



## شیمی کانی‌ها و زمین شیمی آمفیبولیت‌های شمال شرق درود (استان لرستان)

احمد احمدی خلجی\*، محمد صفرزاده، زهرا طهماسبی، فرزانه سپه‌وند، رضا زارعی سهامیه

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

(دریافت مقاله: ۹۵/۲/۱۵، نسخه نهایی: ۹۵/۵/۱۲)

**چکیده:** آمفیبولیت‌های شمال شرق درود به سن تریاس فوقانی که جزئی از منطقه‌ی سنندج-سیرجان محسوب می‌شوند با میکاشیست، مرمر و متادولومیت همراهند. این سنگ‌ها به رنگ سبز تیره و حاوی کانی‌های هورنبلند، پلاژیوکلاز، آکتینولیت، ترمولیت و اپیدوت هستند که کانی‌های تیره و روشن به صورت جدا از هم در آنها دیده می‌شوند. بر اساس آنالیزهای ژئوشیمیایی سنگ کل، این سنگ‌ها شبه‌قلیایی، دارای روند تولیتی و خاستگاه بازالتی هستند. آمفیبولیت‌های منطقه از نوع ارتوآمفیبولیت هستند. بر اساس نمودارهای تمایز محیط زمین‌ساختی، پروتولیت سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه در شرایط پوسته‌ی اقیانوسی و در محیط تکتونوماگمایی درون ورقه‌ای شکل گرفته است. در این آمفیبولیت‌ها، آمفیبول‌ها کلسیک و از نوع ترمولیت-آکتینولیت، منیزیهورنبلند و پارگازیت و پلاژیوکلازها در گستره‌ی آندزین-اولیگوکلاز تا لابرادوریت دیده می‌شوند. برآورد دما و فشار تبلور کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول براساس کاربرد روابط دما-فشارسنجی با استفاده از زوج کانی‌های هم‌زیست هورنبلند-پلاژیوکلاز گستره‌ی دمایی بین ۵۸۸ تا ۸۱۹ با میانگین ۷۰۴ درجه‌ی سانتی گراد و فشار ۲ تا ۶ کیلو بار برای این کانی‌ها مشخص می‌کند.

**واژه‌های کلیدی:** درود؛ پروتولیت؛ ارتوآمفیبولیت؛ آکتینولیت؛ منیزیهورنبلند؛ پارگازیت.

### مقدمه

منطقه‌ی مورد بررسی بین طول‌های جغرافیایی ۲' ۴۹° تا ۱۵' ۴۹° و عرض‌های جغرافیایی ۳۲' ۳۳° تا ۳۹' ۳۳° در شمال-شرق شهرستان درود استان لرستان قرار دارد که از نظر موقعیت زمین‌شناسی در جنوب‌غربی برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ شازند و جزئی از منطقه‌ی سنندج-سیرجان است (شکل ۱).

در این منطقه مجموعه سنگ‌هایی تحت‌عنوان آمفیبولیت وابسته به تریاس فوقانی دیده می‌شود که در برخی موارد با میکاشیست، مرمر و متادولومیت همراهی می‌شوند. این آمفیبولیت‌ها کمتر مورد توجه قرار گرفته‌اند بطوریکه صرفاً [۱-۳] به‌وجود این آمفیبولیت‌ها در منطقه اشاره کرده‌اند. این آمفیبولیت‌ها در نقشه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ شازند [۱] به عنوان پاراآمفیبولیت معرفی شده‌اند در حالی که [۴] این سنگ‌ها را بخشی از همبافت ژان و محصول دگرگونی سنگ‌های آذرین می‌داند و انواع دگرشکلی موجود در آنها را مورد بررسی قرار داده است. همچنین [۵] نیز بر خاستگاه آذرین آنها تاکید

می‌کنند و آنها را تحت عنوان واحد آمفیبولیتی شامل آمفیبولیت‌ها و متاگابروهای معرفی می‌کنند که با ریف پالئوزوئیک فوقانی تا مزوزوئیک وابسته بوده و یا بخشی از دنباله‌ی افیولیتی E مورب هستند.

براساس نقشه‌ی زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ منطقه [۱]، کهن‌ترین واحد سنگی که در گستره‌ی برگه شازند رخنمون دارد سنگ‌های کربناتی دگرگون شده حاوی فسیل کرینئید و فوزولینیده به سن پرمین است. به‌دلیل شدت دگرریختی، باز-سازی ردیف سنگ نهشته‌های یک واحد سنگی و شناخت بخش‌های زیرین و بالایی آن تا اندازه‌ای دشوار می‌شود ولی با همی این پیچیدگی‌ها به‌نظر می‌رسد ماسه‌سنگ‌های کوارتز-آرنایت ریزدانه با درون لایه‌هایی از رسوب‌های پلیتی، فیلیتی شده و درون لایه‌های سنگ‌های آتشفشانی دگرگون شده (TR<sup>s</sup>) واحد زیرین ردیف رسوبی تریاس پسین را تشکیل می‌دهند که روی آن به‌صورت پیوسته و هم‌شیب واحد سنگ‌های آهکی دولومیتی و دولومیت بلورین دگرگونه که حالت

\*نویسنده مسئول، تلفن: ۰۶۶۳۳۱۲۰۶۲۰، نمابر: ۰۶۶۳۳۱۲۰۶۱۸، پست الکترونیکی: ahmadikhalaj.a@lu.ac.ir

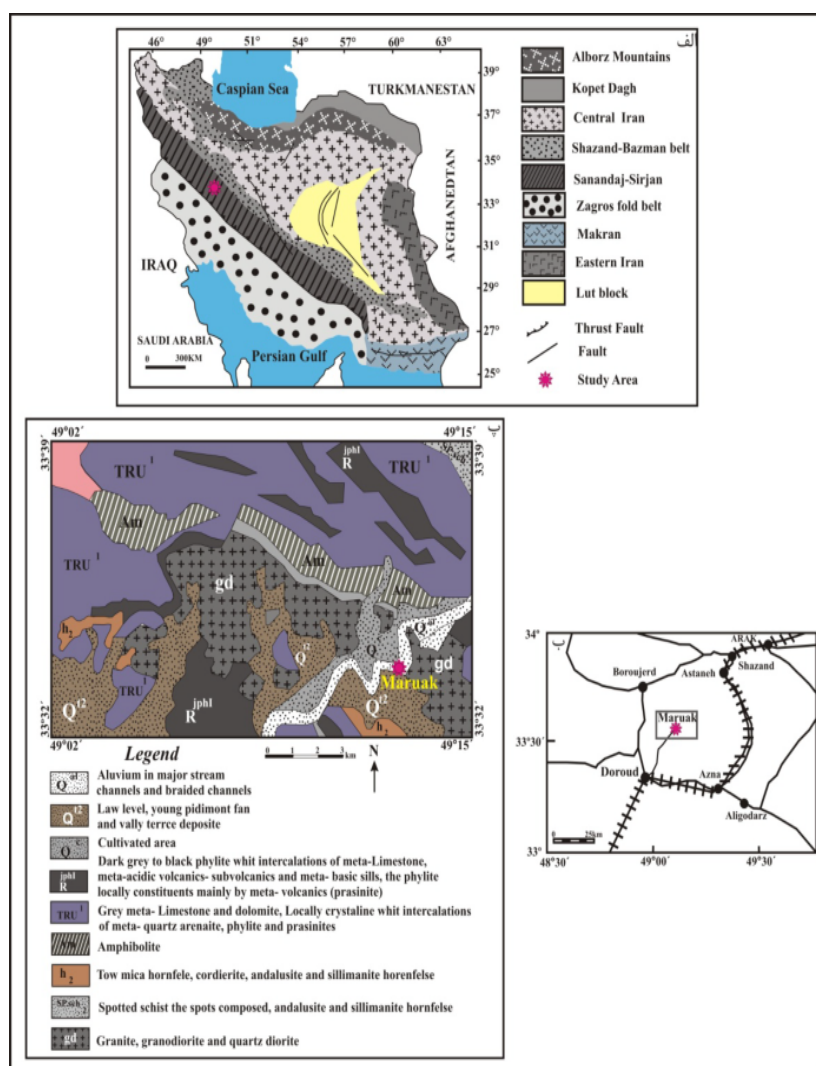
گرفتند و برای بررسی دقیق کانی‌ها و شناخت ترکیب شیمیایی و ویژگی‌های دیگر کانی‌شناسی، کانی‌های شاخص سنگ‌های آمفیبولیتی که شامل پلاژیوکلاز و گروه آمفیبول بودند، ۳۰ نقطه از کانی‌های آمفیبول و ۲۰ نقطه از کانی‌های پلاژیوکلاز با استفاده از روش EPMA در آزمایشگاه مرکزی تحقیقات فرآوری مواد معدنی ایران با استفاده از یک ریزپردازنده-SX100 CAMECA با ولتاژ شتاب‌دهنده ۱۵KV و شدت جریان ۲۰nA مورد بررسی قرار گرفتند که در اینجا نتایج حاصل از آن‌ها ارائه شده‌اند [۶]. پس از بررسی‌های کانی-شناسی مقاطع نازک نیز ۷ نمونه از سنگ‌های منطقه را برای تعیین خاستگاه و نیز رده‌بندی ژئوشیمیایی نمونه‌ها با استفاده از روش ICP-MS به آزمایشگاه ACMELAB کانادا ارسال شدند که نتایج در جدول ۱ آمده‌اند.

کالک‌شیت دارند، قرارداد. روی نهشته‌های تریاس پسین و به‌طور پیوسته و تدریجی شیت پلیتی تیره و سیاه رنگی وجود دارد که ادامه‌ی شیت‌های سیاه رنگ همدان است. درجه‌ی دگرگونی در این شیت‌ها در حد رخساره شیت‌سبز است.

با توجه به اینکه در مورد آمفیبولیت‌های منطقه تاکنون بررسی گسترده و علمی صورت نگرفته است، لذا طی این بررسی سرشتی‌های سنگ‌نگاری کانی، ژئوشیمیایی، تعیین سنگ خاستگاه و موقعیت زمین‌ساختی آمفیبولیت‌ها پرداخته می‌شود.

### روش کار

طی بازدیدهای صحرایی، تعداد ۵۰ نمونه‌ی سنگی از بخش‌های مختلف گستره‌ی مورد بررسی برداشت شدند. سپس ۳۰ مقطع نازک تهیه شدند و با میکروسکوپ قطبشی مورد بررسی قرار-



شکل ۱ الف: موقعیت منطقه‌ی مورد بررسی و مناطق زمین‌ساختاری ایران [۷]، ب: موقعیت جغرافیایی منطقه‌ی مورد بررسی و راه‌های دسترسی به آن، پ: نقشه ساده شده‌ی از منطقه‌ی مورد بررسی برگرفته از برگه‌ی ۱:۱۰۰۰۰۰ شازند تهیه شده توسط [۱].

