۱۳-۳GQ | ۶/۶۷     | ۰/۰۶ | ۱/۷۷ | ۲/۱۳ | ۰/۰۳ | ۲/۲۴ | ۱/۴۰ | ۰/۶۰ | ۰/۰۸ |
| ۱-۱۳-۳GQ | ۶/۸۱     | ۰/۰۷ | ۱/۷۶ | ۱/۹۷ | ۰/۰۲ | ۲/۳۷ | ۱/۵۹ | ۰/۶۱ | ۰/۰۹ |
| ۳-۱۳-۳GQ | ۶/۶۶     | ۰/۰۷ | ۱/۸۳ | ۲/۰۸ | ۰/۰۳ | ۲/۳۲ | ۱/۵۶ | ۰/۶۷ | ۰/۰۸ |
| ۳-۱۳-۳GQ | ۶/۶۷     | ۰/۰۶ | ۱/۷۸ | ۲/۰۹ | ۰/۰۲ | ۲/۳۸ | ۱/۶۱ | ۰/۶۳ | ۰/۰۸ |
| ۳-۱۳-۳GQ | ۶/۷۶     | ۰/۰۵ | ۱/۸۵ | ۱/۹۹ | ۰/۰۲ | ۲/۳۲ | ۱/۶۴ | ۰/۵۵ | ۰/۰۸ |
| ۳-۱۳-۳GQ | ۶/۸۴     | ۰/۰۵ | ۱/۷۷ | ۱/۹۲ | ۰/۰۳ | ۲/۳۹ | ۱/۶۳ | ۰/۶۲ | ۰/۰۹ |
| ۳-۱۳-۳GQ | ۶/۶۱     | ۰/۰۴ | ۱/۹۰ | ۲/۱۶ | ۰/۰۱ | ۲/۲۸ | ۱/۶۲ | ۰/۵۹ | ۰/۱۰ |
| ۶-۱۳-۳GQ | ۶/۶۶     | ۰/۰۶ | ۱/۷۶ | ۲/۱۰ | ۰/۰۳ | ۲/۳۹ | ۱/۵۹ | ۰/۶۹ | ۰/۰۸ |
| ۱۳۲-۲GQ  | ۶/۷۶     | ۰/۰۷ | ۱/۷۳ | ۲/۰۲ | ۰/۰۳ | ۲/۳۸ | ۱/۵۵ | ۰/۶۱ | ۰/۰۸ |
| ۱۳-۲GQ   | ۶/۶۰     | ۰/۰۶ | ۲/۰۷ | ۲/۱۰ | ۰/۰۱ | ۲/۱۵ | ۱/۶۸ | ۰/۷۲ | ۰/۱۰ |
| ۱۲-۴GQ   | ۶/۵۰     | ۰/۰۴ | ۲/۳۴ | ۱/۹۷ | ۰/۰۱ | ۲/۱۳ | ۱/۵۱ | ۰/۹۷ | ۰/۰۶ |
| ۵-۱-۵GQ  | ۶/۵۹     | ۰/۰۹ | ۱/۸۷ | ۲/۳۸ | ۰/۰۳ | ۲/۰۴ | ۱/۶۳ | ۰/۷۰ | ۰/۱۵ |
| ۶-۱-۵GQ  | ۶/۵۶     | ۰/۰۵ | ۲/۰۵ | ۲/۱۵ | ۰/۰۲ | ۲/۱۶ | ۱/۷۱ | ۰/۶۶ | ۰/۱۳ |
| ۷-۱-۵GQ  | ۶/۶۲     | ۰/۰۷ | ۱/۹۰ | ۲/۱۵ | ۰/۰۳ | ۲/۲۳ | ۱/۶۴ | ۰/۵۹ | ۰/۱۱ |
| ۱۴-۲GQ   | ۶/۵۲     | ۰/۰۹ | ۱/۹۸ | ۲/۲۹ | ۰/۰۴ | ۲/۰۹ | ۱/۶۱ | ۰/۶۳ | ۰/۱۴ |
| ۱۵-۲GQ   | ۶/۶۳     | ۰/۰۸ | ۱/۹۰ | ۲/۱۸ | ۰/۰۲ | ۲/۲۰ | ۱/۷۰ | ۰/۵۶ | ۰/۱۴ |
| ۱۶-۲GQ   | ۶/۵۴     | ۰/۰۷ | ۱/۹۴ | ۲/۲۳ | ۰/۰۲ | ۲/۲۰ | ۱/۶۷ | ۰/۵۶ | ۰/۱۴ |
| ۱-۱-۶GQ  | ۶/۵۳     | ۰/۰۹ | ۱/۹۸ | ۲/۴۴ | ۰/۰۴ | ۱/۹۲ | ۱/۶۳ | ۰/۵۳ | ۰/۱۸ |
| ۱-۱-۶GQ  | ۶/۵۳     | ۰/۱۰ | ۱/۹۳ | ۲/۴۷ | ۰/۰۵ | ۱/۹۳ | ۱/۶۲ | ۰/۶۴ | ۰/۱۸ |
| ۱-۱-۶GQ  | ۶/۵۷     | ۰/۰۹ | ۱/۸۸ | ۲/۴۰ | ۰/۰۴ | ۲/۰۰ | ۱/۶۶ | ۰/۶۵ | ۰/۱۷ |
| ۱-۱-۶GQ  | ۶/۴۶     | ۰/۰۸ | ۲/۰۹ | ۲/۵۲ | ۰/۰۶ | ۱/۸۰ | ۱/۷۳ | ۰/۵۹ | ۰/۲۱ |
| ۲-۱-۶GQ  | ۶/۴۵     | ۰/۱۱ | ۱/۹۸ | ۲/۴۸ | ۰/۰۵ | ۱/۹۴ | ۱/۶۴ | ۰/۶۹ | ۰/۱۸ |
| ۲-۱-۶GQ  | ۶/۶۳     | ۰/۱۱ | ۱/۷۷ | ۲/۵۵ | ۰/۰۵ | ۱/۸۹ | ۱/۶۹ | ۰/۶۷ | ۰/۱۹ |
