



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Amphibole mineral chemistry of amphibolites from the Makran accretionary complex (southeast of Iran)

Maryam Souri¹, Ahmad Ahmadi Khalaji^{2*}, Jiamin Wang³, Rasoul Esmaeili⁴, Mohammad Ebrahimi⁵

1. PhD student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Lorestan University, Khorramabad, Iran

3. Professor, State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

4. PhD, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

5. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Zanjan, Zanjan, Iran

Article info

Article history

Received: 20 December 2022

Accepted: 26 February 2023

Keywords:

amphibole, geothermobarometry, mineral chemistry, amphibolite, Makran.



Abstract

Amphibolites are a major component of the northern Makran ophiolite belts. They include both foliated and massive types. They are diverse in mineralogy and include amphibolite, garnet-pyroxene amphibolite, and epidote-garnet amphibolite. In addition to plagioclase and amphibole, which are the main constituent phases, other minerals such as zircon, sphene and quartz are also found in amphibolites. According to mineral chemistry, the amphiboles in these rocks are calcic type, and compositionally range from magnesian to ferrohornblende. Geothermobarometry of the amphiboles indicates a pressure ≤ 7 kbar (4-6 kbar) and a temperature range of 750-800°C. Thus, geothermobarometry of amphiboles shows that the Makran amphibolites were metamorphosed at high-temperature and low to medium pressure metamorphic facies (Abukuma-type metamorphism).

Introduction

The Makran area is located in the south of Jazmurian. In this area, metamorphic rocks with different metamorphic facies including amphibolites are found. These rocks usually contain minerals such as plagioclase, garnet and amphibole, which are very sensitive to temperature and pressure changes and were generally used to determine and investigate the temperature-pressure changes of metamorphism (Zenk and Schulz, 2004). Though several studies have been done on ophiolites, amphibolites are poorly studied. U-Pb dating of zircons in amphibolites indicates Late Permian to Late Triassic ages (Esmaeili et al., 2022). Geochemical studies of Makran amphibolites show that these rocks

have an igneous origin with an oceanic basaltic composition originated from an enriched mantle (Souri et al., 2023).

Amphibolites are generally found in most metamorphic belts. So, studying and determining their metamorphic temperature and pressure plays an important role in understanding the tectonothermal and tectonometamorphic changes of the continental crust (Andreev et al., 2022). Therefore, in this research, P-T metamorphic condition of Makran amphibolites have been studied using electron microprobe analysis (EMPA) of amphibole, which can be an effective step in clarifying the geological events in this area.

Geological setting

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432>

*Corresponding author: Ahmad Ahmadi Khalaji; E-mail: ahmadikhalaji.a@lu.ac.ir

How to cite this article: Souri, M., Ahmadi Khalaji, A., Wang, J., Esmaeili, R., Ebrahimi, M., 2023. Amphibole mineral chemistry of amphibolites from the Makran accretionary complex (southeast of Iran).

Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(2), 236- 258. <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432>



The studied amphibolites are located in the northern Makran zone (southeastern Iran). Amphibolites are mainly found in Bajgan-Durkan complex. The northern Makran is divided into four units, that from north to south are: 1. Fanuj-Maskutan ophiolitic complex, 2. Remeshk-Mokhtarabad ophiolite, 3. Bajgan-Durkan complex and 4. Tectonic fragments of various rocks, including ophiolite rocks from southern ocean basin and the Cretaceous volcanic arc. Amphibolites are exposed as discontinuous lenses at the boundaries of the thrust with other ophiolitic parts.

Analytical Methods

About 160 amphibolite samples from the study area were collected during field investigations. Then, 55 thin sections were made from these rocks. Mineral chemical analyses of amphiboles were performed on 4 polished thin sections, and 62 points of this mineral were analyzed using an automated JEOL JXA-8900 electron microprobe analyzer (EPMA) at the Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences (IGG-CAS) with an accelerating voltage of 15 kV and a beam current of 20 nA. The number of cations in the structural formula of amphibole is calculated based on 23 oxygen atoms (Table 1).

Petrography

In terms of field appearance and texture, the studied amphibolites occur as foliated and massive types. Mineralogically, they include amphibolites, garnet-pyroxene amphibolites and epidote-garnet amphibolites. Hornblende and plagioclase are the most abundant minerals. Garnet, epidote and clinopyroxene are also present in some samples.

Amphibolites: These rocks are dark to dark green in color and foliated to massive with plagioclase-rich and amphibole-rich

layers. The minerals include amphibole, plagioclase, zircon, apatite, quartz and sphene. The preferred foliation in these rocks is clearly visible. Amphiboles are subhedral to anhedral (55% by volume). Plagioclases (40% by volume) are subhedral and mostly altered to calcite and clay minerals. Quartz is anhedral and present in the matrix. The massive types are dark green in hand sample with a fine- to coarse-grained texture, and no very clear preferred orientation of minerals. The minerals include amphibole, plagioclase, zircon, quartz, apatite and sphene.

Garnet-pyroxene amphibolites: These rocks are massive, light green to dark green with fine- to coarse- grained texture. The main texture of these rocks is granoblastic and porphyrogranoblastic. The minerals include garnet, pyroxene, amphibole, plagioclase, zircon, quartz, apatite and sphene. Plagioclase (15 vol. %) is subhedral and mostly altered to calcite and clay minerals. Amphiboles (40 vol. %) are green and anhedral. Pyroxenes are clinopyroxene (about 10 vol.%) and anhedral to subhedral. Garnet is modally 30% and may reach several millimeters in size. Sphene may form about 5% of the mode.

Epidote-garnet amphibolites: These rocks are massive and light green in color due to the large amount of epidote (30 vol. %). Constituent minerals include amphibole, plagioclase, epidote, garnet, pyroxene and quartz. Amphiboles are green and anhedral. Plagioclase (25 vol. %) is subhedral and mostly altered to calcite and clay minerals. Epidote is fine- to medium-grained, anhedral to subhedral, with a high relief and a pistachio green color. Garnets in these rocks (25 vol. %) are variable in size and mostly anhedral. Clinopyroxene is modally less than 5%.

Mineral chemistry

Structural formula of the analyzed points of amphiboles were calculated on the basis of 15 cations and 23 oxygen. The amphiboles were classified as Ca-amphibole group based on the type of the elements in the B site of the crystal structure.

In the Mg/(Mg + Fe²⁺) vs. Si diagram, the studied amphiboles mainly show compositional range from magnesian to ferrohornblende. Furthermore, in the (K+Na) vs. Si diagram, the amphiboles are mainly magnesio- to ferro-hornblende while in the Al^{IV} vs. Ti diagram, they show a compositional range of magnesio-hornblende.

Geothermobarometry

Hynes (1982) classified the calcic amphiboles as low and medium pressure based on Ti and Al^I values. The analyzed samples fall in the field of low to medium pressure amphiboles. The comparison of the studied amphibolites also shows that they are of low to medium pressure facies, similar to the Abukuma in Japan. The Al^I vs. Fe^{*}/Fe^{*}+Mg, Al^{VI} vs. Si and Na_{M4} vs. Al^{IV} diagrams show the pressure of ≤ 7 kbar (4-6 kbar). In addition, the Al^{IV} vs. Ti diagram shows the equilibration temperature of 750-800 °C for the amphiboles, while thermometry of the Al^I vs. pressure diagram provides temperature range of 650-750 °C.

Conclusion

The studied amphibolites from the Makran area are of two types, foliated and massive. Based on the index minerals, these rocks can be classified as amphibolites, garnet-pyroxene amphibolites and epidote-garnet amphibolites. The amphiboles are mainly magnesian- to ferro-hornblende and calcic type. Geothermobarometry of the

amphiboles provide the pressures of ≤ 7 kbar (4-6 kbar) and the temperature of 750-800 °C. Therefore, these rocks were metamorphosed in low-medium pressure metamorphic facies, which is consistent with high temperature and low-medium pressure metamorphism (Abukuma-type metamorphism).

References

- Andreev, A. A., Rytsk, E. Yu., Velikoslavinskii, S. D., Tolmacheva, E. V., Bogomolov, E. S., Lebedeva, Y. M., Fedoseenko, A. M., 2022. Age, Composition, and Tectonic Setting of the Formation of Late Neoproterozoic (Late Baikalian) Complexes in the Kichera Zone, Baikal-Vitim Belt, Northern Baikal Area: Geological, Geochronological, and Nd Isotope Data. *Petrology* 30 (4), 337-368.
- Esmaeili, R., Ao, S., Shafaii Moghadam, H., Zhang, Z., Griffin, W. L., Ebrahimi, M., Bhandari, S., 2022. Amphibolites from Makran accretionary complex record Permian-Triassic Neo-Tethyan evolution. *International Geology Review* 64(11), 1594-1610.
- Hynes, A., 1982. A comparison of amphiboles from medium and low pressure metabasite. *Contribution of Mineralogy and petrology* 81, 119-125.

CRediT authorship contribution statement

 Maryam Souri	Writing - Original Draft , Investigation Software
 Ahmad Ahmadi Khalaji	Supervision, Writing - Review & Editing Project administration, Validation
 Jiamin Wang	Investigation, Funding acquisition Data Curation
 Rasoul Esmaeili	Resources, Methodology Conceptualization, Project administration
 Mohammad Ebrahimi	Resources, Methodology Conceptualization

Souri, M., Ahmadi-Khalaji, A., Ebrahimi, M., Esmaili, R., 2023. Petrology and geochemistry of the amphibolites from Makran accretionary complex, Southeast of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (IJCM)* 31 (1), 45-58. (in Persian)

Zenk, M., Schulz, B., 2004. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland. *Mineralogical Magazine* 68, 769–786.



شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیت‌های مجموعه برافزایشی مکران (جنوب شرق ایران)

مریم سوری^۱، احمد احمدی خلجی^{۲*}، جیامین وانگ^۳، رسول اسمعیلی^۴، محمد ابراهیمی^۵

۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

۲. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

۳. استاد، موسسه زمین‌شناسی و زمین‌فیزیک، آکادمی علوم چین

۴. دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان

۵. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷	آمفیبولیت‌ها بخشی از سنگ‌های دگرگونی کمر بند آفیولیتی مکران شمالی را تشکیل می‌دهند که به دو صورت جهت‌یافته و توده‌ای یافت می‌شوند. براساس کانی‌های شاخص، این سنگ‌ها شامل آمفیبولیت، گارنت-پروکسن آمفیبولیت و اپیدوت-گارنت آمفیبولیت هستند. کانی‌های اصلی تشکیل‌دهنده آنها شامل آمفیبول، گارنت، پلاژیوکلاز، پروکسن، اپیدوت، کوارتز و اسفن می‌باشد. براساس شیمی کانی، آمفیبول در این سنگ‌ها از نوع کلسیک بوده و عمدتاً ترکیبی در محدوده‌ی مگنزیو تا فروهورنبلند دارد. محاسبات تعیین دما-فشار آمفیبول‌ها، فشار ≤ 7 kbar (۴-۶ kbar) و گستره دمایی ۷۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد را نشان می‌دهند. بدین ترتیب بررسی‌های زمین دما-فشارسنجی این کانی نشان می‌دهد که آمفیبولیت‌های مکران در رخساره‌های دگرگونی دمایی بالا و فشار کم تا متوسط (دگرگونی نوع آبوکوما) دگرگون شده‌اند.
واژه‌های کلیدی آمفیبول، زمین دما-فشار سنجی، شیمی کانی، آمفیبولیت، مکران.	