جدول ۱ نتایج تجزیه‌ی شیمیایی عناصر اصلی به روش ICP-MS، اکسیدهای عناصر اصلی بر حسب درصد و عناصر کمیاب و خاکی نادر بر اساس می‌باشد.

| Symbole                            | MS1-B | MS1-F | MS1-J | MS-2  | MS3-5 | MS3-12 | MS-4  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
| SiO <sub>2</sub>                   | ۴۴,۴۹ | ۴۸,۷۷ | ۵۰,۴۸ | ۴۴,۸۱ | ۴۶,۷۶ | ۴۶,۰۱  | ۴۴,۱۵ |
| TiO <sub>2</sub>                   | ۲,۴۳۷ | ۱,۸۷۹ | ۱,۷۷۹ | ۲,۵۳۴ | ۱,۱۱۹ | ۱,۰۴۶  | ۱,۶۹  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>     | ۱۶,۱۷ | ۱۵,۰۲ | ۱۴,۰۳ | ۱۳,۱۷ | ۱۲,۵۵ | ۱۳,۵۱  | ۱۲,۴۱ |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (T) | ۱۳,۴۳ | ۱۱,۲۴ | ۱۲,۵۷ | ۱۵,۵۹ | ۱۱,۶۷ | ۱۱,۱   | ۱۴,۵۶ |
| MnO                                | ۰,۴۲۵ | ۰,۱۷۸ | ۰,۱۸۳ | ۰,۱۲۳ | ۰,۱۸۷ | ۰,۲    | ۰,۲۲۶ |
| MgO                                | ۳,۹۷  | ۷,۷۱  | ۶,۸   | ۲,۳۶  | ۸,۸۹  | ۱۰,۲۸  | ۱۲,۹۸ |
| CaO                                | ۱۱,۶۹ | ۱۱,۰۶ | ۹,۳۵  | ۱۵,۰۷ | ۱۳,۵۱ | ۱۴,۴۷  | ۹,۴۹  |
| Na <sub>2</sub> O                  | ۱,۷۵  | ۲,۶۸  | ۳,۵۵  | ۱,۴۲  | ۲,۷۸  | ۱,۷۴   | ۰,۳۹  |
| K <sub>2</sub> O                   | ۳,۵۹  | ۰,۶۴  | ۰,۶۱  | ۱,۹۲  | ۰,۱   | ۰,۱۶   | ۰,۲۱  |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>      | ۰,۶۵  | ۰,۲۳  | ۰,۲۴  | ۰,۱۹  | ۰,۱۹  | ۰,۱۶   | ۰,۲۶  |
| LOI                                | ۱,۷۴  | ۱,۳۹  | ۱,۲۷  | ۲,۱۴  | ۳,۱۶  | ۲,۲۹   | ۴,۲۹  |
| Total                              | ۱۰۰,۳ | ۱۰۰,۸ | ۱۰۰,۹ | ۹۹,۳۴ | ۱۰۰,۹ | ۱۰۰,۱  | ۱۰۰,۷ |
| Ba                                 | ۹۵۵   | ۶۸    | ۶۰    | ۶۴۱   | ۱۳۸   | ۱۰۰    | ۵۸    |
| Co                                 | ۲۵    | ۳۹    | ۳۶    | ۳۲    | ۴۸    | ۵۰     | ۷۰    |
| Sc                                 | ۲۱    | ۳۴    | ۳۶    | ۲۳    | ۵۶    | ۵۷     | ۲۷    |
| Cs                                 | ۱,۳   | ۰,۵   | ۰,۵   | ۳,۴   | ۱,۱   | ۰,۵    | ۰,۵   |
| Ga                                 | ۲۸    | ۱۸    | ۱۹    | ۲۳    | ۱۷    | ۱۶     | ۱۸    |
| Hf                                 | ۵,۳   | ۳     | ۳,۲   | ۳,۳   | ۲,۴   | ۲,۳    | ۲,۹   |
| Nb                                 | ۵۴    | ۱۷    | ۱۳    | ۲۴    | ۱۲    | ۱۴     | ۲۰    |
| Rb                                 | ۱۰۰   | ۱۲    | ۱۴    | ۶۲    | ۲     | ۷      | ۱۲    |
| Sr                                 | ۲۴۲   | ۳۶۷   | ۳۳۶   | ۲۵۶   | ۸۸۶   | ۴۴۸    | ۱۵۵   |
| Ta                                 | ۳,۶   | ۱,۱   | ۰,۸   | ۱,۵   | ۰,۹   | ۱,۱    | ۱,۴   |
| Th                                 | ۳,۹   | ۱,۳   | ۱,۲   | ۲,۴   | ۲,۱   | ۲,۲    | ۲,۱   |
| U                                  | ۱     | ۰,۴   | ۰,۴   | ۱,۸   | ۰,۵   | ۰,۵    | ۰,۵   |
| V                                  | ۲۰,۵  | ۳۰,۳  | ۳۱۹   | ۲۹۶   | ۲۹۶   | ۲۵۰    | ۲۴۰   |
| W                                  | ۳     | ۱     | ۱     | ۲     | ۱     | ۱      | ۱     |
| Zr                                 | ۲۱۶   | ۱۱۹   | ۱۲۵   | ۱۲۳   | ۹۵    | ۹۹     | ۱۰۷   |
| Y                                  | ۲۷    | ۲۰    | ۳۰    | ۲۱    | ۱۶    | ۱۵     | ۱۶    |
| La                                 | ۳۷,۹  | ۱۳,۶  | ۱۱,۹  | ۱۳,۲  | ۱۳,۳  | ۱۲,۱   | ۱۸,۶  |
| Ce                                 | ۷۴,۴  | ۳۰,۱  | ۲۷,۲  | ۲۷,۱  | ۲۵,۲  | ۲۳,۱   | ۳۷    |
| Pr                                 | ۹,۶۴  | ۴,۱۱  | ۳,۸۱  | ۳,۵۲  | ۳,۱   | ۲,۷۷   | ۴,۶۸  |
| Nd                                 | ۳۹,۸  | ۱۷,۶  | ۱۷,۷  | ۱۵,۲  | ۱۳,۴  | ۱۲,۲   | ۱۹,۸  |
| Sm                                 | ۸,۲   | ۴,۳   | ۴,۹   | ۴     | ۳,۱   | ۳      | ۴,۵   |
| Eu                                 | ۲,۴۳  | ۱,۴۷  | ۱,۶۸  | ۱,۶۴  | ۱,۱۴  | ۱,۰۹   | ۱,۱۹  |
| Gd                                 | ۷,۵   | ۴,۷   | ۵,۵   | ۴,۸   | ۳,۵   | ۳,۲    | ۴,۴   |
| Tb                                 | ۱,۱   | ۰,۷   | ۱     | ۰,۸   | ۰,۶   | ۰,۶    | ۰,۷   |
| Dy                                 | ۶,۳   | ۴,۴   | ۶     | ۵     | ۳,۵   | ۳,۳    | ۳,۶   |
| Ho                                 | ۱,۲   | ۰,۸   | ۱,۲   | ۱     | ۰,۷   | ۰,۶    | ۰,۷   |
| Er                                 | ۳,۳   | ۲,۴   | ۳,۵   | ۲,۶   | ۱,۹   | ۱,۸    | ۱,۹   |
| Tm                                 | ۰,۴۷  | ۰,۳۳  | ۰,۵۲  | ۰,۳۸  | ۰,۲۷  | ۰,۲۶   | ۰,۲۶  |
| Yb                                 | ۲,۹   | ۲,۲   | ۳,۴   | ۲,۴   | ۱,۷   | ۱,۷    | ۱,۷   |
| Lu                                 | ۰,۴۷  | ۰,۳۵  | ۰,۵۳  | ۰,۳۸  | ۰,۲۷  | ۰,۲۹   | ۰,۲۷  |
| Cu                                 | ۲۰    | ۷۰    | ۱۰۰   | ۳۰    | ۱۹۰   | ۱۰۰    | ۴۰    |
| Pb                                 | ۱۱    | ۵     | ۵     | ۷     | ۸     | ۹      | ۷     |
| Zn                                 | ۲۳۰   | ۸۰    | ۸۰    | ۱۴۰   | ۹۰    | ۸۰     | ۱۳۰   |
| Ni                                 | ۳۰    | ۸۰    | ۳۰    | ۵۰    | ۸۰    | ۱۶۰    | ۳۷۰   |
| Cr                                 | ۱۶۰   | ۲۰۰   | ۷۰    | ۸۰    | ۱۲۰   | ۶۹۰    | ۳۵۰   |
| Ag                                 | ۲,۶   | ۱,۳   | ۱,۵   | ۱,۶   | ۱,۳   | ۱,۴    | ۱,۳   |
| Sn                                 | ۱۲    | ۷     | ۵     | ۱۲    | ۷     | ۶      | ۹     |
| Tl                                 | ۰,۵   | ۰,۲   | ۰,۱   | ۰,۳   | ۰,۱   | ۰,۱    | ۰,۱   |
| Ge                                 | ۳     | ۲     | ۲     | ۲     | ۲     | ۲      | ۲     |
| Bi                                 | ۰,۴   | ۰,۴   | ۰,۴   | ۰,۴   | ۰,۴   | ۰,۴    | ۰,۴   |

## سنگ شناسی

آمفیبولیت‌های منطقه‌ی مورد بررسی در نمونه‌دستی به رنگ سبز تیره تا خاکستری دیده می‌شوند و جهت یافتگی روشنی از خود نشان می‌دهند که در اثر فشارهای جهت‌دار در اثر دگرگونی ناحیه‌ای در مقیاس بزرگ در منطقه به‌وجود آمده است. در بخش‌هایی از منطقه‌ی مورد بررسی، در اثر پدیده‌ی جدایی حاصل از دگرگونی، کانی‌های تیره و روشن از یکدیگر تفکیک شدند و نوارهای تیره و روشن را می‌توان به خوبی مشاهده کرد (شکل ۲ الف). در این بررسی لایه‌های تیره معمولاً از کانی‌های آمفیبول و مخصوصاً هورنبلندهای سبز تشکیل شده‌اند و لایه‌های روشن معمولاً از کانی‌های روشن مانند کوارتز و پلاژیوکلاز تشکیل شده‌اند (شکل ۲ ب و پ). در این نمونه‌ها هیچ‌گونه آثاری از بافت و یا ساخت اولیه‌ی سنگ مادر خاستگاه مشاهده نمی‌شود و دارای بافت نامتوبلاستیک است. همچنین آثاری از دگرسانی نه در درون کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول و نه در حاشیه‌ی آنها مشاهده نمی‌شوند. علاوه‌براین، به نظر می‌رسد که در این منطقه برخی از نمونه‌ها شیست‌های سبزی هستند که تا مرحله‌ی آغازین رخساره‌ی آمفیبولیت دگرگون شده‌اند و تنوع کانی‌شناسی بیشتری دیده می‌شوند و هنوز بقایایی از کانی‌های اپیدوت و کلریت را که کانی‌های شاخص رخساره‌ی شیست‌سبز هستند که در کنار کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز دیده می‌شوند. در سمت شمال غرب دریاچه‌ی سد مروک، توده‌های بسیار بزرگی از سنگ‌های آمفیبولیتی مشاهده می‌شوند که دارای تفاوت‌های ظاهری با سنگ‌های دیگر برداشت شده قبلی دارند. این سنگ‌ها دارای آمفیبول‌های فراوان و بسیار درشت هستند که می‌توان با چشم غیر مسلح دیده می‌شوند (شکل ۲ ت و ث). براساس نتایج بررسی‌های ریزپردازشی الکترونی که روی کانی‌های آمفیبول این ناحیه صورت گرفته، مشخص شده که کانی‌های آمفیبول در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار دارند و این کانی‌های زیر رده‌ی اکتینولیت، اکتینولیت - هورنبلند تا منیزو - هورنبلند قرار می‌گیرند (شکل ۲ ج تا خ). در برخی از نقاط نمونه‌های برداشت شده، بیشتر از کانی‌های ترمولیت و اکتینولیت تشکیل شده‌اند و این کانی‌ها به صورت گروه‌های شعاعی نمایان می‌شوند. البته باید به این نکته نیز اشاره کرد که نمونه‌های دارای ترمولیت و اکتینولیت، به‌صورت درهم و پراکنده در کنار سنگ‌های آهکی وجود دارند و شاید در دسترس بودن کلسیم فراوان و در نتیجه دگرنهادی در اثر هم‌نشینی با این سنگ‌های کربناتی باعث به‌وجود آمدن کانی‌های ترمولیت و اکتینولیت شده است.