| ۲-۱-۶GQ  | ۶/۵۴     | ۰/۱۰ | ۱/۹۴ | ۲/۳۹ | ۰/۰۵ | ۱/۹۸ | ۱/۶۱ | ۰/۷۰ | ۰/۱۷ |
| ۲-۱-۶GQ  | ۶/۶۴     | ۰/۰۹ | ۱/۹۲ | ۲/۳۲ | ۰/۰۴ | ۲/۰۰ | ۱/۶۸ | ۰/۵۰ | ۰/۱۵ |
| ۱-۴-۷GQ  | ۶/۶۴     | ۰/۰۹ | ۱/۸۷ | ۲/۰۸ | ۰/۰۴ | ۲/۲۸ | ۱/۶۴ | ۰/۵۷ | ۰/۱۱ |
| ۱-۴-۷GQ  | ۶/۶۴     | ۰/۰۸ | ۱/۸۷ | ۲/۰۸ | ۰/۰۴ | ۲/۲۸ | ۱/۶۷ | ۰/۵۳ | ۰/۱۲ |
| ۱-۴-۷GQ  | ۶/۵۹     | ۰/۰۸ | ۱/۸۶ | ۲/۱۵ | ۰/۰۵ | ۲/۲۷ | ۱/۶۷ | ۰/۵۸ | ۰/۱۱ |
| ۱-۴-۷GQ  | ۶/۶۲     | ۰/۰۸ | ۱/۷۶ | ۲/۱۷ | ۰/۰۵ | ۲/۳۲ | ۱/۶۰ | ۰/۵۵ | ۰/۱۱ |
| ۳-۴-۷GQ  | ۶/۵۴     | ۰/۱۰ | ۱/۹۳ | ۲/۱۵ | ۰/۰۴ | ۲/۲۴ | ۱/۶۷ | ۰/۵۳ | ۰/۱۳ |
| ۳-۴-۷GQ  | ۶/۶۳     | ۰/۰۸ | ۱/۸۷ | ۲/۰۸ | ۰/۰۴ | ۲/۳۰ | ۱/۶۳ | ۰/۵۴ | ۰/۱۲ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۵۷     | ۰/۰۹ | ۱/۹۱ | ۲/۲۰ | ۰/۰۲ | ۲/۲۱ | ۱/۶۸ | ۰/۵۵ | ۰/۱۴ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۷۸     | ۰/۰۸ | ۱/۶۸ | ۲/۱۰ | ۰/۰۳ | ۲/۳۲ | ۱/۶۶ | ۰/۵۱ | ۰/۱۲ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۷۳     | ۰/۰۴ | ۱/۸۸ | ۲/۱۹ | ۰/۰۲ | ۲/۱۴ | ۱/۷۵ | ۰/۵۳ | ۰/۰۹ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۷/۳۵     | ۰/۰۴ | ۰/۹۸ | ۲/۱۰ | ۰/۰۴ | ۲/۴۸ | ۱/۶۹ | ۰/۳۷ | ۰/۰۷ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۷۵     | ۰/۰۶ | ۱/۷۸ | ۱/۹۷ | ۰/۰۳ | ۲/۴۰ | ۱/۶۳ | ۰/۵۱ | ۰/۰۸ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۵۸     | ۰/۱۰ | ۱/۹۰ | ۲/۰۸ | ۰/۰۴ | ۲/۳۰ | ۱/۷۱ | ۰/۵۷ | ۰/۱۳ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۷۲     | ۰/۰۹ | ۱/۸۱ | ۱/۹۰ | ۰/۰۴ | ۲/۴۴ | ۱/۶۳ | ۰/۵۳ | ۰/۱۲ |
| ۲-۵-۷GQ  | ۶/۶۴     | ۰/۰۹ | ۱/۸۵ | ۲/۰۵ | ۰/۰۴ | ۲/۳۴ | ۱/۶۶ | ۰/۵۹ | ۰/۱۲ |
| ۱۱-۸GQ   | ۶/۹۵     | ۰/۰۴ | ۱/۷۰ | ۰/۹۸ | ۰/۰۱ | ۳/۳۱ | ۱/۶۹ | ۰/۴۹ | ۰/۰۶ |
| ۱۱-۸GQ   | ۷/۰۹     | ۰/۰۴ | ۱/۶۳ | ۰/۹۲ | ۰/۰۳ | ۳/۳۰ | ۱/۷۹ | ۰/۴۵ | ۰/۰۶ |
| ۱۱-۸GQ   | ۶/۹۸     | ۰/۰۴ | ۱/۶۶ | ۱/۰۴ | ۰/۰۲ | ۳/۲۶ | ۱/۷۹ | ۰/۴۶ | ۰/۰۷ |
| ۱۱-۸GQ   | ۶/۹۳     | ۰/۰۴ | ۱/۶۹ | ۱/۰۴ | ۰/۰۲ | ۳/۲۸ | ۱/۷۶ | ۰/۴۷ | ۰/۰۷ |