مقدمه

است. آمفیبولیت‌ها از جمله سنگ‌های دگرگونی هستند که در اکثر مناطق دگرگونی یافت می‌شوند. این سنگ‌ها حاوی کانی‌های حساس به دما و فشار همچون آمفیبول و در برخی موارد گارنت هستند. از این رو از کانی آمفیبول برای تعیین و بررسی تغییرات دما-فشار دگرگونی در طول زمان (P-T-t) استفاده می‌شود (Triboulet and Audren, 1988; Schulz et al., 1995; Triboulet, 1992; Zenk and

پهنه مکران با گستردگی وسیع (با طول حدود ۸۰۰ و عرض حدود ۴۰۰ کیلومتر)، در جنوب فرورفتگی جازموریان قرار گرفته است (شکل ۱). در این پهنه، علاوه بر رخنمون وسیع سنگ‌های نادگرگونه آفیولیتی و غیرآفیولیتی، انواع سنگ‌های دگرگونی با درجات مختلف دگرگونی دیده می‌شود. رخنمون عمده این سنگ‌ها در زون مکران شمالی

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432>

*نویسنده مسئول: احمد احمدی خلجی ahmadikhalaj.a@lu.ac.ir

استناد به این مقاله: سوری، م.، احمدی خلجی، ا.، وانگ، ج.، اسمعیلی، ر.، ابراهیمی، م. (۱۴۰۱) شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیت‌های مجموعه برافزایشی مکران (جنوب شرق ایران). مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۲۳۶ تا ۲۵۸.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432>



شیمیایی نقطه‌ای (ریزپر دازنده الکترونی) کانی آمفیبول پرداخته شده است که می‌تواند گام موثری در روشن ساختن رخداد‌های زمین‌شناسی در منطقه باشد.

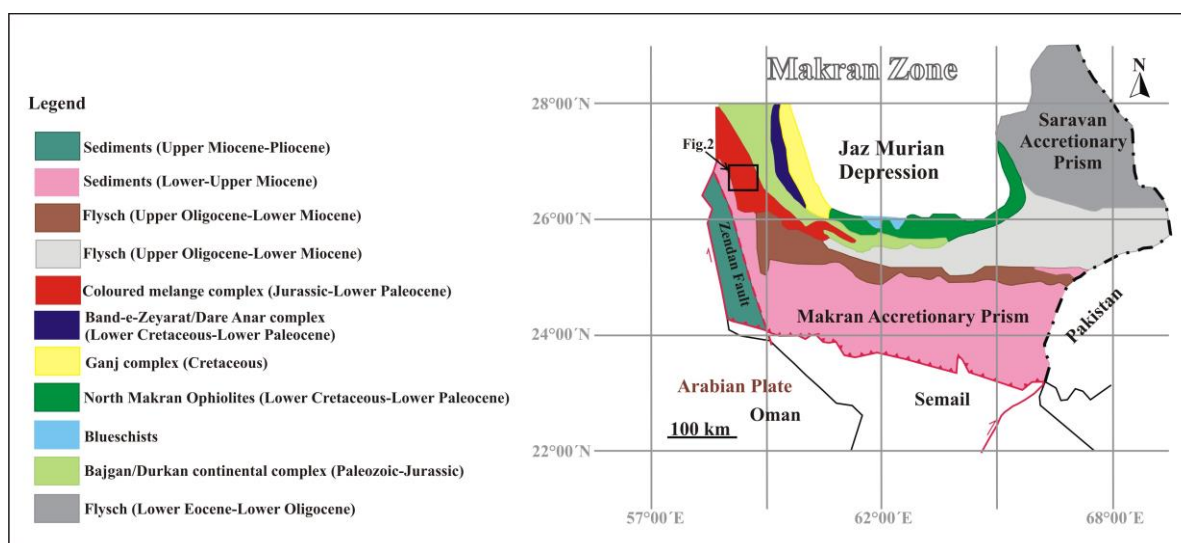
زمین‌شناسی عمومی

مجموعه دگرگونی آمفیبولیتی مورد بررسی در ۱۲۰ کیلومتری شرق میناب در منطقه مکران شمالی (جنوب شرق ایران) واقع شده است (شکل ۱). در گستره‌ی پهنه مکران، گسل‌ها و تراست‌هایی با روند شرقی- غربی وجود دارند که گسل بشاگرد یکی از مهم‌ترین آنهاست. در شمال گسل بشاگرد مجموعه‌های افیولیتی مختلف شامل گنج، رمشک- مختارآباد، بندزیارت، تیدار، باجگان-دورکان، مسکوتان و ... بعضاً با توالی کاملی از افیولیت‌های کمتر دگرگون شده برنزد دارند. آمفیبولیت‌ها عمدتاً در باجگان- دورکان دیده می‌شوند. سیستم فرورانشی/ برافزایشی مکران در ایران از شمال به جنوب شامل این بخش‌هاست: ۱- کمان آتشفشانی بزمان- تفتان و گودال پیش کمان جازموریان، ۲- گوه راندگی رخنمون یافته در خشکی، ۳- بخش دریایی که گوه فزآینده فعال امروزی است (Dolati, 2010). همچنین بخش خشکی مکران ایران به چهار قسمت اصلی تقسیم شده است که از شمال به جنوب شامل: مکران شمالی، مکران درونی، مکران بیرونی و مکران ساحلی است (Dolati, 2010) (شکل ۱). آمفیبولیت‌های مورد مطالعه از نظر تقسیمات ساختاری در پهنه مکران و از لحاظ

بررسی آمفیبولیت‌ها به ویژه ارتوآمفیبولیت‌ها از دیرباز مورد توجه پژوهشگران بوده است (Evans and Leake, 1960; Bucher and Frey, 1994; Winter, 2001). بر روی آمفیبولیت‌های مکران، مطالعات بسیار محدودی صورت گرفته (Esmaeili et al., 2020, 2022; Sourı et al., 2023) و بیشتر مطالعات انجام گرفته در این منطقه بر روی افیولیت‌های مکران است. داده‌های زیرکن‌های آواری نشان می‌دهد که مجموعه برافزایشی مکران از تریاس تا ائوسن تکامل یافته است (Esmaeili et al., 2020) و سنگ مادر آمفیبولیت‌ها در یک محیط کشتی ایجاد شده‌اند (Esmaeili et al., 2022). مطالعات زمین‌شیمیایی آمفیبولیت‌های منطقه مورد مطالعه نشان می‌دهد این سنگ‌ها دارای خاستگاه آذرین با ترکیب بازالتی از نوع اقیانوسی بوده که از یک گوشته‌ی غنی شده منشأ گرفته‌اند و دارای ویژگی‌های زمین‌شیمیایی مشابه بازالت‌های مورب و مناطق آتشفشانی درون صفحه‌ی اقیانوسی می‌باشند (Esmaeili et al., 2020, 2022; Sourı et al., 2023). از آنجا که این نوع سنگ‌ها، به طور رایج در کمرندهای کوهزایی و در نوارهای دگرگونی یافت می‌شوند، مطالعه و تعیین دما و فشار دگرگونی آنها، نقش مهمی در درک تحولات تکتونوترمال و تکتونومتامورفیک پوسته قاره‌ای و همچنین بازسازی ژئودینامیکی کمرندهای کوهزایی دارد (Andreev et al., 2022). لذا در این پژوهش به بررسی شرایط دما و فشار حاکم بر دگرگونی آمفیبولیت‌های مکران با استفاده از تجزیه

کرتاسه‌ی زیرین- پسین، سنگ آهک‌های پلاژیک تا ریفی و ماسه سنگ‌های توربیدایتی است. آمفیبولیت‌ها به صورت عدسی‌هایی به طور ناپیوسته در مرزهای تراستی با دیگر بخش‌های افیولیتی رخمون دارند (شکل ۲) (Esmaeili et al., 2020, 2022).

موقعیت جغرافیایی در مکران شمالی قرار دارند (McCall, 2002) (شکل ۱). عمده قطعات پوسته اقیانوسی مرتبط با نئوتتیس رخمون یافته در مکران شامل گدازه‌های بالشی کرتاسه‌ی زیرین، توف‌های آندزیتی کرتاسه پسین، آندزیت‌ها، هیالوکلاسیت‌ها، ریوداسیت‌ها، توف‌ها، شیست‌های آبی، آمفیبولیت‌ها، سرپانتینیت‌ها، رادیولاریت‌های



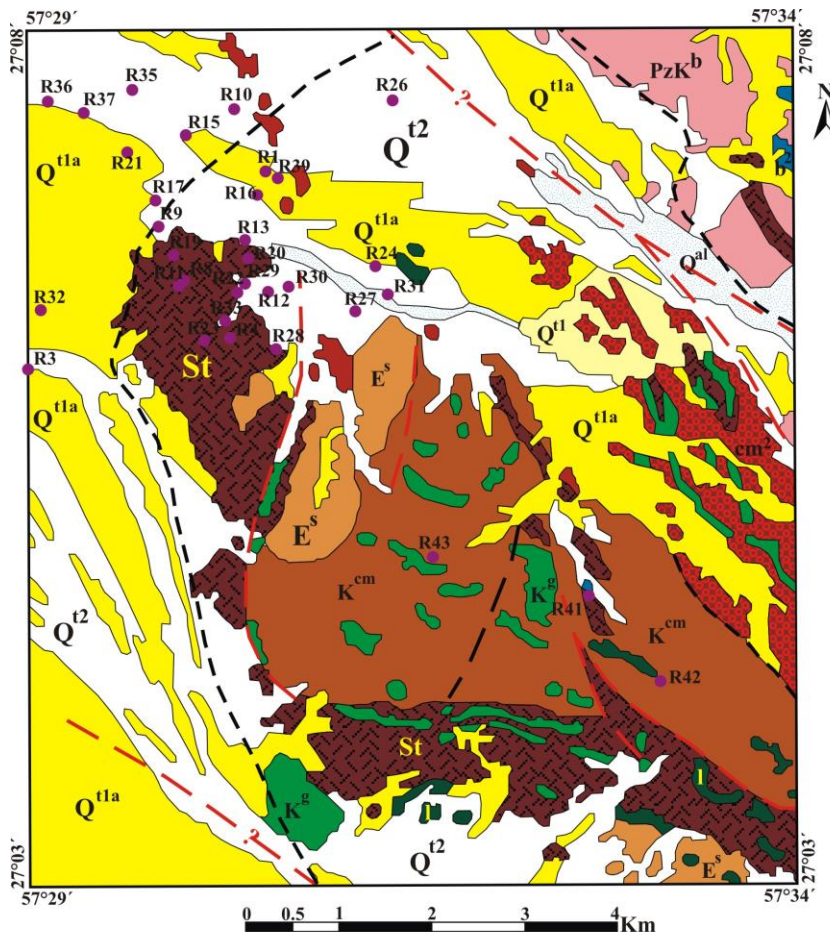
شکل ۱- نقشه ساده شده‌ای از واحدهای سنگی و ساختاری منشور برافزایشی مکران، جنوب ایران (McCall, 2002).