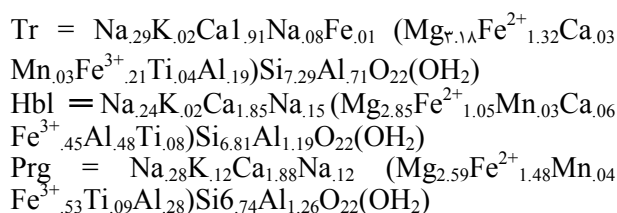
## شیمی کانی

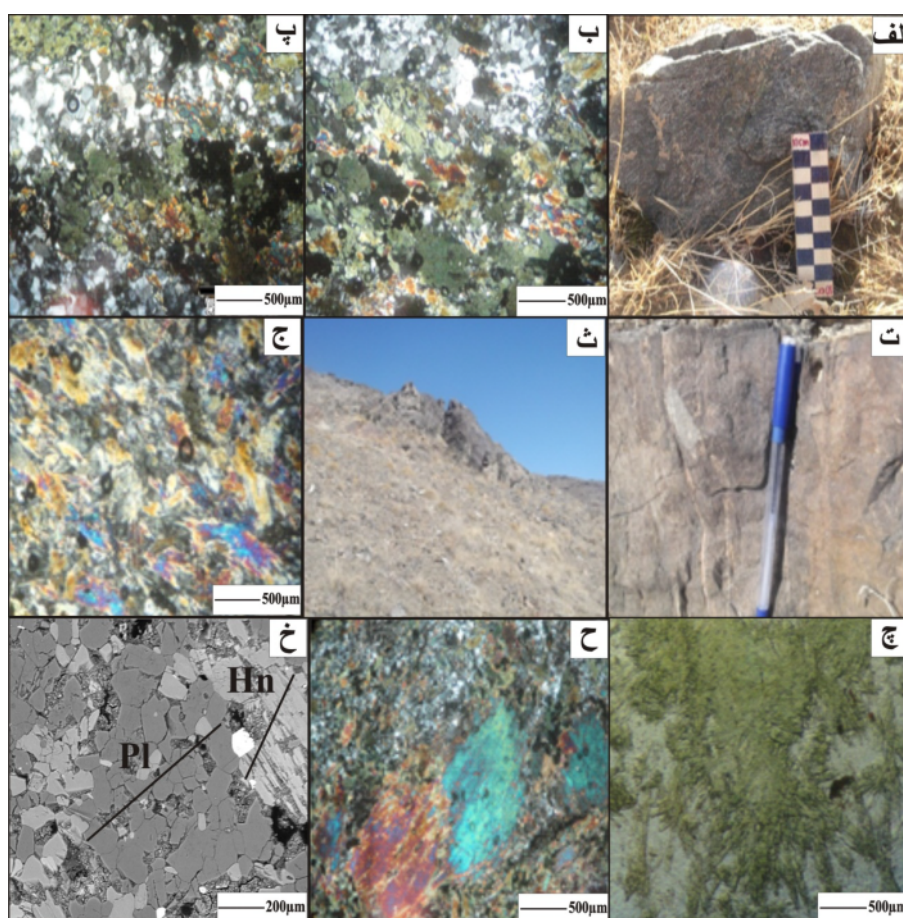
**آمفیبول:** از آنجا که کانی‌های آمفیبول گروه بزرگی از کانی‌ها را تشکیل می‌دهند و یکی از مهمترین کانی‌های تشکیل‌دهنده‌ی سنگ‌های آمفیبولیتی هستند، و با توجه به اهمیتی که این کانی‌ها در بررسی و شناخت مسائل زمین‌شناسی ازجمله تعیین دما و فشار تشکیل این کانی‌ها در توده‌هایی که این کانی‌ها در آنها وجود دارند، این پژوهش براساس نتایج ریز پردازش الکترونی به شناسایی ویژگی‌های این کانی‌ها پرداخته شده است و نتایج محاسبه‌ی فرمول ساختاری آن‌ها بنابر فرمول استاندارد [۸] آمفیبول  $AB_2C_5^{IV}T_8O_{22}(OH)_2$  برپایه‌ی ۲۳ اکسیژن و ۱۵ کاتیون در موقعیت چهاروجهی و هشت وجهی است. براساس نمودار  $TiO_2$  نسبت به  $Na_2O$ ،  $K_2O$ ،  $Al_2O_3$ ،  $MgO$  و  $Na_2O/K_2O$  ماهیت ماگما تمایل به نیمه‌قلیایی دارد [۹] (شکل ۳).

براساس رده‌بندی [۸] ترکیب آمفیبول‌های مورد بررسی در گروه آمفیبول‌های کلسیک و در زیرگروه اکتینولیت، اکتینولیت هورنبلند تا منیزو هورنبلند قرار می‌گیرند (شکل ۴ الف و ب).

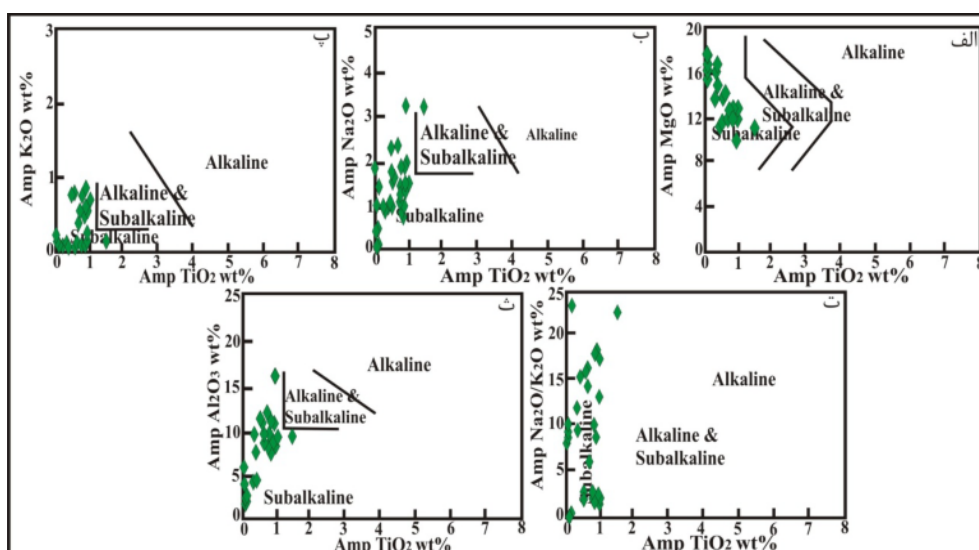
بر اساس رده‌بندی جدیدتری که توسط [۱۰] برای کانی‌های آمفیبول ارائه شده است و با توجه به کاتیون‌هایی که در جایگاه‌های C و A واحد فرمولی آمفیبول‌ها قرار می‌گیرند آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه از نوع کلسیک ( $BCa/B(Ca+Na) \geq 0.75$ ) و در زیر رده‌ی ترمولیت، منیزو-هورنبلند و پارگازیت قرار می‌گیرند (شکل ۴ پ).

آمفیبول‌های موجود در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه با داشتن نسبت زیر که سرشتی آمفیبول‌های کلسیک است در این گروه قرار می‌گیرند  $B(Ca + \Sigma M^{2+})/\Sigma B \geq 0.75$ ،  $BCa/\Sigma B \geq B\Sigma M^{2+}/\Sigma B$ ،  $\Sigma B = BLi + BNa$  و  $B\Sigma M^{2+} = BMg + BFe^{2+} + BMn^{2+} + Bca$  + پیروی می‌کند. برای آمفیبول‌های مورد بررسی براساس فرمول شیمیایی و نتیجه‌ی بررسی ریزپردازشی الکترونی آنها، می‌توان ترکیب میانگین زیر را در نظر گرفت که این مقدار برای این کانی‌ها به‌ترتیب برابر است با:

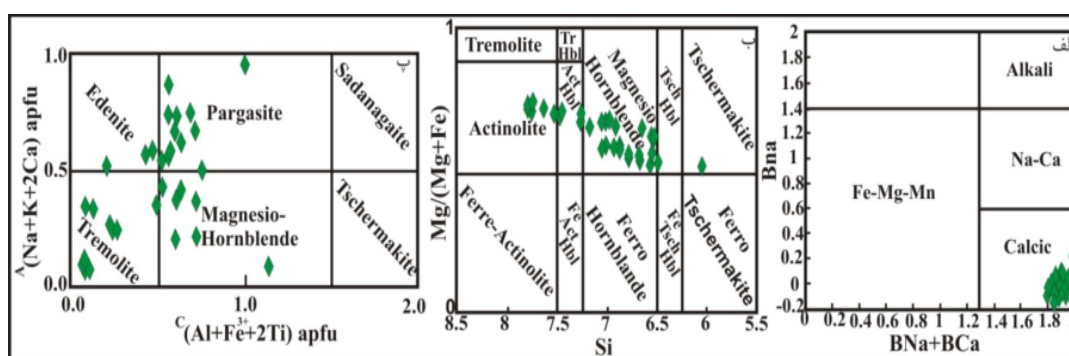




شکل ۲ الف: تصویری نزدیک از سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه، ب و پ: تصاویر مقاطع میکروسکوپی آمفیبولیت‌های منطقه که در آن تناوب لایه‌های روشن و تیره به خوبی نمایان می‌باشد، ت و ث: تصاویری از سنگ‌های آمفیبولیت در سمت شمال غرب حاشیه دریاچه سد مروک، ج تا ح: تصاویری از مقاطع میکروسکوپی توده‌های آمفیبولیتی اطراف دریاچه‌ی سد مروک که بیشتر شامل کانی‌های اکتینولیت و منیزیت-هورنبلند می‌باشد، خ: تصویر BSE توده‌های آمفیبولیتی اطراف دریاچه سد مروک حاوی هورنبلند و پلاژیوکلاز.