جدول ۲ نتایج تجزیه نقطه‌ای آمفیبول‌های سدیمی-کلسیمی موجود در آمفیبولیت معدن گل‌گهر و محاسبه کاتیون بر اساس ۲۳ اکسیژن

| نمونه                          | ۱۲-۴GQ | ۱۳-۳GQ | ۱۳-۳GQ | ۱۱-AGQ | ۱۲-۴GQ | ۱۲-۴GQ | ۱۲-۴GQ | ۱۲-۴GQ | ۱۲-۴GQ |
|--------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| SiO <sub>2</sub> (wt.%)        | ۴۴/۱۸  | ۴۰/۲۲  | ۳۹/۷۱  | ۴۰/۷۰  | ۴۵/۳۵  | ۴۴/۶۱  | ۴۳/۹۹  | ۴۴/۷۳  | ۴۴/۹۷  |
| TiO <sub>2</sub>               | ۰/۴۰   | ۱/۷۴   | ۱/۷۴   | ۱/۰۵   | ۰/۳۲   | ۰/۳۸   | ۰/۳۱   | ۰/۲۸   | ۰/۳۴   |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ۱۴/۰۴  | ۱۵/۳۳  | ۱۵/۴۳  | ۱۶/۸۵  | ۱۲/۹۶  | ۱۳/۵۴  | ۱۳/۶۹  | ۱۳/۲۵  | ۱۲/۹۹  |
| FeO                            | ۱۷/۳۶  | ۱۶/۶۶  | ۱۶/۸۶  | ۹/۴۶   | ۱۷/۱۰  | ۱۶/۴۴  | ۱۶/۶۲  | ۱۶/۶۸  | ۱۶/۳۵  |
| MnO                            | ۰/۰۷   | ۰/۰۰   | ۰/۰۰   | ۰/۰۵   | ۰/۰۸   | ۰/۰۷   | ۰/۱۷   | ۰/۱۹   | ۰/۱۱   |
| MgO                            | ۹/۸۳   | ۱۳/۶۵  | ۱۳/۴۰  | ۱۸/۲۴  | ۱۰/۶۴  | ۱۰/۲۸  | ۱۰/۴۰  | ۱۰/۶۶  | ۱۰/۶۹  |
| CaO                            | ۹/۶۳   | ۰/۱۶   | ۰/۱۶   | ۰/۱۸   | ۹/۴۶   | ۹/۵۰   | ۹/۵۶   | ۹/۳۸   | ۹/۲۴   |
| Na <sub>2</sub> O              | ۳/۲۶   | ۰/۱۷   | ۰/۲۱   | ۰/۲۶   | ۳/۴۹   | ۳/۱۹   | ۳/۳۴   | ۳/۱۰   | ۳/۱۸   |
| K <sub>2</sub> O               | ۰/۳۲   | ۹/۰۲   | ۸/۹۸   | ۹/۲۷   | ۰/۳۰   | ۰/۲۸   | ۰/۳۴   | ۰/۳۷   | ۰/۲۴   |
| مجموع                          | ۹۹/۰۹  | ۹۶/۹۵  | ۹۶/۴۹  | ۹۶/۰۶  | ۹۹/۰۷  | ۹۸/۲۹  | ۹۸/۴۲  | ۹۸/۶۴  | ۹۸/۱۱  |
| Si(apfu)                       | ۶/۳۶   | ۵/۵۷   | ۵/۵۳   | ۵/۴۸   | ۶/۴۷   | ۶/۴۵   | ۶/۳۶   | ۶/۴۲   | ۶/۴۸   |
| Ti                             | ۰/۰۴   | ۰/۱۸   | ۰/۱۸   | ۰/۱۱   | ۰/۰۳   | ۰/۰۴   | ۰/۰۳   | ۰/۰۳   | ۰/۰۴   |
| Al                             | ۲/۳۸   | ۲/۵۰   | ۲/۵۳   | ۲/۶۸   | ۲/۱۸   | ۲/۳۱   | ۲/۳۳   | ۲/۲۴   | ۲/۲۱   |
| Fe                             | ۲/۰۹   | ۱/۹۳   | ۱/۹۶   | ۱/۰۷   | ۲/۰۴   | ۱/۹۹   | ۲/۰۱   | ۲/۰۰   | ۱/۹۷   |
| Mn                             | ۰/۰۱   | ۰/۰۰   | ۰/۰۰   | ۰/۰۱   | ۰/۰۱   | ۰/۰۱   | ۰/۰۲   | ۰/۰۲   | ۰/۰۱   |
| Mg                             | ۲/۱۱   | ۲/۸۲   | ۲/۷۸   | ۳/۶۶   | ۲/۲۶   | ۲/۲۱   | ۲/۲۴   | ۲/۲۸   | ۲/۲۹   |
| Ca                             | ۱/۴۹   | ۰/۰۲   | ۰/۰۲   | ۰/۰۳   | ۱/۴۵   | ۱/۴۷   | ۱/۴۸   | ۱/۴۴   | ۱/۴۳   |
| Na                             | ۰/۹۱   | ۰/۰۵   | ۰/۰۶   | ۰/۰۷   | ۰/۹۷   | ۰/۸۹   | ۰/۹۴   | ۰/۸۶   | ۰/۸۹   |
| K                              | ۰/۰۶   | ۱/۵۹   | ۱/۶۰   | ۱/۵۹   | ۰/۰۵   | ۰/۰۵   | ۰/۰۶   | ۰/۰۷   | ۰/۰۴   |