Fig. 1. The simplified map of lithological and structural units of the Makran accretionary prism (McCall, 2002).


















روش مطالعه

مقطع نازک - صیقلی از آمفیبولیت‌ها (شامل ۳ نمونه آمفیبولیت توده‌ای و ۱ نمونه آمفیبولیت جهت‌یافته) تهیه شد و ۶۲ نقطه از این کانی با استفاده از دستگاه الکترون میکروپروپروب Joel Jxa-8100 در موسسه زمین‌شناسی و زمین‌فیزیک، آکادمی علوم چین (IGG-CAS) با ولتاژ 15kV و شدت جریان 10-20 nA آنالیز شد.

مطالعات صحرایی در طی چندین مرحله با نمونه‌برداری ۱۶۰ نمونه دستی از انواع سنگ‌های آمفیبولیتی انجام شد. کارهای آزمایشگاهی شامل تهیه و مطالعه ۵۵ عدد مقطع نازک میکروسکپی از انواع سنگ‌های آمفیبولیتی است. برای بررسی شیمی کانی آمفیبول در این سنگ‌ها، تعداد ۴ عدد



Legend

- | | | | |
|---|--|--|-----------------------------|
|  | River channel alluvium and sheet wash. |  | Fault, position approximate |
|  | Low level piedmont fan and valley terrace deposits |  | Fault, position inferred |
|  | High level piedmont fan and valley terrace deposits dissected by Q ^{t2} , Q ^{al} erosion. |  | Major joint |
|  | High level piedmont fan and valley terrace deposits dissected by Q ^{t1a} erosion. |  | Animal track |
|  | Sandstone, siltstone, shale, limestone and conglomerate |  | Samples location |
|  | COLOURED MELANGE COMPLEX
Undifferentiated pelagic and terrigenous sediment, basic to intermediate volcanics, limestone, phyllite and intrusive rocks. | | |
|  | BASIC ASSOCIATION -basalt and basaltic andesite pillow lava, with minor clastic and pelagic sediment, phyllite and intrusive rocks. | | |
|  | Globotruncana limestone with radiolarian chert. | | |
|  | Undifferentiated, pelagic and recrystallised limestone. | | |
|  | Amphibolite | | |
|  | BAJGAN COMPLEX
Undifferentiated pelitic and psammitic schist, calc-silicate rock, recrystallised limestone, chlorite schist, phyllite and metabasic rocks. | | |
|  | Recrystallised limestone and minor pelitic schist. | | |

شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی ساده شده‌ای از منطقه مورد مطالعه براساس نقشه ۱:۲۵۰۰۰۰ میناب (Samimi Namin, 1983).

Fig. 2. The simplified geological map of the study area based on the Minab map, Scale 1:250000 (Samimi Namin, 1983).

تعداد کاتیون‌های موجود در فرمول ساختاری آمفیبول بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه شده‌اند. تعداد ۲۰ نقطه به عنوان نماینده آنالیزها شامل ۵ نقطه از آمفیبولیت‌های جهت‌یافته و ۱۵ نقطه از آمفیبولیت‌های توده‌ای در جدول ۱ آمده است.

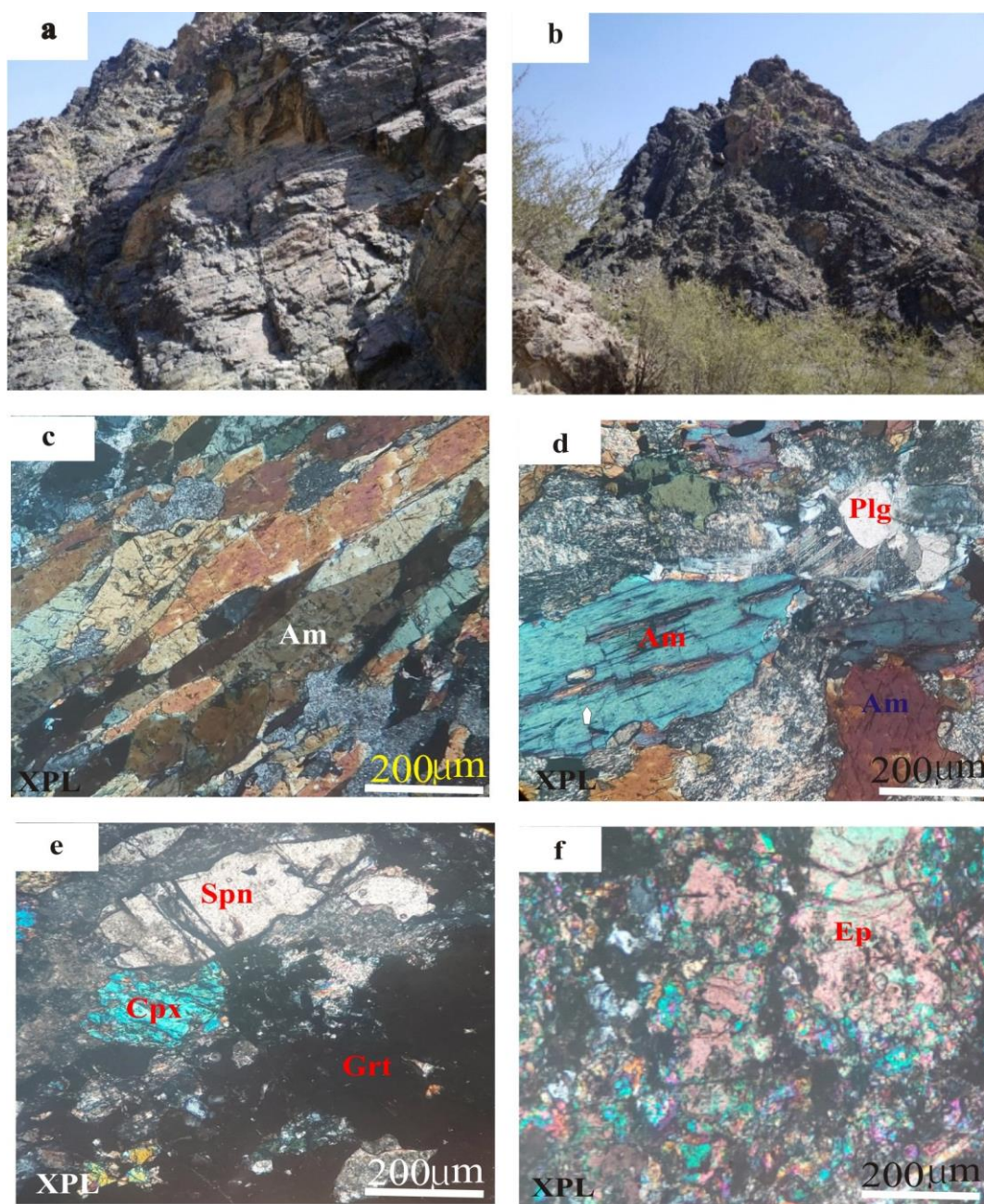
سنگ‌نگاری

از نظر ساختاری و ظاهری، سنگ‌های آمفیبولیتی مکران به دو صورت جهت‌یافته و توده‌ای یافت می‌شوند (شکل ۳- a, b). براساس کانی‌های شاخص دگرگونی، این سنگ‌ها شامل انواع آمفیبولیت (جهت‌یافته و توده‌ای)، گارنت-پیروکسن آمفیبولیت و اپیدوت-گارنت آمفیبولیت می‌باشند. هورنبلند و پلاژیوکلاز مهم‌ترین اجزای تشکیل دهنده‌ی این آمفیبولیت‌ها می‌باشند. کانی‌های گارنت، اپیدوت و کلینوپیروکسن نیز در برخی از نمونه‌ها یافت می‌شود.

آمفیبولیت: این سنگ‌ها گسترش فراوانی در منطقه دارند. نوع جهت‌یافته، به رنگ سبز تیره تا کاملاً تیره با بافت دانه‌ریز تا دانه‌درشت بوده و دارای برگوارگی با تناوبی از لایه‌های غنی از پلاژیوکلاز و لایه‌های غنی از هورنبلند هستند (شکل ۳- c). در برخی نمونه‌ها، کانی‌های هورنبلند به صورت پورفایروبلاست هستند که در پیرامون توسط آمفیبول‌های به نسبت دانه‌ریز و کشیده به موازات برگوارگی دربر گرفته شده‌اند. کانی‌های تشکیل‌دهنده آنها شامل آمفیبول، پلاژیوکلاز، زیرکن، آپاتیت، کوارتز و اسفن می‌باشد. آمفیبول و

پلاژیوکلاز بیشترین حجم سنگ را تشکیل می‌دهند. آمفیبول‌ها نیمه‌شکل‌دار تا بی‌شکل (۵۵ درصد حجمی) و دارای چندرنگی سبز زیتونی تا سبز روشن به صورت کشیده در امتداد برگوارگی هستند. پلاژیوکلازها (۴۰ درصد حجمی) به صورت نیمه‌شکل‌دار و بیشتر به کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند. کوارتز به صورت بی‌شکل به مقدار خیلی کم است. در نوع توده‌ای، به رنگ سبز تیره تا تیره با بافت دانه‌ریز تا دانه‌درشت بوده و کانی‌های تشکیل‌دهنده آنها همانند نوع جهت‌یافته می‌باشد. جهت‌یافتگی ترجیحی در نوع توده‌ای دیده نمی‌شود. آمفیبول‌ها (۶۰ درصد حجمی) اغلب درشت‌دانه می‌باشند (شکل ۳- d). بافت میکروسکپی متداول در این سنگ‌ها گرانوبلاستیک است اما بافت پوی کیلوبلاستیک نیز وجود دارد. پلاژیوکلازها به صورت نیمه‌شکل‌دار بیشتر به کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند. پلاژیوکلازهای دگرسان شده ۳۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. کوارتز با فراوانی کمتر از ۵ درصد حجمی به صورت بی‌شکل می‌باشد.

پیروکسن-گارنت آمفیبولیت: این سنگ‌ها به صورت توده‌ای به رنگ سبز روشن تا سبز تیره بوده و دارای بافت دانه‌ریز تا دانه‌درشت هستند. اندازه کانی گارنت در برخی از آنها به حد چند میلی‌متر می‌رسد. بافت اصلی سنگ گرانوبلاستیک و پورفایروگرانوبلاستیک بوده و در برخی نمونه‌ها، کانی گارنت به صورت پورفایروبلاست دیده می‌شود.