شکل ۳ در نمودارهای  $\text{TiO}_2$  نسبت به (الف)  $\text{MgO}$ ، (ب)  $\text{Na}_2\text{O}$ ، (پ)  $\text{K}_2\text{O}$ ، (ت)  $\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$  و (ث)  $\text{Al}_2\text{O}_3$  حاصل از آنالیز آمفیبول‌ها ماهیت ماگما به نیمه‌قلیایی تمایل دارد [۹].



شکل ۴ الف وب: رده‌بندی آمفیبول‌های موجود در توده‌های آمفیبولیتی شمال شرق دورد براساس ترکیب شیمیایی آنها [۵]، پ: رده‌بندی آمفیبول‌های کلسیک [۱۰].

اکسیژن است [۱۳]. بنابراین باتوجه به مقادیر این عناصر می‌توان تا حدی به شرایط دما-فشار تشکیل این کانی طی دگرگونی پی‌برد. توزیع عناصر  $Al$  [۱۴-۱۹] و  $NaB$  [۲۰، ۲۱] در کانی آمفیبول تابع فشار بوده بنابراین از این عناصر می‌توان برای تعیین فشار دگرگونی استفاده کرد.

[۱۲] مرز بین آمفیبول‌های کلسیک فشار پایین و فشار بالا را به صورت  $Al^{IV}/Al^{VI}=2$  تعریف کرده‌اند که معادل با فشار ۵ کیلو بار تعیین شده توسط [۲۲] است. این نسبت در آمفیبول‌های موجود در نمونه‌های بررسی شده است و در نمودار  $Al^{IV}$  در برابر  $Al^{VI}$  در گستره‌ی فشار پایین قرار می‌گیرند (شکل ۵ ب) نسبت  $Na^B (=Na_{M4})$  در برابر  $Al^{VI} + Fe^{3+} + 2Ti + Cr$  [۲۰] نشان‌دهنده‌ی فشار پایین برای آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌ها است (شکل ۶ الف).

مقادیر فشار به‌دست آمده از این سنگ‌ها با توجه به فشار-سنج [۲۱] بر مبنای مقادیر  $Na_{M4}$  و  $Al^{IV}$  در کانی آمفیبول ۲ تا ۳ کیلو بار برای آمفیبولیت‌ها به‌دست آمده است (شکل ۶ ب). در گستره‌ی فشار پایین قرار گرفته‌اند [۲۰]، ب: نمودار  $Na_{M4}$  در برابر  $Al^{IV}$  کانی آمفیبول برای تعیین فشار دگرگونی [۲۱].

البته فشارسنج‌های دیگری نیز بر مبنای مقدار  $Al$  در کانی آمفیبول ارائه شده است. بررسی‌های تجربی نشان می‌دهند که ترکیب آمفیبول علاوه بر فشار به دما، گریزندگی اکسیژن، ترکیب کل و فازهای همزیست بستگی دارد [۱۳] به طوری که با افزایش دما و فشار آمفیبول‌های کلسیک با افزایش در نسبت  $Mg/(Mg+Fe)$  و مقادیر  $K$ ،  $Al$ ،  $Na$  و  $Ti$  و کاهش در  $Si$  و  $Fe+Mg+Mn+Ca$  همراهند [۲۳]. برای محاسبه‌ی شرایط فشار تبلور، بسیاری از پژوهشگران فشارسنج  $Al$  در آمفیبول بهره جسته‌اند [۱۷، ۲۴]. یک همخوانی خوبی بین  $Al$  کل و  $Al^{IV}$  آمفیبول‌های نمونه‌های منطقه‌ی مورد بررسی وجود دارد و کاملاً شبیه به مواردی است که توسط هاسترام و زن [۲۵]

### شناخت آمفیبول‌های آذرین از آمفیبول‌های دگرگون

آمفیبول‌های آذرین و دگرگون به‌پیروی از [۱۱] و براساس مجموع کاتیون‌های  $Na+K+Ca$  نسبت به  $Si$  از هم جدا می‌شوند، بنابراین رده‌بندی، اغلب نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی آمفیبول‌های آذرین قرار می‌گیرند و برخی از این آمفیبول‌ها که از نوع ترمولیت - اکتینولیت هستند در گستره‌ی حاصل از فرآیند دگرگونی قرار دارند (شکل ۵ الف). از طرف دیگر براساس نمودار  $Al^{IV}$  در برابر  $Al^{VI}$  که این نمودار هم جداکننده آمفیبول‌های کلسیک آذرین از آمفیبول‌های کلسیک دگرگونی است، آمفیبول‌های موجود در این سنگ‌ها جزء آمفیبول‌های کلسیک آذرین با فشار کم خاستگاه آذرین قرار می‌گیرند (شکل ۵ ب) [۱۲].

### دما و فشارسنج‌های قراردادی

آمفیبولیت‌های موجود در منطقه‌ی شمال شرقی دورد دارای ترکیب کانی‌شناسی بسیار ساده‌ای هستند و از این رو محاسبات دما-فشارسنجی دگرگونی در این سنگ‌ها با محدودیت همراه است. مهمترین کانی‌های موجود در این سنگ‌ها کانی‌های گروه آمفیبول و پلاژیوکلاز هستند، بنابراین بررسی‌ها معلوم شد که دما-فشارسنجی در این سنگ‌ها محدود به استفاده از این دو کانی است.

### دما-فشارسنجی با استفاده از شیمی آمفیبول

#### فشارسنجی

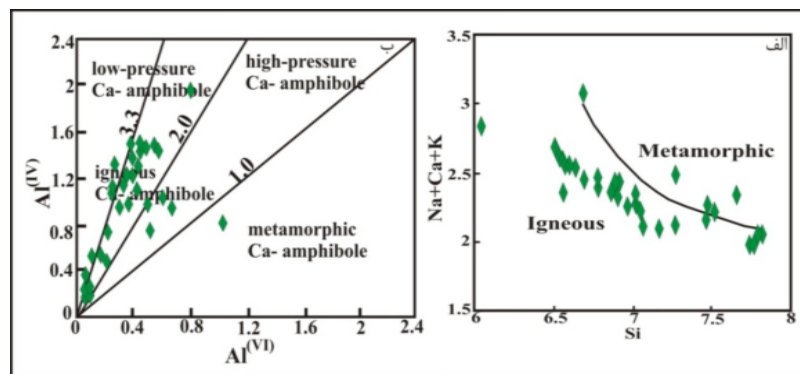
ترکیب شیمیایی کانی آمفیبول به‌صورت گسترده برای تعیین فشار سنگ‌های آذرین و دگرگونی به‌کار می‌رود. استفاده از ترکیب کانی آمفیبول یکی از متداول‌ترین روش‌های فشار-دما-سنجی در سنگ‌های متابازیتی است. در ترکیب کانی آمفیبول تمرکز و غلظت عناصر مختلف موجود در جایگاه‌های گوناگون بلورشناسی تابع عوامل مختلفی همچون دما، فشار و گریزندگی

در فشار پایین مقادیر به‌دست آمده گاهی کمتر (و حتی منفی) از میزان خطای فرمول فشارسنجی است.

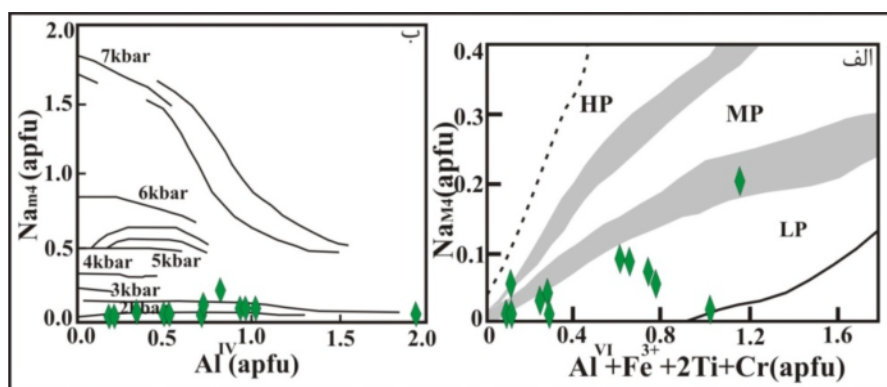
با استفاده از نمودار شکل ۷ ب که براساس مقادیر  $Al^I$  نسبت به  $Fe^{*}/Fe^{*}+Mg$  رسم شده است [۱۷]، می‌توان گستره‌ی فشاری در حدود کمتر از ۱ تا ۷ کیلو بار را برای تبلور آمفیبول‌ها در این منطقه برآورد کرد.

برای برآورد فشار تبلور آمفیبول‌های انتخابی از چهار روش مرسوم زمین‌شناختی، براساس محتوای  $Al$  موجود در هورنبلند استفاده شده است [۱۳-۱۷] و نتایج حاصل از محاسبه فشار تبلور آمفیبول‌ها، همراه با فرمول‌های جدول ۲ ارائه شده‌اند. در همه‌ی این روش‌ها، زمین فشارسنجی مستقل از دما بر مبنای مقدار آلومینیوم کل موجود در ترکیب هورنبلند ارائه شده است. با این وجود بسیاری از پژوهندگان، به‌رغم فراهم نبودن شرایط یاد شده به‌طور کامل از این روش‌ها برای محاسبه فشار دگرگونی استفاده کرده‌اند. بنابراین در این پژوهش نیز برای تعیین فشار دگرگونی از این روش‌ها استفاده شده است.