## آمفیبول‌های کلسیمی

بلورهای آمفیبول کلسیمی دارای مشخصه  $B(Ca+\Sigma M^{2+})/\Sigma B \geq 0.75$  هستند [۷]. بیشتر آمفیبول‌های مورد بررسی در آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر از نوع کلسیمی و دارای ترکیب مگنزیوهورنبلند بوده و تعداد کمی در گستره پاراگاسیت واقع هستند. (شکل ۴ الف). در این بلورها، بخش عمده‌ای از جایگاه‌های T با سیلیسیم و جایگاه C در همه نمونه‌ها با منیزیم اشغال می‌شود. تمرکز بیشتر آلومینیم در جایگاه T و به صورت  $Al^{IV}$  است. اگرچه بیشتر سدیم در جایگاه A جای می‌گیرد، مقادیر سدیم و پتاسیم در جایگاه A بسیار پایین است. تغییر ترکیب بلورهای آمفیبول از مرکز به لبه به صورت پاراگاسیت، مگنزیوهورنبلند و ترمولیت دیده می‌شود. این تغییرات همراه با افزایش مقادیر Ca (۱/۳۹ درصد در مرکز تا ۱/۷۹ درصد در لبه)، Si (۶/۵۳ درصد در مرکز تا ۷/۰۸ درصد در لبه) و کاهش مقادیر Na (۰/۷۰ درصد در مرکز تا ۰/۵۰ درصد در لبه) و Al (۱/۹۳ درصد در مرکز تا ۰/۹۸ درصد در لبه) است (شکل ۴ ب). تغییر و افزایش پیشرونده مقدار سیلیسیم (۶/۵۳ درصد در مرکز تا ۷/۰۸ درصد در لبه) در این آمفیبول‌ها، بیانگر کاهش دما طی رشد این بلورها از مرکز به لبه است [۸].

## آمفیبول‌های سدیمی-کلسیمی

با در نظر گرفتن شرایط  $B(Ca+\Sigma M^{2+})/\Sigma B \geq 0.75$  و  $0.25 \leq B(Ca)/\Sigma B \leq B(\Sigma M^{2+})/\Sigma B$  بررسی در زیر گروه سدیمی - کلسیمی قرار می‌گیرند [۷]. براساس  $(Al+Fe^{3+}+Ti)^c$  نسبت به  $(Na+K+2Ca)^A$ ، ترکیب آمفیبول‌های سدیمی - کلسیمی منطقه مورد بررسی در گستره وینچیت قرار دارد (شکل ۴ پ). جایگاه‌های T و C با کاتیون‌های سیلیسیم و منیزیم پر شده‌اند. در این بلورها، جایگاه A اغلب خالی بوده و مجموع سدیم و پتاسیم کمتر یا برابر با ۰/۵ است. مقدار کاتیون‌های غالب موجود در جایگاه B، در همه بلورها یکسان نیست.