شکل ۳- (a) رخنمون صحرایی آمفیبولیت‌های جهت‌یافته در منطقه مکران. (b) رخنمون صحرایی آمفیبولیت‌های توده‌ای. (c) تصویر میکروسکوپی نمونه‌های آمفیبولیتی با جهت‌یافتگی مشخص (XPL). (d) تصویر میکروسکوپی آمفیبولیت‌های توده‌ای (XPL). (e) تصویر میکروسکوپی گارنت- پیروکسن آمفیبولیت (XPL). (f) تصویر میکروسکوپی اپیدوت - گارنت آمفیبولیت (XPL). علائم اختصاری (Kretz, 1983) شامل Cpx: کلینوپیروکسن، Am: آمفیبول، Grt: گارنت، Spn: اسفن و Ep: اپیدوت می‌باشد.

Fig. 3. a) Field photograph of foliated amphibolites in the Makran area. b) Field photograph of massive amphibolites. c) Photomicrograph of foliated amphibolites (XPL). d) Photomicrograph of massive amphibolites (XPL). e) Photomicrograph of garnet-pyroxene amphibolites (XPL). f) Photomicrograph of epidote-garnet amphibolite (XPL). Mineral abbreviations after Kretz (1983). Cpx: clinopyroxene, Am: amphibole, Grt: garnet, Spn: sphene, Ep: epidote.

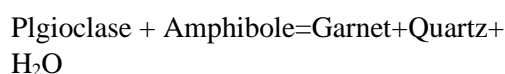
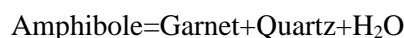
اپیدوت-گارنت آمفیبولیت: به صورت توده‌ای، به رنگ سبز روشن هستند که این رنگ به دلیل مقدار فراوان اپیدوت (۳۰ درصد حجمی) است. کانی‌های تشکیل دهنده‌ی این سنگ‌ها شامل آمفیبول، پلاژیوکلاز، اپیدوت، گارنت، پیروکسن، کوارتز و به مقدار کم کانی‌های کدر می‌باشد (شکل ۳-f). آمفیبول‌ها به رنگ سبز و بی‌شکل، ۱۵ درصد سنگ را تشکیل می‌دهند. پلاژیوکلازها (۲۵ درصد)، به صورت نیمه‌شکل‌دار بوده و بیشتر به کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند. اپیدوت (۳۰ درصد حجمی)، به صورت ریزدانه تا متوسط دانه، بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار با برجستگی بالا و رنگ سبز پسته‌ای دیده می‌شود. گارنت‌های موجود در این سنگ‌ها (۲۵ درصد حجمی)، با اندازه‌های متغیر و عمدتاً بدون شکل هندسی منظم هستند. پیروکسن‌ها از نوع کلینوپیروکسن کمتر از ۵ درصد حجمی سنگ را تشکیل می‌دهند. به طور کلی هورنبلند + پلاژیوکلاز ± کوارتز ± گارنت ± کلینوپیروکسن ± اپیدوت مجموعه کانی‌های مهم تشکیل دهنده این سنگ‌ها هستند.

بحث و نتایج

شیمی کانی آمفیبول

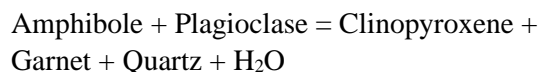
برای شناخت ترکیب شیمیایی، خاستگاه ژئودینامیکی و تعیین دما و فشار تبلور تعادلی مجموعه‌های کانیایی سنگ‌های آمفیبولیتی مکران، از تجزیه شیمیایی نقطه‌ای کانی آمفیبول (آمفیبولیت‌های توده‌ای و جهت‌یافته) استفاده

کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ‌ها شامل گارنت، پیروکسن، آمفیبول، پلاژیوکلاز، زیرکن، کوارتز، آپاتیت و اسفن می‌باشد (شکل ۳-e). در برخی نمونه‌ها، کانی گارنت به صورت پورفیروبلاست و دارای ادخال‌هایی از آمفیبول و پلاژیوکلاز هستند. بر پایه شواهد سنگ‌نگاری، ظهور گارنت به این صورت پیشنهاد می‌شود:



گارنت‌های موجود در این سنگ‌ها (۳۰ درصد حجمی) شکل هندسی خیلی منظمی ندارند و در تعادل بافتی با کلینوپیروکسن و آمفیبول در زمینه گرانوبلاستیک هستند. پلاژیوکلازها (۱۵ درصد)، به صورت نیمه‌شکل‌دار بوده و بیشتر به کانی‌های رسی و کلسیت دگرسان شده‌اند پیروکسن‌ها از نوع کلینوپیروکسن (حدود ۱۰ درصد) بوده و به صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار هستند. آمفیبول‌ها به صورت سبزرنگ، ۴۰ درصد حجمی سنگ را شامل می‌شوند. اسفن به صورت نیمه‌شکل‌دار تا شکل‌دار به وفور (حدود ۵ درصد) یافت می‌شود.

بر پایه شواهد سنگ‌نگاری و کانی‌شناسی واکنش‌های دگرگونی پیشرونده ظهور کلینوپیروکسن در سنگ‌های مورد مطالعه صورت زیرپیشنهاد می‌شود:



مقابل Ti (Leake et al., 2004) محدوده ترکیبی مگنزیوهورنبلند را نشان می‌دهند (شکل ۴-د). از ترکیب آمفیبول‌ها می‌توان برای تعیین منشأ و محیط تکتونوماگمایی نیز استفاده نمود. به طوری که بر اساس نمودار Ti در مقابل Si آمفیبول‌های مورد مطالعه، خاستگاه دگرگونی نشان می‌دهند (شکل ۵-ا). همچنین در نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} نیز این آمفیبول‌ها از نوع دگرگونی کلسیک می‌باشند (شکل ۵-ب). محیط زمین‌ساختی این کانی در نمودار درصد وزنی SiO_2 در برابر Na_2O (Coltorti et al., 2007) که دو محدوده آمفیبول‌های مناطق کششی درون صفحات (I-Amph) و مناطق فرورانشی (S-Amph) را از یکدیگر تفکیک می‌کند، در محدوده فرورانش قرار می‌گیرد (شکل ۵-ج). همچنین در نمودار Al^{IV} در مقابل نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ (Anderson and Smith, 1995) تمایل به بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن شاهدی بر تشکیل آنها در محیط فرافروانش می‌باشد (شکل ۵-د).

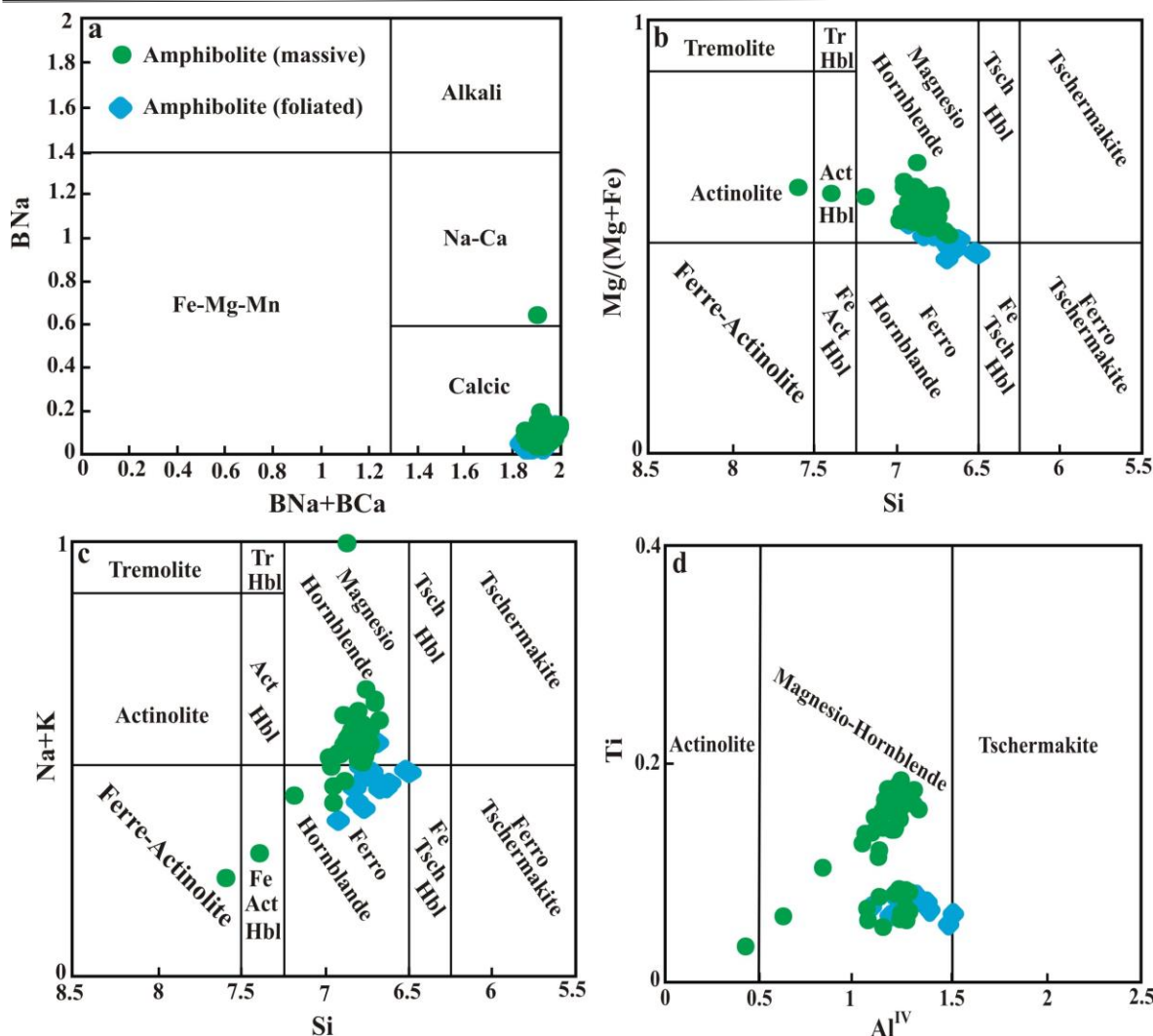
شده‌است. آمفیبول‌های آنالیز شده به تعداد ۶۲ نقطه، براساس فرمول ساختاری ۱۵ کاتیون $(15eCNK)T_1+T_2+M_1+M_2+M_3=15$ و ۲۳ اکسیژن محاسبه شده است (Hawthorne et al., 2012). طبقه‌بندی آمفیبول‌ها براساس روش مرجع که آمفیبول‌ها را براساس نوع عناصر در موقعیت B ساختار بلوری به چهار دسته تقسیم می‌کند، انجام شد که بر این اساس آمفیبول‌های مورد مطالعه در گروه آمفیبول‌های کلسیمی قرار می‌گیرند (Leake et al., 1997) (شکل ۴-ا و ۵-ب). نامگذاری آمفیبول‌ها براساس نمودار $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ نسبت به Si نشان می‌دهد که ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه عمدتاً دارای محدوده‌ی مگنزیو تا فروهورنبلند می‌باشد (Leake et al., 1997) (شکل ۴-ب). براساس نمودار (K+Na) در مقابل Si نیز آمفیبول‌ها عمدتاً در محدوده‌ی ترکیبی مگنزیو تا فروهورنبلند می‌باشند (Coleman et al., 1965) (شکل ۴-ج). همچنین براساس نمودار Al^{IV} در

جدول ۱- منتخبی از نتایج تجزیه ریزپردازش آمفیبول در آمفیبولیت‌های مکران.