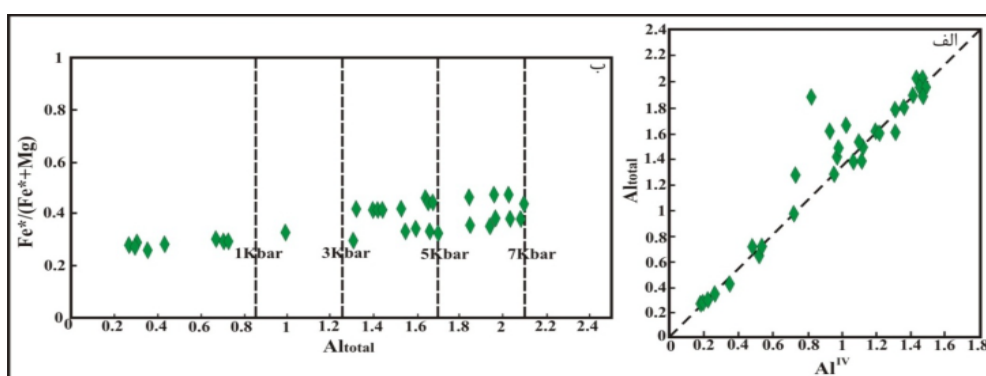
برای زمین فشارسنجی مورد استفاده قرار گرفته است (شکل ۷ الف). اگر چه استفاده از این فشارسنج‌ها نیاز به حضور شرایط خاصی در سنگ‌ها دارد که متأسفانه این شرایط در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه فراهم نیست که این شرایط عبارتند از اینکه کانی‌های کوارتز، فلدسپار قلیایی، پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، مگنتیت و ایلمنیت به‌صورت هم‌زیست حضور داشته باشند [۲۶، ۱۴] زیرا در این مجموعه کانی‌شناسی مقدار  $Al$  در هورنبلند را با توجه به مقدار فشار میانگیر می‌کند و در نتیجه مقدار  $Al$  موجود در هورنبلند مستقیماً فشار را نشان می‌دهد. هرچه مقدار  $Al$  موجود در آمفیبول بیشتر باشد مقدار محاسبه شده‌ی عمق بیشتر خواهد بود. ولی مقدار  $Al$  موجود در آمفیبول‌ها با شرایط محیط و مجموعه‌ای از عوامل یاد شده تغییر کرده و در نتیجه موجب خطا در فشار محاسبه شده می‌شود. در همه‌ی روش‌های برآورد فشار جز روش اندرسون و اشمیت [۲۷]، فقط از روی میزان آلومینیوم موجود در هورنبلند و بدون توجه به پارامترهای دیگری چون دما محاسبه می‌شود. بیشتر فشارسنجی‌های یادشده در فشارهای بالا کاربرد دارند و



شکل ۵ الف: جداسازی آمفیبول‌های حاصل از فرآیندهای آذرین و آمفیبول‌های دگرگونی به روش [۸]، ب: موقعیت نمونه‌های مورد بررسی روی نمودار  $Al^{IV}$  نسبت به  $Al^{VI}$  [۱۲] برای تعیین نوع آمفیبول‌های آذرین و دگرگونی.



شکل ۶ الف: نمودار مقادیر  $NaM_4$  در برابر  $Al^{VI}+Fe^{3+}+2Ti+Cr$  کانی آمفیبول، در این نمودار آمفیبول‌های موجود در آمفیبولیت‌ها در محدوده فشار پایین قرار گرفته‌اند [۲۰]، ب: نمودار  $NaM_4$  در برابر  $Al^{IV}$  کانی آمفیبول برای تعیین فشار دگرگونی [۲۱].



شکل ۷ الف: همخوانی خطی  $Al^{IV}$  و  $Al^I$  در آمفیبول‌های نمونه‌های مورد بررسی. ب: نمودار  $Al^I$  نسبت به  $XFe^*$  آمفیبول‌ها که گستره‌ی فشار تشکیل آمفیبولیت‌ها را نشان می‌دهد [۱۷].

جدول ۲ محاسبه‌ی فشار تشکیل بلورهای آمفیبول در توده‌های آمفیبولیتی منطقه‌ی شمال شرق دورود.

| sample    | روش ۱  | روش ۲  | روش ۳  | روش ۴  |
|-----------|--------|--------|--------|--------|
| ms3-12-1  | ۶,۱۱۹  | ۴,۹۸۲  | ۶,۴۹۰  | ۶,۴۹۶  |
| ms3-12-2  | ۳,۷۵۰  | ۲,۹۹۱  | ۴,۲۴۹  | ۳,۸۴۱  |
| ms3-12-3  | ۵,۸۶۷  | ۴,۷۷۱  | ۶,۲۵۲  | ۶,۲۱۴  |
| ms3-12-4  | ۵,۵۳۳  | ۴,۴۸۹  | ۵,۹۳۵  | ۵,۸۳۹  |
| ms3-12-5  | ۴,۹۷۴  | ۴,۰۲   | ۵,۴۰۷  | ۵,۲۱۳  |
| ms3-12-6  | ۴,۰۹۰  | ۳,۲۷۶  | ۴,۵۷۰  | ۴,۲۲۱  |
| ms3-12-7  | ۳,۵۲۹  | ۲,۸۰۵  | ۴,۰۴۰  | ۳,۵۹۳  |
| ms3-12-8  | ۴,۲۶۴  | ۳,۴۲۲  | ۴,۷۲۵  | ۴,۴۱۷  |
| ms3-12-9  | ۲,۳۵۱  | ۱,۸۱۳  | ۲,۹۲۴  | ۲,۲۷۱  |
| ms3-12-10 | ۵,۴۱۰  | ۴,۳۸۶  | ۵,۸۱۹  | ۵,۷۰۱  |
| msj-1     | ۲,۸۷۹  | ۲,۲۵۷  | ۳,۴۲۴  | ۲,۸۶۳  |
| msj-2     | ۵,۸۳۳  | ۴,۷۴۲  | ۶,۲۲۰  | ۶,۱۷۶  |
| msj-3     | ۵,۵۱۸  | ۴,۴۷۷  | ۵,۹۲۱  | ۵,۸۲۲  |
| msj-4     | ۴,۱۲۸  | ۳,۳۰۸  | ۴,۶۰۶  | ۴,۲۶۴  |
| msj-5     | ۴,۹۳۴  | ۳,۹۸۶  | ۵,۳۶۹  | ۵,۱۶۸  |
| msj-6     | ۴,۰۳۰  | ۳,۲۲۶  | ۴,۵۱۳  | ۴,۱۵۴  |
| msj-7     | ۲,۸۲۶  | ۲,۲۱۳  | ۳,۳۷۴  | ۲,۸۰۴  |
| msj-8     | ۳,۰۱۰  | ۲,۳۶۷  | ۳,۵۴۸  | ۳,۰۱۰  |
| msj-9     | ۳,۴۳۰  | ۲,۷۲۱  | ۳,۹۴۵  | ۳,۴۸۱  |
| msj-10    | ۲,۴۲۹  | ۱,۸۷۹  | ۲,۹۹۸  | ۲,۳۵۹  |
| ms3-5-1   | ۹,۹۶۵  | ۸,۲۱۶  | ۱۰,۱۲۹ | ۱۰,۸۰۸ |
| ms3-5-2   | -۰,۵۰۶ | -۰,۵۸۹ | ۰,۲۲۰  | -۰,۹۳۳ |
| ms3-5-3   | -۰,۴۵۳ | -۰,۵۴۵ | ۰,۲۷۱  | -۰,۸۷۳ |
| ms3-5-4   | -۰,۷۲۴ | -۰,۷۷۳ | ۰,۰۱۴  | -۱,۱۷۷ |
| ms3-5-5   | -۲,۲۳۴ | -۲,۰۴۲ | -۱,۴۱۵ | -۲,۸۷۰ |
| ms3-5-6   | ۰,۸۳۲  | ۰,۵۳۶  | ۱,۴۸۷  | ۰,۵۶۸  |
| ms3-5-7   | ۶,۱۷۴  | ۵,۰۲۹  | ۶,۵۴۳  | ۶,۵۵۹  |
| ms3-5-8   | -۲,۵۳۴ | -۲,۲۹۴ | -۱,۶۹۸ | -۳,۲۰۶ |
| ms3-5-9   | -۲,۴۷۱ | -۲,۲۴۱ | -۱,۶۳۸ | -۳,۱۳۵ |
| ms3-5-10  | -۲,۶۹۳ | -۲,۴۲۹ | -۱,۸۴۹ | -۳,۳۸۵ |
| ms3-5-11  | -۱,۸۷۶ | -۱,۷۴۱ | -۱,۰۷۵ | -۲,۴۶۸ |
| ms3-5-12  | ۴,۰۱۱  | ۳,۲۰۹  | ۴,۴۹۵  | ۴,۱۳۲  |

1.  $P (\pm 3 \text{Kbar}) = -3.92 + 5.03 \text{ Al (total)}$  [13]; 2.  $P (\pm 0.5 \text{ kbar}) = -3.46 + 4.23 \text{ Al (total)}$  [15]; 3.  $P (\pm 0.6 \text{ kbar}) = -3.01 + 4.76 \text{ Al (total)}$  [17]. 4.  $P (\pm 1 \text{ kbar}) = 4.76 + 5.64 \text{ Al (total)}$  [14];

## دماسنجی هورنبلند

با توجه به حضور کانی‌های آمفیبول و فلدسپار در سنگ‌های مورد بررسی از هر دو کانی می‌توان برای محاسبه دمای نمونه‌های مورد بررسی استفاده کرد. از جمله روش‌های مورد استفاده برای محاسبه دمای تشکیل آمفیبولیت‌های منطقه‌ی شمال شرق دورود، دماسنج‌هایی مانند مقدار  $Ti$  و  $Al$  در ترکیب کانی‌های آمفیبول و دما-فشارسنجی با استفاده از ترکیب آمفیبول (هورنبلند) و پلاژیوکلاز استفاده شده است.

هلز [۲۸] با استفاده از تغییرات مقدار آلومینیوم نسبت به تیتانیم در واحد فرمولی آمفیبول‌ها، دمای تشکیل این کانی‌ها را ارزیابی کرده است. در این پژوهش با استفاده از تغییرات  $Ti$  نسبت به  $Al^{IV}$ ، دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۵۰ درجه‌ی سانتیگراد برای هورنبلندهای مورد بررسی، به دست آمده است (شکل ۸ الف).

علاوه بر روش بیان شده، برای محاسبه دمای تقریبی واحدهای سنگی مورد بررسی نیز با استفاده از نمودار شکل ۸ ب که براساس مقادیر فشار (کیلو بار) نسبت به  $Al^T$  رسم شده است [۱۷، ۱۵] می‌توان گستره دمایی بین ۶۰۰-۷۵۰°C را برای منیزیهورنبلندهای مورد بررسی برآورد کرد (جدول ۳).

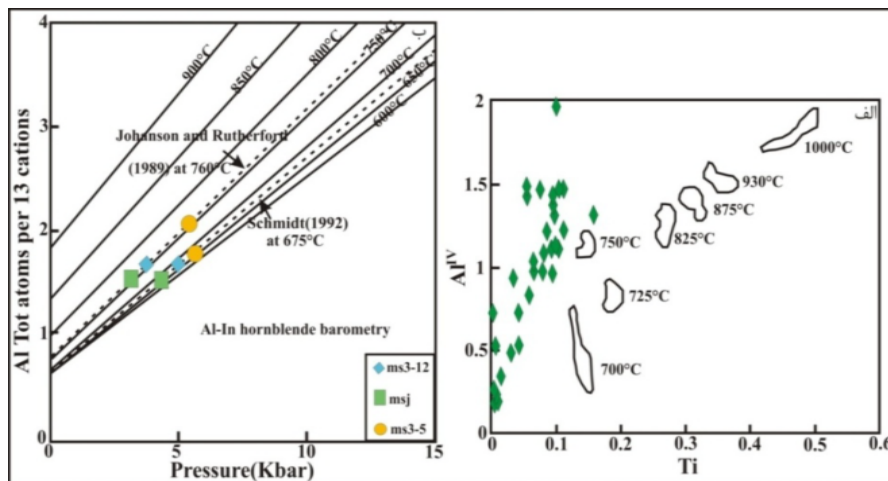
دماسنجی بر اساس تغییرات  $Si$  در برابر  $Mg\#$  و تغییراتمقدار  $Al^{IV}$  در برابر  $Ti$  در آمفیبول

[۲۹] با بررسی‌های آزمایشگاهی، موفق به سنتز آمفیبول‌های مختلف در دامنه‌های دمایی ۷۰۰ تا ۹۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد شده‌اند. باتوجه به مقادیر  $Si$  و  $Mg\#$  آمفیبول‌های مورد بررسی، در گستره‌ی دمایی ۷۰۰ تا کمتر از ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد متبلور شده‌اند (شکل ۹ الف). چنانکه در شکل ۹ ب ملاحظه می‌شود، براساس داده‌های دمایی ارائه شده توسط [۳۰]، و نمودار تغییرات  $Al^{IV}$  در برابر  $Ti$  [۲۹]، شرایط تبلور آمفیبول نمونه‌های آمفیبولیت مورد بررسی در گستره‌ی دمایی ۷۰۰ و کمتر از ۷۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد قرار گرفته است.