## دما-فشارسنجی

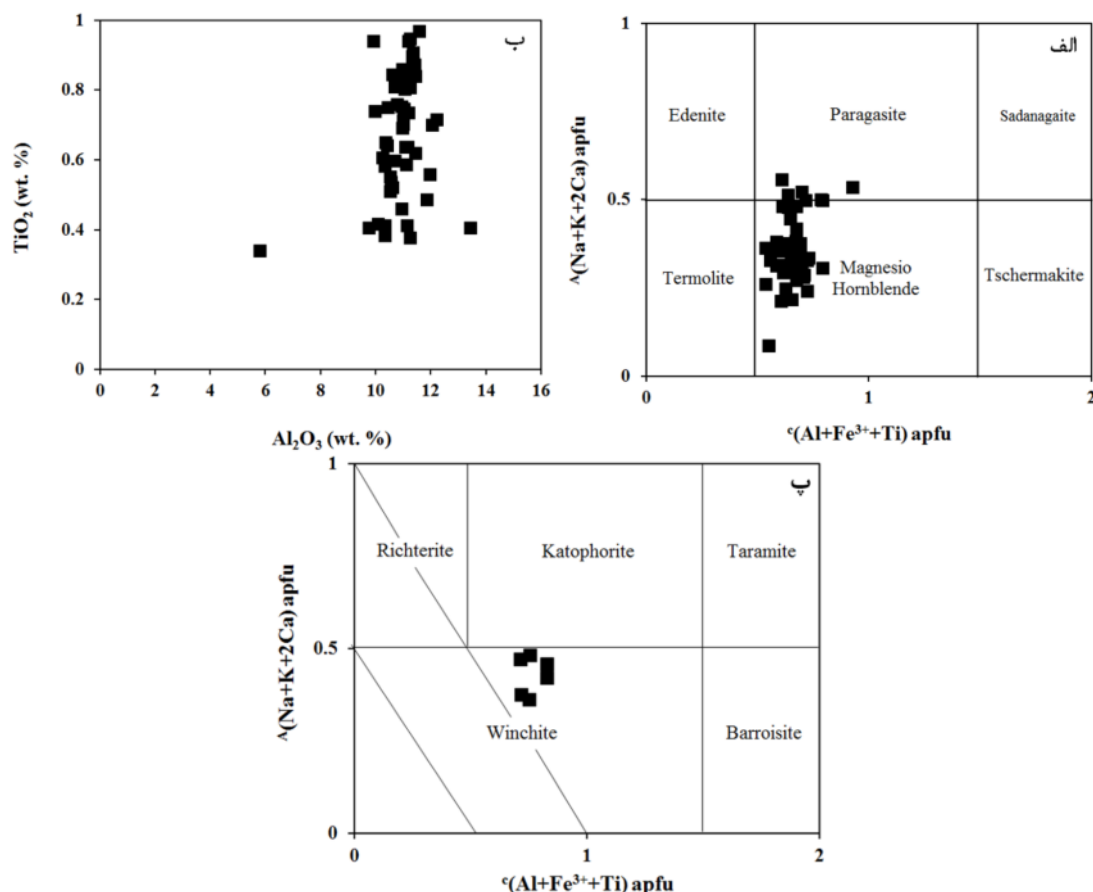
## فشارسنجی با استفاده از کانی آمفیبول

ترکیب شیمیایی کانی آمفیبول به صورت گسترده برای تعیین فشار سنگ‌های آذرین و دگرگونی به کار می‌رود. برای مثال، توزیع عنصر Al [۹-۱۱] و  $Na^B$  [۱۲، ۱۳] در کانی آمفیبول تابع فشار است و در نتیجه براساس آنها می‌توان به فشار دگرگونی پی برد.

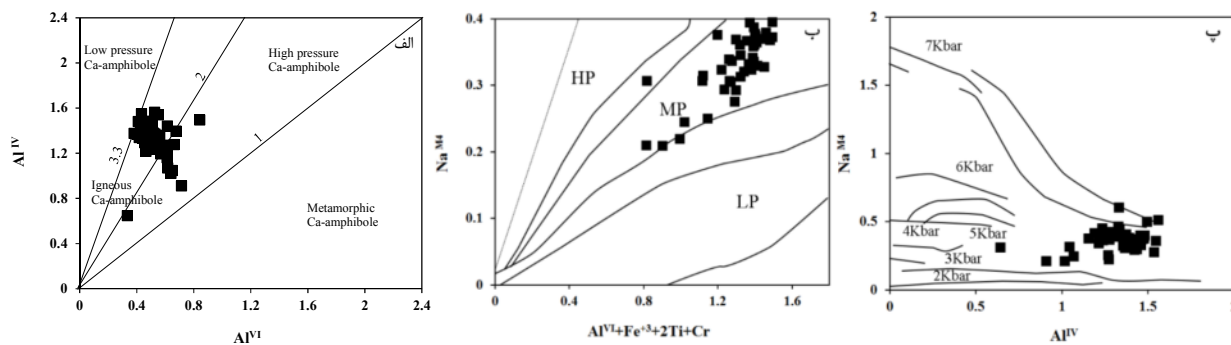
مرز بین آمفیبول‌های کلسیمی فشار پایین و فشار بالا به صورت  $Al^{IV}/Al^{VI}=2$  تعریف شده [۱۴] که معادل با فشار ۵ کیلوپا است [۱۵]. نمونه‌های مورد بررسی براساس نمودار  $Al^{IV}$  نسبت به  $Al^{VI}$ ، در گستره فشار متوسط قرار دارند (شکل

۵ الف). نمودار  $Na^B (Na_{M4})$  نسبت به  $Al^{VI}+Fe^{+3}+2Ti+Cr$  بر پایه مقادیر  $Na_{M4}$  و  $Al^{VI}$  [۱۳] در آمفیبول‌های مورد بررسی، فشار ۳ تا ۶ کیلو بار برای آمفیبولیت‌ها برآورد می‌شود که نشان‌دهنده فشار متوسط برای این سنگ‌هاست (شکل ۵ پ).

۵ الف). نمودار  $Na^B (Na_{M4})$  نسبت به  $Al^{VI}+Fe^{+3}+2Ti+Cr$  نیز نشان‌دهنده فشار متوسط تا پایین برای آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌های منطقه است (شکل ۵ ب).