Table 1. Representative EPMA data of amphibole in the Makran amphibolites.

Rock type	Amphibolite (foliated)					Amphibolite (massive)				
	S-28	S-28	S-28	S-28	S-28	S-38	S-38	S-38	S-38	S-38
No.	S-28	S-28	S-28	S-28	S-28	S-38	S-38	S-38	S-38	S-38
SiO₂	43.98	44.95	45.33	46.51	45.30	46.80	45.17	45.02	45.72	44.63
TiO₂	0.58	0.69	0.65	0.61	0.63	0.59	0.60	0.55	0.68	0.68
Al₂O₃	11.84	11.04	10.63	9.45	10.46	9.52	11.03	10.94	9.41	10.95
Cr₂O₃	0	0.06	0.01	0.02	0.05	0.04	0.07	0.03	0.20	0.12
FeO	17.48	15.53	17.66	16.82	17.56	12.9	13.7	13.79	13.36	14.43
MnO	0.14	0.18	0.20	0.28	0.15	0.30	0.19	0.12	0.23	0.15
MgO	9.58	9.75	9.95	10.58	10.11	12.22	11.39	11.3	12.05	10.59
CaO	11.91	11.69	11.81	11.84	11.89	12.06	12.02	11.8	11.86	11.74
Na₂O	1.27	1.13	1.09	1.05	1.28	1.34	1.60	1.49	1.35	1.56
K₂O	0.39	0.36	0.36	0.29	0.47	0.29	0.33	0.31	0.30	0.41
Total	97.15	95.39	97.69	97.44	97.89	96.06	96.10	95.36	95.16	95.25
Cations on the basis of 23 Oxygens										
XO	9.03	9.09	8.96	8.94	8.96	8.91	8.97	9.03	9.04	9.08
Si	6.61	6.80	6.76	6.92	6.75	6.94	6.74	6.77	6.88	6.75
Ti	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08	0.08
Al^{IV}	2.10	1.97	1.90	1.66	1.84	1.67	1.94	1.94	1.67	1.95
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
Fe	2.20	1.96	2.20	2.09	2.20	1.60	1.71	1.73	1.68	1.82
Mn	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02
Mg	2.15	2.20	2.21	2.35	2.25	2.70	2.54	2.53	2.70	2.39
Ca	1.92	1.90	1.89	1.89	1.90	1.92	1.92	1.90	1.91	1.90
Na	0.40	0.33	0.32	0.30	0.37	0.38	0.46	0.43	0.40	0.46
K	0.07	0.07	0.07	0.05	0.09	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08
Total	15.50	15.34	15.42	15.36	15.48	15.38	15.48	15.45	15.42	15.46
Si	6.61	6.80	6.76	6.92	6.75	6.94	6.74	6.77	6.88	6.75
Al^{IV}	1.39	1.20	1.24	1.08	1.25	1.06	1.26	1.23	1.12	1.25
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al^{VI}	0.71	0.77	0.63	0.58	0.60	0.61	0.68	0.71	0.55	0.70
Ti	0.06	0.08	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.08	0.08
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.00	0.02	0.01
Fe	2.20	1.96	2.20	2.09	2.19	1.60	1.71	1.73	1.68	1.82
Mn	0.02	0.02	0.02	0.04	0.02	0.04	0.02	0.02	0.03	0.02
Mg	2.15	2.20	2.21	2.35	2.25	2.70	2.54	2.53	2.70	2.39
C-site	5.14	5.04	5.15	5.12	5.12	5.02	5.03	5.05	5.06	5.02
C-5	0.14	0.04	0.15	0.12	0.12	0.02	0.03	0.05	0.06	0.02
Ca	1.92	1.90	1.89	1.89	1.90	1.92	1.92	1.90	1.91	1.90
Na	-0.05	0.07	-0.04	-0.01	-0.02	0.06	0.05	0.05	0.03	0.08
B-site	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.42	0.26	0.35	0.31	0.39	0.32	0.42	0.39	0.37	0.38
K	0.07	0.07	0.07	0.05	0.09	0.05	0.06	0.06	0.06	0.08
A-site	0.50	0.34	0.42	0.36	0.48	0.38	0.48	0.45	0.42	0.46

Table 1. (continued)	Amphibolite (massive)									
No.	S-14	S-14	S-14	S-14	S-14	S-08	S-08	S-08	S-08	S-08
SiO ₂	44.34	45.80	44.30	44.49	45.47	44.93	45.80	51.15	48.13	46.17
TiO ₂	1.43	1.19	1.39	1.43	1.60	1.63	1.44	0.29	0.93	1.50
Al ₂ O ₃	9.45	7.93	10.72	10.48	10.24	10.00	9.52	4.24	7.09	9.22
Cr ₂ O ₃	0.00	0.10	0.00	0.00	0.04	0.13	0.08	0.00	0.01	0.07
FeO	16.01	15.99	17.17	16.98	16.42	13.99	13.46	14.32	14.47	15.76
MnO	0.36	0.28	0.32	0.26	0.30	0.15	0.23	0.28	0.28	0.11
MgO	10.34	11.17	9.81	10.03	10.02	11.11	11.60	12.80	11.81	11.02
CaO	11.12	11.28	11.12	10.95	11.14	11.58	11.76	12.00	11.88	11.72
Na ₂ O	1.62	1.36	1.67	1.82	1.59	1.54	1.58	0.71	1.20	1.50
K ₂ O	0.51	0.43	0.52	0.53	0.51	0.56	0.51	0.13	0.37	0.56
Total	95.17	95.53	97.02	96.97	97.32	95.62	95.96	95.92	96.16	97.63
Cations on the basis of 23 Oxygens										
XO	9.19	9.12	9.05	9.04	8.96	9.04	8.98	8.91	8.96	8.91
Si	6.78	6.95	6.67	6.69	6.78	6.76	6.85	7.58	7.18	6.85
Ti	0.16	0.14	0.16	0.16	0.18	0.18	0.16	0.03	0.10	0.17
Al	1.70	1.42	1.90	1.86	1.80	1.77	1.68	0.74	1.25	1.61
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
Fe	2.05	2.03	2.16	2.14	2.05	1.76	1.68	1.78	1.80	1.95
Fe ³⁺	0.34	0.41	0.47	0.47	0.28	0.04	0.00	0.00	0.00	0.15
Fe ²⁺	1.70	1.60	1.68	1.64	1.76	1.72	1.68	1.78	1.81	1.80
Mn	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01
Mg	2.36	2.53	2.20	2.25	2.23	2.49	2.59	2.83	2.62	2.44
Ca	1.82	1.84	1.79	1.77	1.78	1.87	1.88	1.91	1.90	1.86
Na	0.48	0.40	0.49	0.53	0.46	0.45	0.46	0.20	0.35	0.43
K	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.02	0.07	0.11
Total	15.49	15.44	15.52	15.53	15.42	15.44	15.43	15.13	15.31	15.44
Si	6.78	6.95	6.67	6.69	6.78	6.76	6.85	7.58	7.18	6.85
Al ^{IV}	1.22	1.05	1.33	1.31	1.22	1.24	1.15	0.42	0.82	1.15
T-site	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00	8.00
Al ^{VI}	0.48	0.37	0.57	0.55	0.58	0.54	0.52	0.32	0.42	0.46
Ti	0.16	0.14	0.16	0.16	0.18	0.18	0.16	0.03	0.10	0.17
Cr	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02	0.01	0.00	0.00	0.01
Fe	2.05	2.03	2.16	2.14	2.05	1.76	1.68	1.78	1.80	1.95
Mn	0.05	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.04	0.03	0.01
Mg	2.36	2.53	2.20	2.25	2.23	2.49	2.59	2.83	2.62	2.44
C-site	5.10	5.12	5.13	5.13	5.08	5.01	4.99	5.00	4.99	5.04
C-5	0.10	0.12	0.13	0.13	0.08	0.01	-0.01	0.00	-0.01	0.04
Ca	1.82	1.84	1.79	1.77	1.78	1.87	1.88	1.91	1.90	1.86
Na	0.08	0.05	0.07	0.10	0.14	0.12	0.13	0.10	0.11	0.09
B-site	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00	2.00
Na	0.40	0.35	0.42	0.43	0.32	0.33	0.33	0.11	0.24	0.34
K	0.10	0.08	0.10	0.10	0.10	0.11	0.10	0.02	0.07	0.11
A-site	0.49	0.44	0.52	0.53	0.42	0.44	0.43	0.13	0.31	0.44



شکل ۴- نمودارهای طبقه‌بندی (Hawthorne et al., 2012) برای آمفیبولیت‌های مورد مطالعه. (a) نمودار (B) Na در برابر (Ca+Na)B نمودار (Leake et al., 1997). (b) نمودار نسبت $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ به Si (Leake et al., 1997). (c) نمودار K+Na در برابر Si (Coleman et al., 1965). (d) نمودار Ti برابر Al^{IV} (Leake et al., 2004).

Fig. 4. Classification diagrams (Hawthorne et al., 2012) for the studied amphibolites. a) Na (B) versus. (Ca+Na)B diagram (Leake et al., 1997). b) $Mg/(Mg + Fe^{2+})$ versus Si diagram (Leake et al., 1997). c) K+Na versus Si diagram (Coleman et al., 1965). d) Al^{IV} versus Ti diagram (Leake et al., 2004).

حساسیت توزیع عناصر در ساختار کانی‌ها و یا در

زمین‌دما- فشارسنجی

طی تبادلات شیمیایی، نسبت به دما و یا فشار

در دهه‌های اخیر، مطالعه و بررسی‌های

طراحی شده‌اند (Shirdashtzadeh and Samadi, 2010).