## دما-فشارسنجی با استفاده از دما و فشارسنج قراردادی

## هورنبلند-پلاژیوکلاز

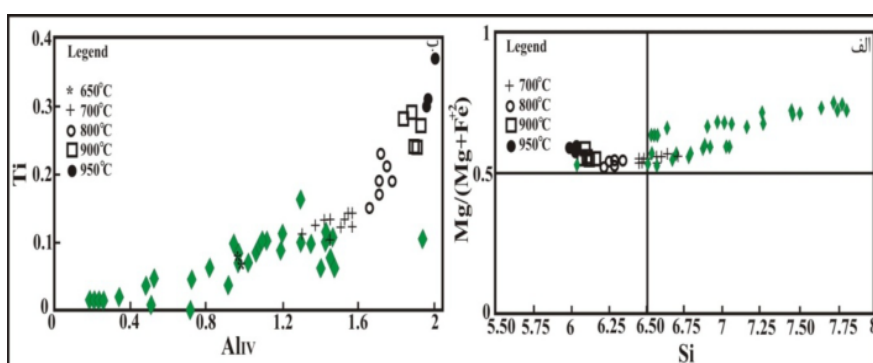
یکی از مناسب‌ترین روش‌ها برای برآورد دمای تبلور کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول براساس کاربرد روابط دماسنجی [۳۱] با استفاده از زوج کانی‌های هم‌زیست هورنبلند-پلاژیوکلاز است که براساس این روش گستره دمایی بین ۵۸۸ تا ۸۱۹ با میانگین ۷۰۴ درجه سانتی‌گراد را برای نمونه‌های مورد بررسی مشخص می‌کند (جدول ۴).



شکل ۸ الف: محاسبه دمای تشکیل آمفیبول‌های نمونه‌های مورد بررسی براساس روش هلز [۲۸]، ب: فشار (کیلو بار) نسبت به  $Al^T$  رسم شده است [۱۷، ۱۵] می‌توان گستره دمایی بین ۶۰۰-۷۵۰°C را برای منیزیهورنبلندهای مورد بررسی برآورد کرد.

جدول ۳ میانگین فشار بدست آمده از نمونه‌های مورد بررسی براساس روش‌های [۱۷، ۱۵].

| sample          | [۱۵]  | [۱۷]     |
|-----------------|-------|----------|
| Average(ms3-12) | ۳،۶۹۵ | ۵،۰۴۲۰۰۴ |
| Average(msj)    | ۳،۱۱۸ | ۴،۳۹۱۷۹۱ |
| Average(ms3-5)  | ۵،۴۸۵ | ۵،۶۶۳۳۵۸ |



شکل ۹ الف: نمودار Si در برابر  $Mg\#$  [۲۹]. داده‌های دمایی که در کنار نمودار دیده می‌شوند برگرفته از [۲۹]. ب: نمودار تغییرات  $Al^{IV}$  در برابر Ti آمفیبول‌های کلسیک [۲۹] داده‌های دمایی برگرفته از [۳۰].

جدول ۴ محاسبات دماسنجی کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول همزیست، دماسنجی براساس [۳۱].

| sample   | m12-1 | m12-2 | m12-3 | m12-4 | m12-5 | m12-6 | average |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|---------|
| T(C) HB2 | ۷۹۸.۶ | ۸۰۲.۴ | ۶۷۰.۴ | ۸۱۹.۹ | ۸۱۷.۹ | ۵۸۸.۲ | ۷۰۴     |

### ژئوشیمی سنگ کل

از آنجاکه جدایی خاستگاه آذرین یا رسوبی بودن آمفیبولیت‌ها گام نخست در بررسی شیمی سنگ کل این سنگ‌هاست، برای این منظور از نمودار  $TiO_2$  نسبت به  $MnO$  [۳۶] استفاده شد. قرار گرفتن نمونه‌ها در گستره‌ی آذرین نشان‌دهنده‌ی ارتوآمفیبولیت بودن این سنگ‌هاست (شکل ۱۲ الف). برای تاییدی بر ارتو بودن نمونه‌ها، از نمودار سه‌تایی  $MgO-FeO-CaO$  [۳۷] نیز استفاده شد که نشان می‌دهد نمونه‌های مورد بررسی ارتوآمفیبولیت هستند (شکل ۱۲ ب). برای نامگذاری سنگ‌مادر با استفاده از نمودار مجموع قلیایی-سیلیس که به TAS معروف است [۳۸]، نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی بازالت قرار گرفته (شکل ۱۲ پ). در نمودار ACF ارائه شده‌ی [۴۰، ۳۹] برای تعیین سنگ‌مادر احتمالی نمونه‌ها به کار رفته و نمونه‌ها در گستره‌ی سنگ‌های مافیک ترسیم می‌شوند (شکل ۱۲ ت).

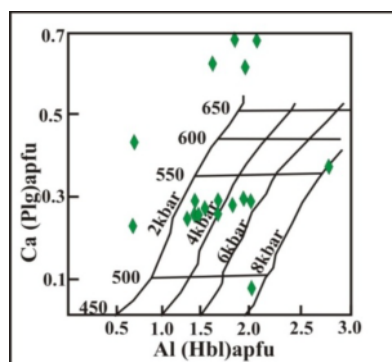
برای شناسایی سری ماگمایی و نامگذاری پروتولیت، از نمودارهای مرسوم برای سنگ‌های آذرین استفاده شد که ساده-ترین نمودار برای رده‌بندی نمونه‌های مورد بررسی، نمودار مجموع اکسیدهای عناصر قلیایی در مقابل سیلیس [۴۱] است. براساس این نمودار، بیشتر نمونه‌های مورد بررسی دارای ویژگی شبه‌قلیایی هستند و دو نمونه در گستره‌ی قلیایی قرار می‌گیرند (شکل ۱۳ الف). نمودار AFM [۴۱] برای تشخیص تولیتی یا آهکی-قلیایی بودن سنگ‌های شبه‌قلیایی به کار می‌رود. در این نمودار، نمونه‌ها در گستره‌ی تولیتی قرار می‌گیرند (شکل ۱۳ ب).

نکته‌ی قابل توجه اینکه دما-فشارسنجی برآورد شده برای آمفیبول‌ها براساس نمودار [۳۲] که با استفاده از کانی‌های هورنبلند و پلاژیوکلاز است، گستره‌ی دمایی بیش از ۵۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد و فشار بین ۲ تا ۶ کیلو بار را نشان می‌دهد که با دما و فشار قابل انتظار برای رخساره‌ی آمفیبولیت همخوانی دارد (شکل ۱۰).

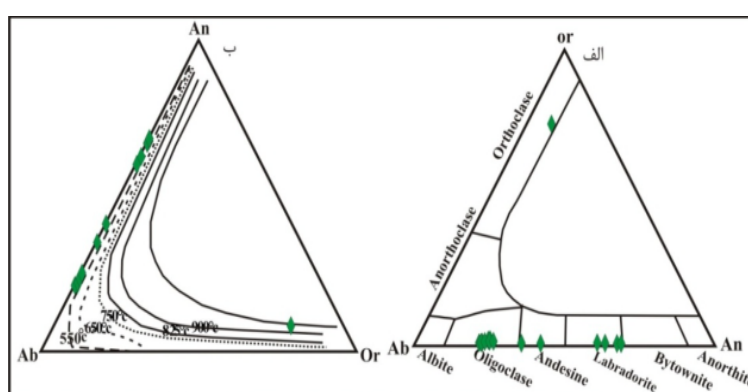
### پلاژیوکلاز

بررسی کانی‌های پلاژیوکلاز در آمفیبولیت‌های منطقه‌ی شمال-شرق دورود بر پایه‌ی نتایج حاصل از تجزیه‌ی ریزپردازش الکترونی استوار است [۷]. فرمول ساختاری کانی‌ها بر مبنای ۸ اتم اکسیژن و ۵ کاتیون محاسبه شده است. ترکیب پلاژیوکلازهای موجود در آمفیبولیت‌های منطقه در تقسیم‌بندی نمودار مثلثی آل بیت-آنورتیت-ارتوز [۳۳] در گستره‌ی ترکیبی آندزین-الیگولاژ تا لابرادوریت ( $X_{An} = 21-68\%$ ) قرار می‌گیرد (شکل ۱۱ الف).

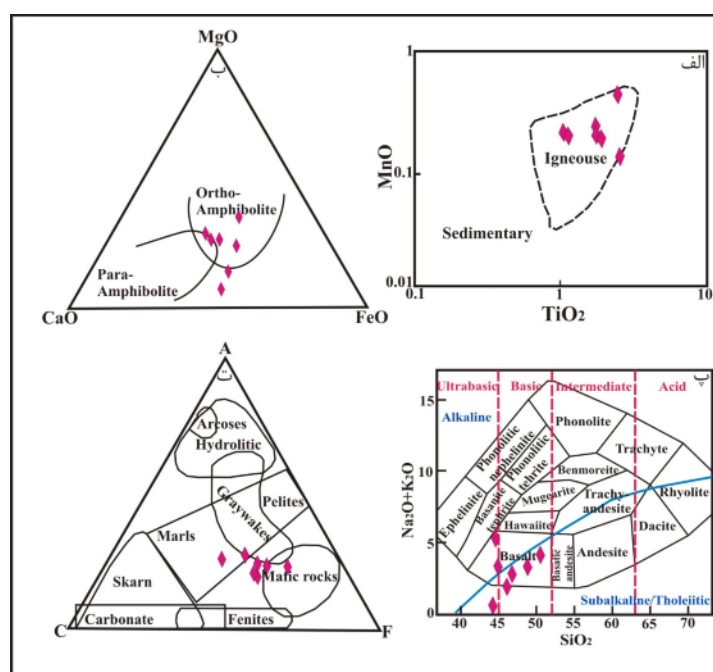
مقایسه ترکیب پلاژیوکلازها در نمونه‌های مختلف نشان می‌دهد که در نمونه‌هایی که نشانه‌های بیشتری از تبلور و جدایش دگرگونی وجود دارد و به نظر می‌رسد که درجه‌ی دگرگون‌شدگی در آنها بیشتر است، عضو انتهایی آنورتیت در آنها افزایش می‌یابد و در گستره‌ی لابرادوریت قرار می‌گیرند که این حالت با روند افزایش شدت دگرگونی همخوانی دارد، زیرا با افزایش درجه‌ی دگرگونی در سنگ‌های متابازیتی به تدریج میزان  $An$  موجود در ترکیب پلاژیوکلازها افزایش می‌یابد. از طرف دیگر براساس شکل ۱۱ ب، دمای نمونه‌های مورد بررسی با استفاده از نمودار سه‌تایی آل بیت، آنورتیت، ارتوز، با دمایی در حدود ۵۵۰ درجه‌ی سانتیگراد ارزیابی می‌شود [۳۴، ۳۵].