شکل ۴ الف) نام‌گذاری آمفیبول‌های کلسیمی براساس مرجع [۷]. ب) نمودار  $Al_2O_3$  نسبت به  $TiO_2$  برای نشان دادن تغییرات ترکیبی بلور طی رشد. پ) نام‌گذاری آمفیبول‌های سدیمی - کلسیمی براساس مرجع [۷].



شکل ۵ الف) جایابی نمونه‌های مورد بررسی در نمودار  $Al^{IV}$  نسبت به  $Al^{VI}$  [۱۴]. ب) نمودار  $Na_{M4}$  نسبت به  $Al^{VI}+Fe^{+3}+2Ti+Cr$  آمفیبول‌های مورد بررسی که فشار متوسط تا پایین را برای آنها نشان می‌دهد. پ) تعیین فشار دگرگونی آمفیبولیت‌های معدن گل‌گهر بر اساس نمودار مرجع [۱۳].

دمایی ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد برای کانی‌های آمفیبول مورد بررسی برآورد شد (شکل ۷).

#### دما-فشارسنجی براساس زوج کانی هورنبلند-پلاژیوکلاز

روابط دماسنجی مرجع [۲۰] از مناسب‌ترین روش‌ها برای برآورد دمای تبلور کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول است. این روش که بر پایه واکنش ادنیت-ریشتریت است، در سنگ‌های آذرین و دگرگونی کوارتزار و بدون کوارتز کاربرد دارد. در این روش، دما از رابطه زیر را محاسبه می‌شود:

$$T[K] = \{78.44 + Y_{ab-an} - 33.6X_{NaM4} - (66.8 - 2.92P[kbar])X_{AlM2} + 78.5 X_{AlT1} + \ln 0.0721 - R\{9.4X_{NaA}\} / [(27X_{NaM4}X_{SiT1}X_{Anplg}) / (64X_{CaM4}X_{AlT1}X_{A})^{bplg}]\}$$

بر این اساس، گستره دمایی ۵۴۰ تا ۶۳۰ درجه سانتی‌گراد برای نمونه‌های مورد بررسی بدست آمد.

نمودار مرجع [۲۱] که با استفاده از کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز بدست آمده است، دمای بیش از ۴۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار بین ۴ تا ۷ کیلوبار را برای آمفیبول‌ها نشان می‌دهد که با دما و فشار قابل انتظار برای رخساره آمفیبولیت همخوانی دارد (شکل ۸).

ترکیب آمفیبول به فشار، دما، گریزندگی اکسیژن، ترکیب کل و فازهای همزیست بستگی دارد [۱۶]، به‌طوری که با افزایش دما و فشار آمفیبول، مقدار عناصر K, Al, Na, Ti و Mg# افزایش یافته و Si کاهش می‌یابد [۱۷].

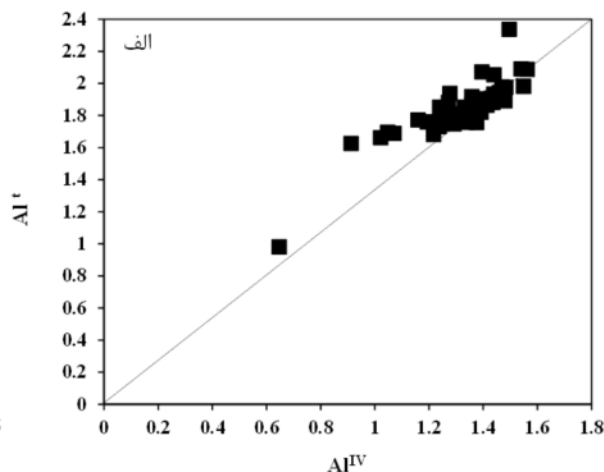
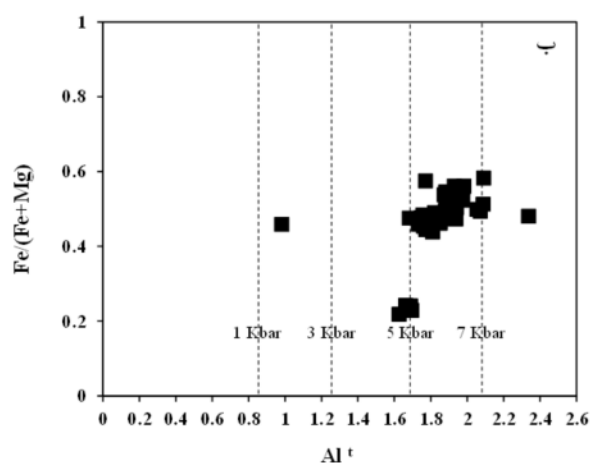
از متداول‌ترین روش‌های برآورد فشار در آمفیبول استفاده از فشارسنج Al است. استفاده از این فشارسنج نیازمند همزیستی کانی‌های آمفیبول، بیوتیت، پلاژیوکلاز و فلدسپار قلیایی است. از آنجا که آمفیبول‌های مورد بررسی با این کانی‌ها همزیست هستند، می‌توان از این فشارسنج برای پی بردن به فشار آمفیبولیت‌های منطقه معدنی گل‌گهر استفاده کرد.