زمین‌دماسنجی و زمین‌فشارسنجی برای شناخت

هینز (Hynes, 1982) آمفیبول‌های کلسیک

شرایط دما و فشار تشکیل سنگ‌ها، به ویژه برای

را براساس Ti و Al به آمفیبول‌های فشار کم و

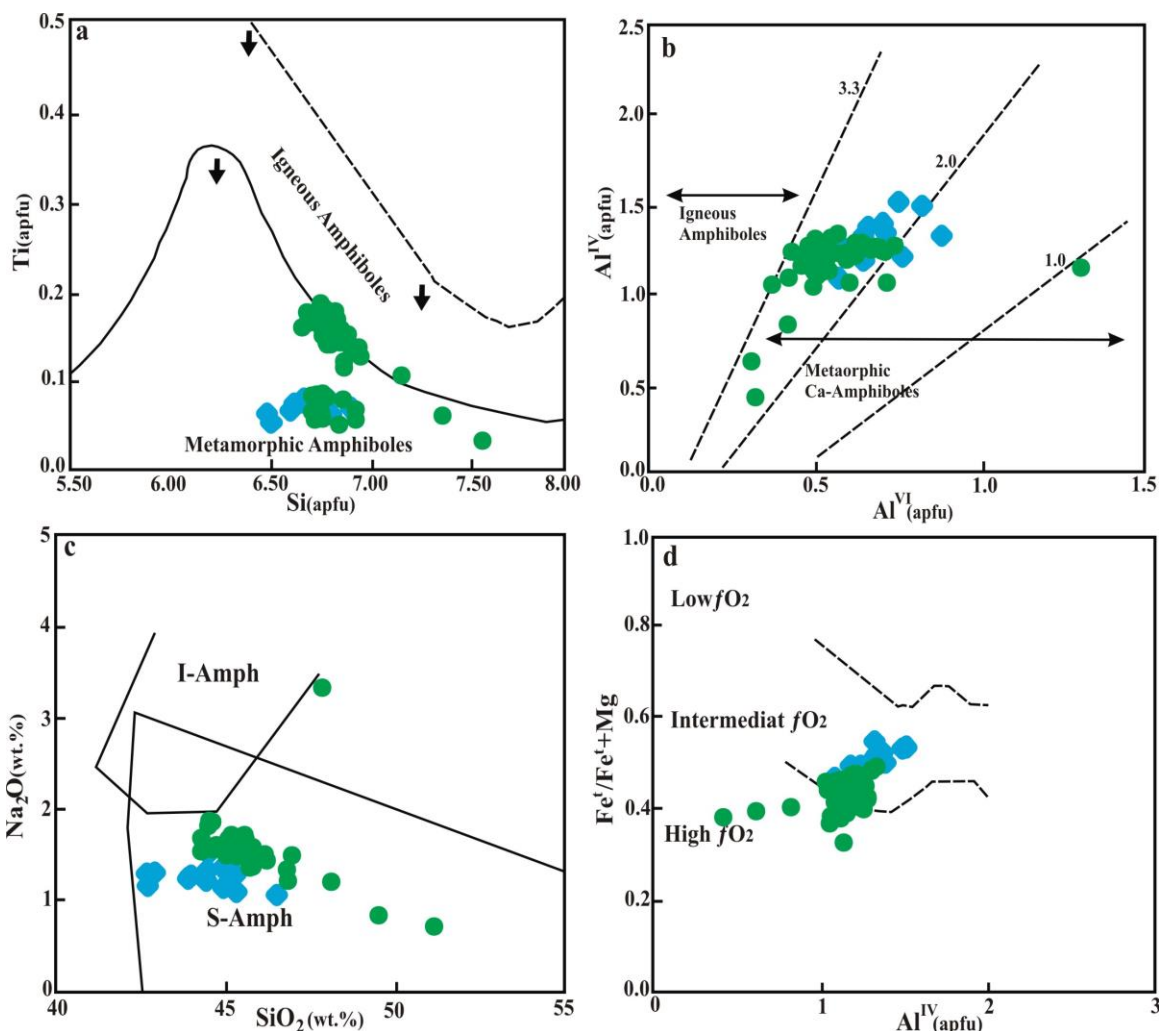
آمفیبولیت‌ها به دلیل حساسیت آنها به دما و فشار،

متوسط تقسیم نمود. در شکل ۶- a، همه نمونه‌های

بسیار مفید بوده است. این محاسبات براساس

می‌دهد که ترکیب آمفیبول‌های مورد مطالعه در رخساره‌ی فشار کم تا متوسط مطابق با محدوده‌ی آبوکوما ژاپن می‌باشند (Shido, 1958; Shido and Miyashiro, 1959).

آنالیز شده در محدوده‌ی فشار کم - متوسط قرار گرفته‌اند. همچنین براساس شکل ۶-b، آمفیبول‌های مورد بررسی از نوع آمفیبول‌های فشار متوسط هستند (Hynes, 1982). شکل ۶-c، نشان



شکل ۵-a - نمودار Ti در مقابل Si (Leake, 1965). b) نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} (Fleet and Barnett, 1978). c) نمودار SiO_2 در برابر Na_2O (Coltorti et al., 2007). d) نمودار Al^{IV} در مقابل نسبت $Fe/(Fe+Mg)$ و ارتباط آن با فوگاسیته اکسیژن در برابر Na_2O (Anderson and Smith, 1995). علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.

Fig. 5. A) Ti versus Si diagram (Leake, 1965). b) Al^{VI} versus Al^{IV} diagram (Fleet and Barnett, 1978). c) SiO_2 versus Na_2O (Coltorti et al., 2007). d) Al^{IV} versus $Fe/(Fe+Mg)$ diagram and its relationship with oxygen fugacity (Anderson and Smith, 1995). Symbols as in Fig. 4.

آلومینوم قرار می‌گیرند (Leake, 1965). به عبارت دیگر نمونه‌ها در همان محدوده‌ای قرار می‌گیرند که

شکل ۶-d، نیز بیانگر آن است که آمفیبول‌های مورد مطالعه در محدوده‌ی زیر خط حداکثر

در زون گارنت (Laird and Albee, 1981) قرار می‌گیرند که نشان می‌دهد کاتیون‌های Al, Na, K در آمفیبول‌ها بیشترین وابستگی به دما را نشان می‌دهند و Si نیز با افزایش دما کاهش می‌یابد. همچنین برای برآورد فشار تبلور آمفیبول از روش‌های مرسوم زمین‌شناسی بر اساس مقدار Al موجود در آمفیبول و فرمول‌های زیر استفاده شد که نتایج در جدول ۲ آمده است. در همه این چهار روش فشار موجود در محیط فقط به مقدار Al کل نسبت داده شده و سایر پارامترها مثل دمای محیط و... در نظر گرفته نشده است.

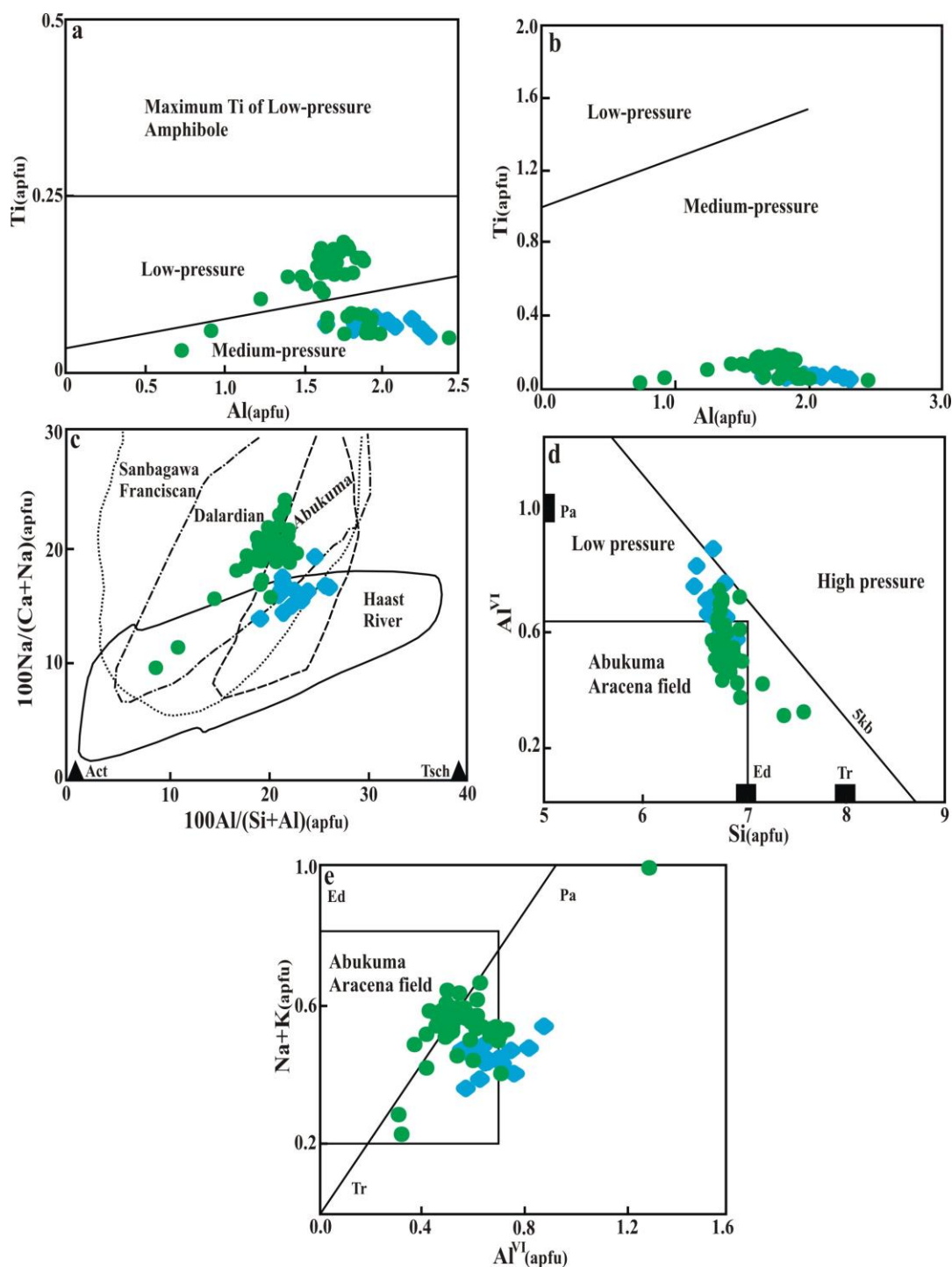
1. $P (\pm 3 \text{ kbar}) = -3.92 + 5.03Al^{tot}$ (Hammarstrom and Zen, 1986)
2. $P (\pm 1.0 \text{ kbar}) = 4.76 + 5.64Al^{tot}$ (Hollister et al., 1987)
3. $P (\pm 0.5 \text{ kbar}) = -3.46 + 4.23Al^{tot}$ (Johnson and Rutherford, 1989)
4. $P (\pm 0.6 \text{ kbar}) = -3.01 + 4.76Al^{tot}$ (Schmidt, 1992)

سنگ‌های منطقه‌ی مکران به دست آمده است (شکل ۹-ا). با توجه به مقادیر Al^{IV} نسبت به مقدار فشار (Johnson and Rutherford, 1989)، نیز گستره دمایی ۷۵۰-۸۰۰ درجه سانتی‌گراد برای آمفیبول‌های مورد بررسی برآورد شده است (شکل ۹-ب).