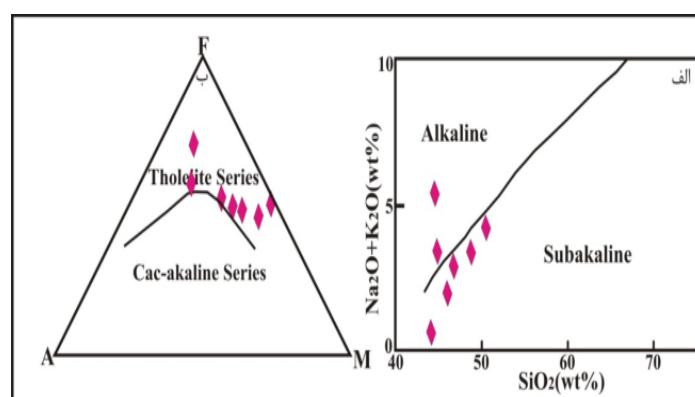
شکل ۱۰ دما-فشار، سنج هورنلند-یلاژ یوکلار: برای تعیین گستره‌ی دما-فشار، آمفیبولیت‌ها برگرفته از [۳۲].



شکل ۱۱ الف: نمودار جداکننده‌ی گستره‌ی کانی‌های پلاژیوکلاز در سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه [۳۳]، ب: تعیین دمای نمونه‌های مورد بررسی براساس کانی پلاژیوکلاز [۳۴، ۳۵].



شکل ۱۲ الف: براساس نمودار [۳۶]، پروتولیت آمفیبولیت‌های منطقه آذرین است، ب: نمودار مثلثی MgO-CaO-FeO برای جدایی پارامفیبولیت و ارتوآمفیبولیت [۳۷]، پ: نمودار مجموع قلیایی-سیلیس [۳۸] که نمونه‌های مورد بررسی در این نمودار در گسترده‌ی بازالت قرار گرفته‌اند، ت: تعیین نوع سنگ مادر رسوبی نمونه‌های مورد مطالعه با استفاده از نمودار سه تایی ACF، [۳۹، ۴۰]  $F = \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO}$  و  $A = (\text{Al}_2\text{O}_3) + (\text{Fe}_2\text{O}_3) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ،  $C = \text{CaO} - 3.3 \text{ P}_2\text{O}_5$

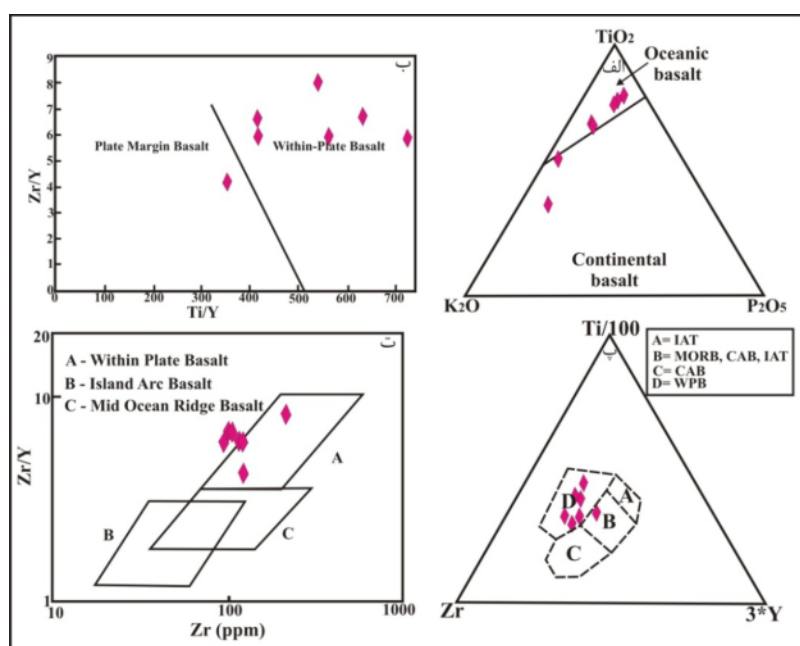


شکل ۱۳ الف: با توجه به نمودار (TAS) [۴۱] این سنگ‌ها به گروه شبه‌قلیایی هستند و دو نمونه از آنها در گستره‌ی قلیایی قرار گرفته‌اند، ب: نمودار مثلثی AFM [۴۱] نشانگر تولییتی بودن سنگ خاستگاه سنگ‌های آمفیبولیتی است.

### تعیین محیط زمین‌ساختی سنگ خاستگاه

برای تعیین جایگاه زمین‌ساختی سنگ مادر آمفیبولیت‌های مورد بررسی تلاش شده تا از نمودارهای کلاسیک متداول استفاده شود، نمودارهای جداکننده‌ی محیط‌های زمین‌ساختی که بر پایه‌ی عناصر نادر نامتحرک استوار شده‌اند، به دلیل استفاده در سنگ‌های دگرسان و دگرگون شده، کارایی بیشتری دارند. در بیشتر این نمودارها از عناصر HFSE نظیر P-Nb-Y-Zr-Ti بهره برده می‌شود، این عناصر در شرایط گرمایی و دگرگونی بستر دریا تا درجه‌های متوسط دگرگونی (میان رخساره‌ی آمفیبولیت) پایدار هستند. [۴۲] در یک بررسی تجربی دریافتند که تشخیص بازالت

های اقیانوسی و نااقیانوسی با یک مرز مستقیم روی نمودار مثلثی  $\text{TiO}_2 - \text{K}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5$  امکان‌پذیر است که براساس این نمودار، نمونه‌های مورد بررسی بیشتر در گستره‌ی اقیانوسی قرار می‌گیرند (شکل ۱۴ الف) و در نمودار Zr/Y مقابل Ti/Y [۴۳] تمام نمونه‌ها در گستره‌ی بازالت درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند (شکل ۱۴ ب). برای بررسی بیشتر جایگاه زمین‌ساختی آمفیبولیت‌های شمال شرق دورود از نمودارهای دیگر از جمله نمودار مثلثی Zr- Ti/100- Y\*3 [۴۴] (شکل ۱۴ پ) و نمودار Zr/Y در برابر Zr [۴۵] (شکل ۱۴ ت) استفاده شد که بنابراین نمودارها، نمونه‌های مورد بررسی در گستره‌ی بازالت‌های درون صفحه‌ای قرار گرفته‌اند.



شکل ۱۴ الف: نمودار  $\text{TiO}_2 - \text{K}_2\text{O} - \text{P}_2\text{O}_5$  [۴۲] برای تعیین بازالت‌های اقیانوسی و غیراقیانوسی، ب: در نمودار Zr/Y نسبت به Ti/Y [۴۳] تمام نمونه‌ها در گستره‌ی بازالت درون صفحه‌ای قرار می‌گیرند، پ: نمودار مثلثی Zr- Ti/100- Y\*3 [۴۴]، ت: نمودار Zr/Y در برابر Zr [۴۵].

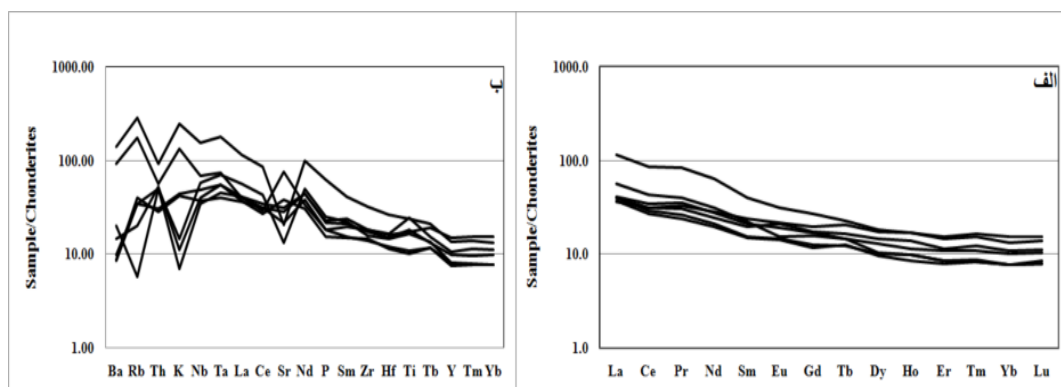
هورنبلند، اکتینولیت، ترمولیت و اپیدوت هستند که تا مرحله‌ی آمفیبولیت دگرگون شده‌اند و با توجه به اینکه بیشتر نمونه‌ها دارای اپیدوت هستند و با توجه به همزیستی اکتینولیت و هورنبلند می‌توان آنها را به رخساره‌ی شکل‌گرفته‌ی اپیدوت آمفیبولیت نسبت داد که نشانگر پایان رخساره‌ی شست سبز و آغاز رخساره آمفیبولیت هستند. آمفیبول‌ها از نظر تکتونوماگمایی ماهیت نیمه‌قلیایی را نشان می‌دهند. زمین-فشارسنجی براساس مقدار آلومینیوم موجود در کانی‌های آمفیبول، دمایی در گستره‌ی ۶۰۰ تا ۷۵۰ درجه‌ی سانتیگراد و در فشاری معادل ۱ تا ۶ کیلو بار را نشان می‌دهد. براساس بررسی‌های نقطه‌ای انجام گرفته روی پلاژیوکلازها، ترکیب آندزین-لیگولاژ تا لابرادوریت دمایی حدود ۵۵۰ درجه‌ی سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. برآورد دما و فشار تبلور کانی‌های پلاژیوکلاز و آمفیبول بر اساس کاربرد روابط گرمادماسنجی با استفاده از زوج کانی‌های هم‌زیست هورنبلند-پلاژیوکلاز محدوده‌ی دمایی بین ۵۸۸ تا ۸۱۹ با میانگین ۷۰۴ درجه‌ی سانتی‌گراد و گستره‌ی فشار ۲ تا ۶ کیلو بار را برای این کانی‌ها مشخص می‌کند که با آنچه که برای کانی‌های ناهمزیست آمفیبول و پلاژیوکلاز پیشتر بیان شد همخوانی دارد. نمودارهای متعدد استفاده شده برای تعیین رشته‌های ماگمایی نشان می‌دهد که نمونه‌های مورد بررسی بیشتر دارای ویژگی شبه‌قلیایی و از نوع تولییتی هستند. با توجه به نمودارهای جدایی محیط زمین‌ساختی بازالت‌ها، پروتولیت سنگ‌های آمفیبولیتی منطقه در شرایط پوسته‌ی اقیانوسی و در محیط-های تکتونوماگمایی درون ورقه‌ای به وجود آمده‌اند.