همخوانی مناسبی بین  $Al^{IV}$  کل و  $Al^{IV}$  در آمفیبول‌های مورد بررسی وجود دارد (شکل ۶ الف) که براساس نمودار مرجع [۱۸] گستره فشار از ۳ تا ۷ بار است (شکل ۶ ب).

برای برآورد فشار تبلور آمفیبول از روش‌های مرسوم زمین‌شناسی بر اساس مقدار Al موجود در هورنبلند استفاده شد و نتایج در جدول ۳ آورده شده است.

#### دماسنجی براساس کانی آمفیبول

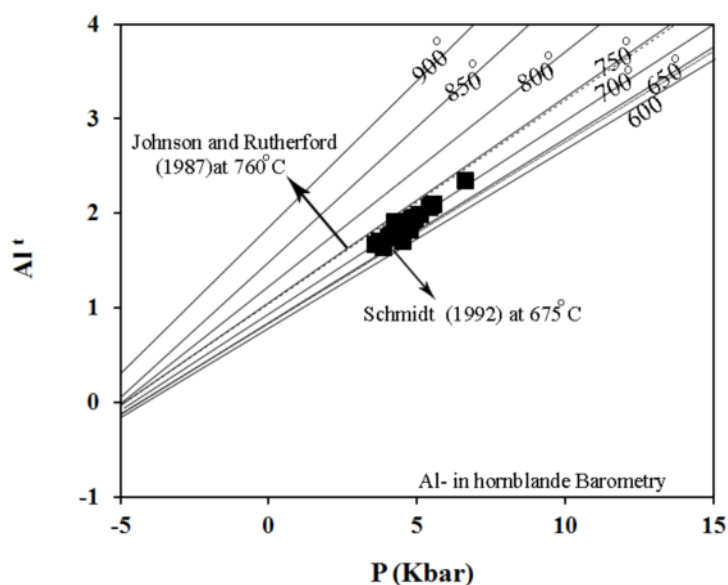
با توجه به مقادیر  $Al^{IV}$  نسبت به مقادیر فشار [۱۹]، گستره



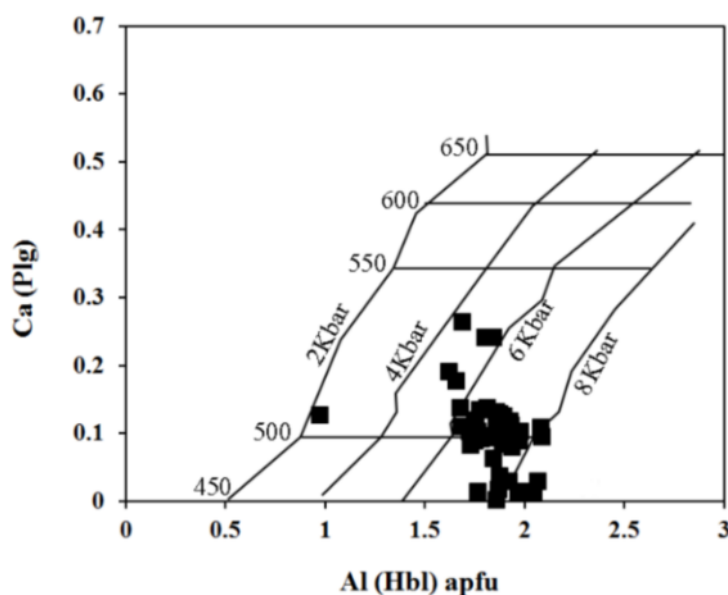
شکل 6 الف) همخوانی خطی  $Al^{IV}$  کل و  $Al^{IV}$  در آمفیبول‌های مورد بررسی. ب) تعیین گستره فشار تشکیل آمفیبولیت‌ها بر اساس نمودار مرجع [۱۸].

#### جدول ۳ محاسبه فشار تشکیل بلورهای آمفیبول در توده‌های آمفیبولیتی معدن گل‌گهر.

| فشار (کیلوبار) |             |            |                                        |
|----------------|-------------|------------|----------------------------------------|
| میانگین (kb)   | بیشینه (kb) | کمینه (kb) | براساس روش مقدار آلومینیوم در هورنبلند |
| ۵،۸۸           | ۸،۱۱        | ۴،۷۳       | [۱۸]                                   |
| ۴،۶۵           | ۶،۶۷        | ۳،۶۲       | [۱۹]                                   |
| ۵،۴۷           | ۷،۸۴        | ۴،۲۶       | [۱۶]                                   |
| ۵،۵۹           | ۸،۴۲        | ۴،۴۱       | [۹]                                    |
| ۴،۴۴           | ۶،۴۳        | ۳،۴۲       | [۱۰]                                   |



شکل ۷ گستره دمایی تبلور آمفیبول‌های مورد بررسی بر اساس نمودار مقادیر  $Al^{IV}$  نسبت به مقادیر فشار [۱۹].



شکل ۸ دما- فشار سنجی هورنبلند- پلاژیوکلاز برای تعیین گستره دما- فشار آمفیبولیت‌ها [۲۱].