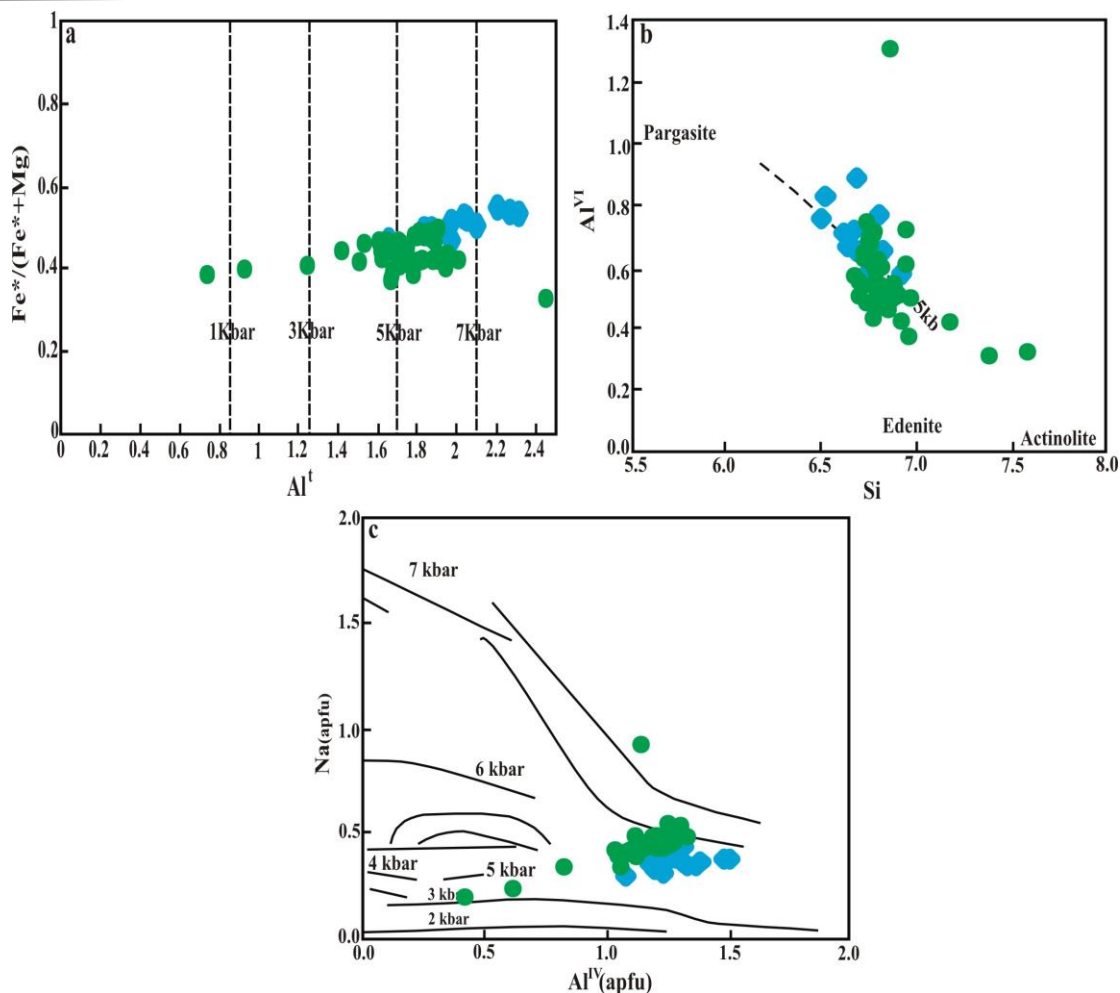
مطابق با محدوده‌های دما بالا- فشار کم (آبوکوما در ژاپن و آراسنا در اسپانیا) با مقدار Si بین ۶/۳ تا ۶/۸ اما مقادیر Al^{VI} کمی بالاتر قرار دارند. براساس نمودار Na+K در مقابل Al^{VI} ، آمفیبول‌های مورد مطالعه عمدتاً در محدوده‌ی آبوکوما و آراسنا هستند (شکل ۶-ع).

نمودارهای Al^{tot} در مقابل نسبت Fe^*/Fe^*+Mg (Schmidt, 1992) (شکل ۷-ا)، Al^{VI} در مقابل Si (Raase, 1974) (شکل ۷-ب) و نسبت Na_{M4} در مقابل Al^{IV} (Brown, 1977) (شکل ۷-ج)، فشار $7 \text{ kbar} \leq$ (۴ تا ۶ کیلوبار) را نشان می‌دهند. با توجه به شکل ۸-ا، b، آمفیبول‌های مورد مطالعه

برای محاسبه دمای تشکیل آمفیبول‌ها براساس تغییرات مقدار آلومینیوم نسبت به Ti در واحد فرمولی آمفیبول‌ها از روش هلز (Helz, 1973) استفاده شده است (شکل ۹-ا). با استفاده از تغییرات Al^{IV} نسبت به Ti، دمای ۷۵۰-۸۰۰ درجه‌ی سانتی‌گراد برای تبلور آمفیبول موجود در



شکل ۶- a و b) نمودار Ti در مقابل Al (Hynes, 1982). c) نمودار 100 Na/(Ca+Na) در برابر 100 Al/(Si+Al) (Laird and Albee, 1981). d) نمودار Al^{VI} در برابر Si (Leake, 1965). e) نمودار Na+K در مقابل Al^{VI}. علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.
 Laird and Albee (1981) نمودار 100 Na/(Ca+Na) در برابر 100 Al/(Si+Al) (Laird and Albee, 1981). d) نمودار Al^{VI} در برابر Si (Leake, 1965). e) نمودار Na+K در مقابل Al^{VI}. علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.
 Tsch: Tschermakite, Act: Actinolite, Tr: Tremolite, Ed: Edenite, Pa: Pargasite.
 Fig. 6. a, b) Ti versus Al diagram (Hynes, 1982). c) 100 Na/(Ca+Na) versus 100 Al/(Si+Al) diagram (Laird and Albee, 1981). d) The Al^{VI} versus Si diagram (Leake, 1965). e) Al^{VI} versus Na+K diagram. Symbols as in Fig. 4. Tsch: Tschermakite, Act: Actinolite, Tr: Tremolite, Ed: Edenite, Pa: Pargasite.



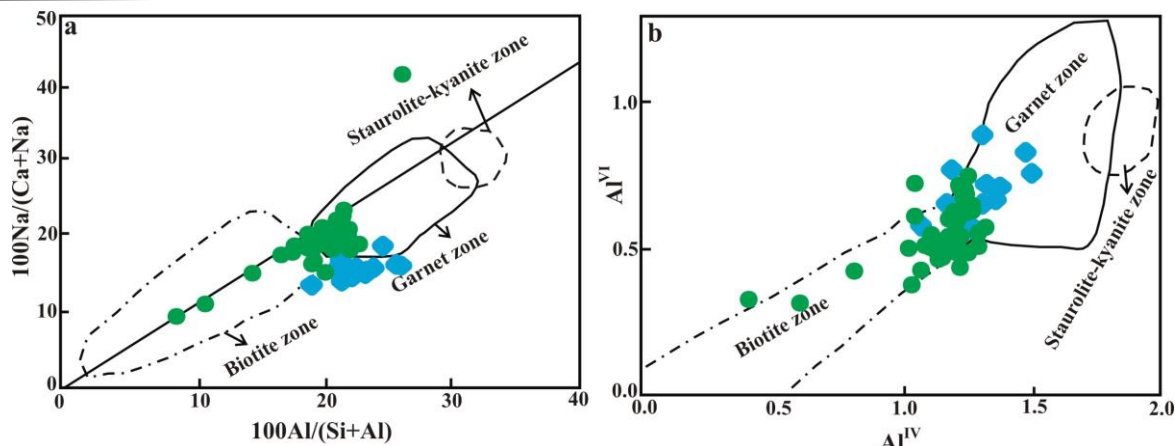
شکل ۷-ا- نمودار Al^I در مقابل نسبت $Fe^*/(Fe^*+Mg)$ (Schmidt, 1992). ب) نمودار Al^{VI} در برابر Si (Raase, 1974). ج) نمودار $Na_{(M4)}$ در برابر Al^{IV} (Brown, 1977). علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.

Fig. 6. a) Al^I versus $Fe^*/(Fe^*+Mg)$ diagram (Schmidt, 1992). b) Al^{VI} versus Si diagram (Raase, 1974). c) $Na_{(M4)}$ vs. Al^{IV} (Brown, 1977). Symbols as in Fig. 4.

جدول ۲- محاسبه فشار تشکیل بلورهای آمفیبول در آمفیبولیت‌های مکران به روش‌های مختلف.

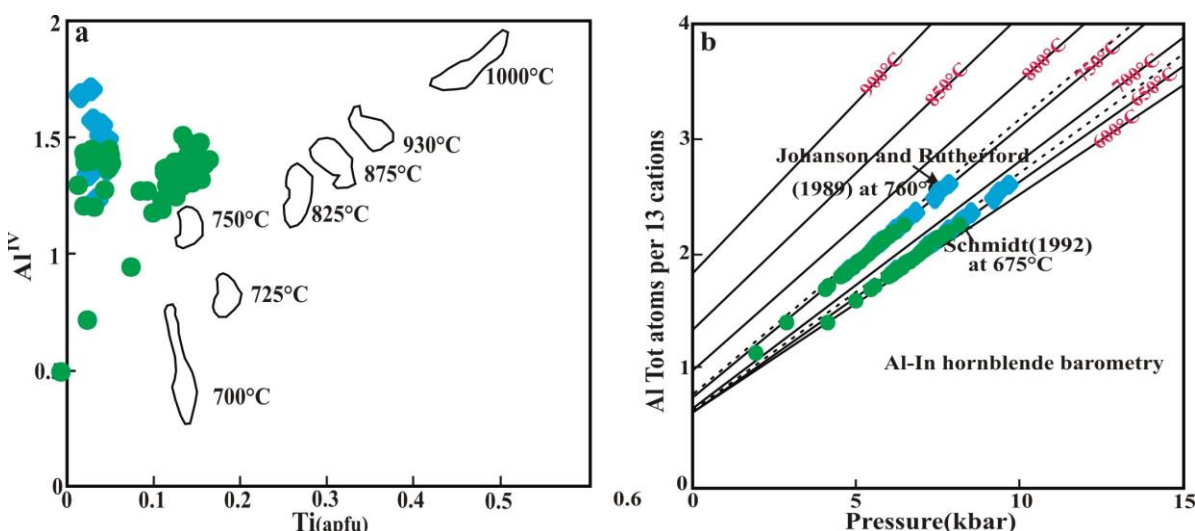
Table 2. Geobarometry of amphibole in the Makran amphibolites by different methods.