عناصر خاکی‌نادر سنگ‌های مورد بررسی نسبت به کندریت بهنجار شده‌اند (شکل ۱۵ الف و ب) [۴۶، ۴۷]. در نمودارهای عنکبوتی، آمفیبولیت‌های مورد بررسی از عناصر HFSE (Th-Nb-Zr-La-Ti) غنی‌شدگی نشان می‌دهند (شکل ۱۵ ب) که حاکی از ریشه‌گیری از یک گوشته‌ی تهی‌نشده و با درجه‌ی ذوب‌بخشی کم است. تهی‌شدگی از Sr در آمفیبولیت‌های منطقه را می‌توان به کمبود کانی‌های کلسیم‌دار نظیر پلاژیوکلاز و پیروکسن نسبت داد. Ba و Sr بیشتر جانشین Ca در پلاژیوکلاز می‌شوند، تبلور پلاژیوکلاز موجب کاهش این عناصر در ماگما خواهد شد.

مقدار غنی‌شدگی از LREE برای آمفیبولیت‌های مورد بررسی نسبت به کندریت، حدود ۵۰ تا ۱۲۰ برابر و برای HREE حدود ۷ تا ۲۰ برابر آن در کندریت است. در نمودارهای عنکبوتی، نمونه‌های منطقه‌ی درود بیهنجاری منفی Nb نشان نمی‌دهند زیرا بیهنجاری منفی Nb شاخص پوسته‌ی قاره‌ای است و بیانگر نقش پوسته در فرآیند ماگمایی است. همچنین آمفیبولیت‌های منطقه از عناصر Ba-Rb-K-Sr تهی‌شدگی نشان می‌دهند بنابراین به نقش جدایش بلورین (تبلور کانی‌هایی نظیر الیون و پیروکسن) می‌تواند به غنی بودن این سنگ‌ها از LREE نسبت به HREE می‌تواند به احتمال بیانگر وجود گارنت در سنگ خاستگاه باشد.

#### برداشت

بر اساس بررسی‌های انجام شده، آمفیبولیت‌های منطقه درود در طی دگرگونی‌های ناحیه‌ای و از دگرگونی سنگ‌های آذرین بازی (مانند بازالت، دیاباز و گابرو) به وجود آمده‌اند و به عبارتی ارتوآمفیبولیت هستند. این آمفیبولیت‌ها دارای پلاژیوکلاز،



شکل ۱۵ الف: نمودار عناصر خاکی‌نادر نمونه‌های مورد بررسی بهنجار شده نسبت به کندریت [۴۶] که غنی‌شدگی عناصر سبک نسبت به عناصر سنگین را نشان می‌دهد. ب: نمودار عنکبوتی نمونه‌های مورد بررسی [۴۷].

## مراجع

- basic-ultrabasic magmatism of Central Iberia", Contribution to Mineralogy and Petrology 158 (2009) 69-98.
- [10] Hawthorne F.C., Oberti R., E., 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.
- [11] Sial A.N., Ferreira V.P., Fallick A.E., Jeronimo M., Cruz M., "Amphibole-rich clots in calc-alkalic granitoids in the Borborema province northeastern Brazil", Journal of South American Earth Science 11 (1998) 457-471.
- [12] Fleet M.E., Barnett R.L., "Al<sup>IV</sup>/Al<sup>VI</sup> partitioning in calciferous amphiboles from the Frood mine, Sudbury, Ontario", Canadian Mineralogist 16 (1978) 527-532.
- [13] Hammarstrom J.M., Zen E., "Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer", American Mineralogist 71 (1986) 1297-1331.
- [14] Hollister L.S., Grissom G.E., Peters E.K., Stowell H.H., Sisson V.R., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons", American Mineralogist 72 (1987) 231-239.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] Thomas W.M., Ernst W.G., "The aluminum content of hornblende in calc-alkaline granitic rocks: A mineralogic barometer calibrated experimentally to 12 kbars", In R.J. Spencer and I-M. Chou, Eds., Fluid-mineral interactions: A tribute to H. P. Eugster. Geochemical Society Special Publication 2 (1990) 59-63.
- [۱] سهندی م.ر.، رادفر ج.، حسینی دوست س.ج.، محجل م.، نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰۰ شازند، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۵)، برگ شماره ۵۸۵۷.
- [۲] رادفر ج.، "بررسی‌های زمین‌شناسی و پترولوژی سنگ‌های گرانیتوئیدی ناحیه آستانه-گوشه"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه تهران (۱۳۶۶).
- [3] Berthier F., Billiaul H.P., Halbronn B., Marizot P., "Etude Stratigraphique, petrologique et structural de La region de khorramabad (zagros, Iran)", These De 3e cycle, Grenoble, (1974), 282.
- [4] Mohajjel M., "Structure and tectonic evolution of Paleozoic - Mesozoic rocks, Sanandaj- Sirjan zone, western Iran", PhD. thesis, University of Wollongong, Australia, (1997).
- [5] Shakerdardakani F., Neubauer F., Masoudi F., Mehrabi B., Liu X., Dong Y., Mohajjel M., Monfaredi B., Friedl G., "Panafrican basement and Mesozoic gabbro in the Zagros orogenic belt in the Dorud-Azna region (NW Iran): Laser-ablation ICP-MS zircon ages and geochemistry", Tectonophysics 647 (2015) 146-171.
- [6] Stöcklin J., Setudinia A., "Lexique-Stratigraphique international volume III ASIE. Centre National de la Recherche Scientifique", 15, quei Anatol France, (1972), 75.
- [۷] صفرزاده م.، "پتروژنز و شیمی کانی آمفیبولیت های شمال شرق دورود"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان (۱۳۹۳).
- [8] 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.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., Youzhi G., "Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on new minerals and mineral names", European Journal of Mineralogy 9 (1997) 623-651.
- [9] Molina J. F., Scarrow J.H., Montero P.G., "High-Ti amphibole as a petrogenetic indicator of magma chemistry: evidence for mildly alkalichybrid melts during evolution of Variscan

- amphibole in MORB-A semiquantitative thermobarometer*", American Mineralogist 83 (1998) 952-969.
- [30] Liu J., "High pressure phase equilibria involving the amphibolite-eclogite transformation", unpublished doctoral dissertation, Stanford University, 1997.
- [31] Holland T.J.B., Blundy J.D., "Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole plagioclase thermometry", Contributions to Mineralogy and Petrology 116 (1994) 433-447.
- [32] Plyusnina L.P., "Geothermometry and geobarometry of plagioclase-hornblende bearing assemblages", Contributions to Mineralogy and Petrology 80 (1982) 140-146.
- [33] Deer W.A., Howie R.A., Zussman J., "An introduction to the rock-forming minerals", Prentice Hall, (1992).
- [34] Kroll H., Evangelakakis C., Voll G., "Two feldspar geothermometry: a review and revision for slowly cooled rocks", Contribution to Mineralogy and Petrology (1993) 510-518.
- [35] Anderson J.L., "Status of thermo-barometry in granitic batholiths", Earth Science Review 87 (1996) 125-138.
- [36] Misra S.N., "Chemical distinction of highgrade ortho- and para-metabasites", Norsk Geologisk Tidsskrift 51 (1971) 311-316.
- [37] Walker K. R., Joplin G. A., Lovering J. F., Green R., "Metamorphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime magnesia sediments of the Precambrian of north western Queensland", Journal of Geology Society Australia 6 (1960) 149-178.
- [38] Cox K.G., Bell J.D., Pankhurst R.J., "The interpretation of igneous rocks", George, Allen and Unwin, London, (1979).
- [39] Barton M. D., Ilchik R. P., Marikos M. A., "Metasomatism", In: Kerrick D. M., (Ed) Contact Metamorphism, Reviews in Mineralogy 26 (1991) 321-350.
- [40] Winter J. D., "Principles of Igneous and Metamorphic Petrology", Prentice Hall, (2010).
- [41] Irvine T.N., Baragar W.R.A., "A guide to the chemical classification of the common volcanic rocks", Canadian Journal of Earth Sciences 8 (1971) 523-484.
- [19] Spear F.S., "Amphibole- plagioclase equilibria: An empirical model for the relation albite+ tremolite= edenite+ 4 quartz", Contributions to Mineralogy and Petrology 77 (1981) 355-364.
- [20] Laird J., Lanphere A., Albee A.L., "Distribution of Ordovician and Devonian metamorphism in mafic and pelitic schists from Vermont", American Journal of Science 284 (1984) 376-416.
- [21] Brown E.H., "The crosstie content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism", Journal of Petrology 18 (1977) 376-416.
- [22] Rasse P., "Al and Ti contents of hornblende, indicators of pressure and temprature of regional metamorphism", Contributions to Mineralogy and Petrology 45 (1974) 231-236.
- [23] 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.
- [24] Blundy J.D., Holland T.J. B., "Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer", Contributions to Mineralogy and Petrology 104 (1990) 208-224.
- [25] Okamoto A., Toriumi M., "Optimal mixing properties of calcic and subcalcic amphiboles: application of Gibbs' method to the Sanbagawa schists, SW Japan", Contributions to Mineralogy and Petrology 146 (2004) 529-545.
- [26] Stein E., Dietl C., "Hornblende thermobarometry of granitoids from the Central Odenwald (Germany) and their implications for the geotectonic development of Odenwald:" Mineralogy and petrology 72 (2001) 185-207.
- [27] 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) 549-559.
- [28] Helz R., "Phase reactions of basalts in their melting range at PH<sub>2</sub>O = 5kb, Part 11, Melt composition", Journal of Petrology 17 (1993) 139-193.
- [29] Ernst W.G., Liu J., "Experimental phase-equilibrium study of Al-and Ti-contents of calcic

- [45] Pearce JA, Norry MJ., *"Petrogenetic implications of Ti, Zr, Y and Nb variations in volcanic rocks"*, Contributions to Mineralogy and Petrology 69 (1979) 33-47.
- [46] Nakamura N., *"Determination of REE, Ba, Fe, Mg, Na, and K in carbonaceous and ordinary chondrites"*, Geochimica et Cosmochimica Acta 38 (1974) 757-775.
- [47] Thompson A.B., *"Magmatism of the British Tertiary volcanic Province"*, Scottish Journal of Geology 18 (1982) 50-107.
- [42] Pearce T.H., Gorman B.E., Birkett T.C., *"The  $TiO_2-K_2O-P_2O_5$  diagram: A method of discriminating between oceanic and non-oceanic basalts"*, Earth and Planetary Science Letters 24 (1975) 419-426.
- [43] Pearce J.A., Gale G.H., *"Identification of ore deposition environment from trace element Geochemistry of associated igneous host rocks"*, Geological Society, London, Special Publications 7 (1977) 14-24.
- [44] Pearce J.A., Cann J.R., *"Tectonic setting of basic volcanic rocks determined using trace element analyses"*, Earth and Planetary Science Letters 19 (1973) 290-300.