#### برداشت

آمفیبولیت‌های منطقه معدنی گل‌گهر از نوع ارتوآمفیبولیت هستند و از نظر کانی‌شناسی در دو گروه آمفیبولیت و بیوتیت آمفیبولیت جای می‌گیرند. روابط واکنشی چون کلریتی‌شدن و اپیدوتی‌شدن کانی‌های بیوتیت و آمفیبول در آمفیبولیت‌ها گویای رخداد دگرگونی پسروده در حد رخساره اپیدوت-آمفیبولیت در منطقه مورد بررسی هستند. براساس نتایج

بررسی شیمی کانی‌ها، آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌های منطقه شامل دو گروه کلسیمی، از نوع مگنزیوهورنبلند و پاراگاسیت و سدیمی-کلسیمی، از نوع وینچیت هستند. تغییر و افزایش پیشرونده مقدار سیلسیم از مرکز تا لبه در آمفیبول‌های کلسیمی، بیانگر کاهش دما طی رشد این بلورها از مرکز به لبه است. با بررسی‌های دما-فشار سنجی، دمای حدود ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۳ تا ۷ کیلو بار برای آمفیبولیت‌های

*empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons*", American Mineralogist 72 (1987) 231-239.

[10] Johnson M.C., Rutherford M.J., "Experimentally calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks", Geology 17 (1989) 837-841.

[11] Poli S, Schmidt M.W., "A comment on "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 111 (1992) 273-278.

[12] Laird J., Lanphere A. and Albee A.L., "Distribution of Ordovician and Devonian metamorphism in mafic and pelitic schists from Vermont". American Journal of Science, 284 (1984) 376-416.

[13] Brown E.H., "The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism". Journal of Petrology, 18 (1977) 376-416.

[14] Fleet M.E., Barnett R.L., "Al<sub>IV</sub>/Al<sub>VI</sub> partitioning in calciferous amphiboles from the Frood mine, Sudbury, Ontario", Canadian Mineralogist 16 (1978) 527-532.

[15] Rasse P., "Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temperature of regional metamorphism", Contributions to Mineralogy and Petrology 45 (1974) 231-236.

[16] Hammarstrom J.M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", American Mineralogist 71 (1986) 1297-1331.

[17] Féménias O., Mercier G.C., Nkono C., Diot H., Berza T., Tatu M., Demaiffe D., "Calcic amphibole growth and compositions in calcalkaline magmas: Evidence from the Motru Dike Swarm (Southern Carpathians, Romania)", American Mineralogist 91 (2006) 73-81.

[18] Schmidt M.W., "Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al in hornblende barometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 110 (1992) 304-310.

[19] Anderson J. L., Smith D. R., "The effects of temperature and fO<sub>2</sub> on the Al-in-hornblende barometer", American Mineralogist 80 (1995) 549-59.

منطقه بدست آمد که بر این اساس، نوع دگرگونی این سنگ‌ها از نوع فشار متوسط بوده و سنگ مادر آمفیبولیت‌ها تا رخساره آمفیبولیت دگرگون شده است.

#### قدردانی

از مدیریت محترم و پژوهشگران پژوهشکده سنگ آهن و فولاد گل‌گهر، به ویژه آقای مهندس امیری، که نهایت همکاری در ارتباط با حضور در منطقه و نمونه‌برداری را با ما داشتند و همچنین آقای دکتر بهرام بهرام‌بیگی صمیمانه تشکر می‌نمائیم.

#### مراجع

[1] Darvishzadeh A., "Geology of Iran", Tehran Amirkabir publication (in persian) (2003).

[2] Darvishzadeh A., "Metamorphic petrology", Tehran Payam-e-noor publication (in persian) (2010).

[3] Sabzehei M. and Watters M., "Preliminary report on the geology and petrography of the metamorphic and igneous rocks of central part of Neiriz.", Geological Survey of Iran (1970).

[4] Sabzehei M., "GolGohar geological map 1:100000", Geological survey of Iran, Tehran (1997).

[5] Ghafouri L., Moeinzadeh H., "Investigation of mineral chemistry and causes of tourmaline formation in biotite amphibolites of Gol-e-Gohar mining and industrial area (Sirjan), Kerman province" Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy. 29 (2021) 455-462.

[6] Ghafouri L., "Petrography, mineral chemistry and petrogenesis of Amphibolites in Gol Gohar mining and industrial area (Sirjan), Kerman province" Kerman Shahid Bahonar university. Master thesis. (Persian) (2018).

[7] Hawthorne F.C., Oberti R., Harlow G.V., Maresch W. F., Martin R. C., Schumacher J. D., Welch M., "Nomenclature of the amphibole supergroup", American Mineralogist 97 (2012) 2031-2048.

[8] Ernst W.G., Liu J., "Experimental phase equilibrium study of Al-and Ti-contents of calcic amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometer", American Mineralogist 83 (1998) 952-969.

[9] Hollister L.S., Grissom G.E., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V. R., "Confirmation of the

[21] Plyusnina L.P., "*Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages*", Contributions to Mineralogy and Petrology 80 (1982) 140-146.

[20] Holland T.J.B., Blundy J.D., (1994). "*Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole plagioclase thermometry*", Contributions to Mineralogy and Petrology 116 (1994) 433-447.