P (kbar)	max(kbar)	min(kbar)	Ave.(kbar)
Hammarstrom and Zen (1986)	7.62	2.35	4.98
Hollister et al. (1987)	8.18	2.27	5.22
Johnson and Rutherford (1987)	6.24	1.81	4.02
Schmidt (1992)	7.91	2.92	5.42



شکل ۸- a) نمودار $100\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Na})$ در مقابل $100\text{Al}/(\text{Si}+\text{Al})$ (Laird and Albee, 1981). b) نمودار Al^{VI} در مقابل Al^{IV} (Laird and Albee, 1981). علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.

Fig. 8. a) $100\text{Na}/(\text{Ca}+\text{Na})$ versus $100\text{Al}/(\text{Si}+\text{Al})$ diagram (Laird and Albee, 1981). b) Al^{VI} versus Al^{IV} diagram (Laird and Albee, 1981). Symbols as in Fig. 4.



شکل ۹- a) نمودار Al^{IV} در مقابل Ti (Helz, 1973). b) گستره دمایی تبلور آمفیبول‌های مورد بررسی بر اساس نمودار Al^{I} نسبت به مقادیر فشار (Johnson and Rutherford, 1989). علائم مشابه شکل ۴ می‌باشند.

Fig. 8. a) Al^{IV} versus Ti diagram (Helz, 1973). b) Temperature range of crystallization of the studied amphiboles based on the Al^{I} versus pressure diagram (Johnson and Rutherford, 1989). Symbols as in Fig. 4.

می‌باشند. براساس نتایج آنالیز ریزکاوالکترونی، ترکیب آمفیبول عمدتاً مگنزیم تا فروهورنبلند و از نوع کلسیک هستند. براساس بررسی‌های زمین دما - فشارسنجی آمفیبول‌ها، فشار $7 \text{ kbar} \leq (4 \text{ تا } 6 \text{ کیلو بار})$ و بازه دمایی $750\text{--}800$ درجه سانتی‌گراد

نتیجه‌گیری

سنگ‌های آمفیبولیتی موجود در منطقه مکران به دو صورت جهت‌یافته و توده‌ای دیده می‌شوند و بر اساس کانی‌های شاخص شامل آمفیبولیت، گارنت-پیروکسن آمفیبولیت و اپیدوت-گارنت آمفیبولیت

فشار کم تا متوسط (دگرگونی نوع آبوکوما) مطابقت دارد.

برای تبلور آنها برآورد گردیده است. لذا این سنگ‌ها در حد رخساره‌های دگرگونی فشار کم تا متوسط دگرگون شده‌اند که با رخداد دگرگونی دما بالا-

References

- Anderson, J.L., Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and fO_2 on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80, 549-559.
- Andreev, A. A., Rytsk, E. Yu., Velikoslavinskii, S. D., Tolmacheva, E. V., Bogomolov, E. S., Lebedeva, Y.M., Fedoseenko, A. M., 2022. Age, Composition, and Tectonic Setting of the Formation of Late Neoproterozoic (Late Baikalian) Complexes in the Kichera Zone, Baikal-Vitim Belt, Northern Baikal Area: Geological, Geochronological, and Nd Isotope Data. *Petrology* 30 (4), 337-368.
- Bucher, K., Frey, M., 1994. *Petrogenesis of Metamorphic Rocks* (6th edn). Springer Verlag: Berlin, 318p.
- Brown, E. H., 1977. The crossite content of Ca-amphibole as a guide to pressure of metamorphism. *Journal of Petrology* 18 (1), 53-72.
- Coleman, R. G., Lee, D. E., Beatty, L. B., Brannock, W. W., 1965. Eclogites and eclogites: their differences and similarities. *Geological Society of America Bulletin* 76, 483-508.
- Coltorti, M., Bonadiman, C., Faccini, B., Grégoire, M., O'Reilly, S.Y., Powell, W., 2007. Amphiboles from suprasubduction and intraplate lithospheric mantle. *Lithos* 99 (1-2), 68-84.
- Dolati, A., 2010. Stratigraphy, structural geology and low-temperature thermochronology across the Makran accretionary wedge in Iran. *Diss ETH*, No. 19151, 215p.
- Esmaili, R., Xiao, W., Griffin, W. L., Moghadam, H. S., Zhang, Z., Ebrahimi, M., Bhandari, S., 2020. Reconstructing the source and growth of the Makran accretionary complex: Constraints from detrital zircon U-Pb geochronology. *Tectonics* 39(2), e2019TC005963.
- Esmaili, R., Ao, S., Shafaii Moghadam, H., Zhang, Z., Griffin, W. L., Ebrahimi, M., Bhandari, S., 2022. Amphibolites from Makran accretionary complex record Permian-Triassic Neo-Tethyan evolution. *International Geology Review* 64(11), 1594-1610.
- Evans, B.W., Leake, B.E., 1960. The composition and origin of the striped amphibolites of Connemara, Ireland. *Petrology* 1, 337-363.
- Fleet, M.E., Barnett, R.L., 1978. Al^{IV}/Al^{VI} partitioning in calciferous amphiboles from the Froid mine, Sudbury, Ontario. *The Canadian Mineralogist* 16, 527-532.
- Johnson, M.C., Rutherford, M.J., 1989. Experimentally calibration of the aluminum-in-hornblende geobarometer with application to Long Valley caldera (California) volcanic rocks. *Geology* 17, 837-841.
- Hammarstrom, J.M., Zen, E., 1986. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer. *American Mineralogist* 71, 1297-1331.
- Hawthorne, F.C., Oberti, R., Harlow, G.E., Maresch, W.V., Martin, R.F., Schumacher, J.C., Welch, M.D., 2012. Nomenclature of the amphibole supergroup. *American Mineralogist* 97, 2031-2048.
- Helz, R., 1973. Phase reactions of basalts in their melting range at $PH_2O = 5kb$, Part 11, Melt composition. *Journal of Petrology* 17, 139-193.
- Hollister, L.S., Grissom, G.E., Peters, E.K., Stowell, H.H., Sisson, V. R., 1987. Confirmation of the empirical correlation of AI in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist* 72, 231-239.

- Hunziker, D., 2014. Magmatic and Metamorphic History of the North Makran Ophiolites and Blueschists (SE Iran): Influence of Fe³⁺/Fe²⁺ Ratios in Blueschist Facies Minerals on Geothermobarometric Calculations, ETH Zurich, Switzerland, Zürich (ETH-Zürich 364 pp).
- Hynes, A., 1982. A comparison of amphiboles from medium and low pressure metabasite. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 81, 119-125.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68, 277-279.
- Laird, J., Albee, A.L., 1981. Pressure, temperature, and time indicators in mafic schist; their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont. *American Journal of Science* 281 (2), 127-175.
- Leake, B. E., 1965. The relationship between composition of calciferous amphibole and grade of metamorphism. *Controls of metamorphism* 11965, 2997318.
- 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., Maresch, W.V., Nickel, E.H., Rock, N.M.S., Schumacher, J.C., Smith, D.C., Shephenson, N.C.N., Ungaretti, L., Whittake, E.J.W., Youzhi, G., 1997. Nomenclature of amphiboles; report of the subcommittee on amphiboles of the International Mineralogical Association, Commission on New Minerals and Mineral Names. *The Canadian Mineralogist* 35(1), 219-246.
- Leake, B.E., Woolley, A.R., Birch, W.D., Burke, E.A., Ferraris, G., Grice, J.D., Whittaker, E.J., 2004. Nomenclature of amphiboles: Additions and revisions to the international mineralogical association's amphibole nomenclature. *American Mineralogist* 89, 883-887.
- McCall, G.J.H., 1983. Mélanges of the Makran, southeastern Iran. In: McCall, G.J.H. (Ed.), *Ophiolitic and Related Mélanges*, Hutchinson Ross Publishing Company, Stroudsburg, Pennsylvania, 292-299.
- McCall, G.J.H., 1997. The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 15 (6), 517-531.
- McCall, G.J.H., 2002. A summary of the geology of the Iranian Makran: Tectonic and Climatic. *Evolution of the Arabian Sea Region* 195, 147-204.
- McCall, G., Kidd, R., 1982. The Makran, Southeastern Iran: the anatomy of a convergent plate margin active from Cretaceous to Present. *Geological Society, London, Special Publications* 10(1), 387-397.
- Monsef, I., Rahgoshay, M., Pirouz, M., Chiaradia, M., Grégoire, M., Ceuleneer, G. 2019. The Eastern Makran Ophiolite (SE Iran): Evidence for a Late Cretaceous fore-arc oceanic crust. *International Geology Review* 61(11), 1313-1339.
- Raase, P., 1974. Al and Ti Contents of Hornblende, Indicators of Pressure and Temperature of Regional Metamorphism. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 45(3), 231-236.
- Samimi Namin, M., 1983. Geological Map of Minab, 1:250000 Scale. Geological Survey of Iran.
- 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.
- Schulz, B., Triboulet, C., Audren, C., 1995. Microstructures and mineral chemistry in amphibolites from the western Tauern Window (Eastern Alps) and P-T-deformation paths of the Alpine greenschist-amphibolite facies metamorphism. *Mineralogical Magazine* 59, 641- 659.
- Shido, F., 1958. Plutonic and metamorphic rocks of the Nakoso and Iritono districts in the central Abukuma Plateau. *Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo, Section II* 11, 131-217.

- Shido, F., Miyashiro, A., 1959. Hornblendes of basic metamorphic rocks. *Journal of the Faculty of Science, University of Tokyo, Section II* 12, 85-102.
- Shirdastzadeh, N., Samadi, R., 2010. An introduction to methods of geothermometry and geobarometry. *Zaminazmoon*, 99p.
- Souri, M., Ahmadi-Khalaji, A., Ebrahimi, M., Esmaceli, R., 2023. Petrology and geochemistry of the amphibolites from Makran accretionary complex, Southeast of Iran. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (IJCM)* 31 (1), 45-58. (in Persian)
- Spear, F.S., 1991. On the interpretation of peak metamorphic temperatures in light of garnet diffusion during cooling. *Journal of Metamorphic Geology* 9, 379-388.
- Triboulet, C., 1992. The (Na-Ca) amphibole-albite-chlorite-epidote-quartz geothermobarometer in the system S-A-F-M-C-N-H₂O. 1. An empirical calibration. *Journal of Metamorphic Geology* 10, 545-556.
- Triboulet, C., Audren, C., 1988. Controls on P-T-t deformation path from amphibole zonations during progressive metamorphism of basic rocks (estuary of the River Vilaine, South Brittany, France). *Journal of Metamorphic Geology* 6, 117-133.
- Winter, C., 2001. *An Introduction to Igneous and Metamorphic Petrology*. Prentice Hall, 697p.
- Zenk, M., Schulz, B., 2004. Zoned Ca-amphiboles and related P-T evolution in metabasites from the classical Barrovian metamorphic zones in Scotland. *Mineralogical Magazine* 68, 769.