

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	Abstract
Article history	Amphibolites are a major component of the northern Makran ophiolite belts.
Received: 20 December 2022 Accepted: 26 February 2023	They include both foliated and massive types. They are diverse in mineralogy and
Keywords:	include amphibolite, garnet-pyroxene amphibolite, and epidote-garnet amphibolite.
amphibole, geothermobarometry, mineral chemistry, amphibolite, Makran.	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 temperature-pressure the 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**



The studied amphibolites are located in the northern Makran zone (southeastern Iran). Amphibolites are mainly found in Baigan-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 Cretaceous volcanic the 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 JXA-8900 electron **JEOL** 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

Amphibole mineral chemistry of the amphibolites ...

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 porphyrogranoblastic. The minerals and 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%.

DOI: 10.22034/KJES.2023.8.2.105432

Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2024-05-14]

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^t 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^t vs. Fe*/Fe*+Mg, Al^{v1} vs. Si and Na_{M4} vs. Al^{1v}

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^t 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 \leq 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



- Souri, M., Ahmadi-Khalaji, A., Ebrahimi, M., Esmaeili, 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 (جنوبشرق ایران)

مریم سوری^۱، احمد احمدی خلجی^{*۲}، جیامین وانگ^۳، رسول اسمعیلی^۴، محمد ابراهیمی⁴

۱. دانشجوی دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه لرستان

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

۳. استاد، موسسه زمین شناسی و زمین فیزیک، آکادمی علوم چین

۴. دکتری، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان

۵. دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه زنجان

جكيده اطلاعات مقاله

تاريخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۱/۰۹/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷ واژه های کلیدی

سنجی، شیمی کانی،



آمفیبولیتها بخشی از سنگهای دگرگونی کمربند افیولیتی مکران شمالی را تشکیل میدهند که به دو صورت جهتیافته و تودهای یافت میشوند. براساس کانیهای شاخص، این سنگها شامل آمفیبولیت، گارنت-پیروکسن آمفیبولیت و اپیدوت-گارنت آمفیبولیت هستند. کانیهای اصلی تشکیل دهنده آنها شامل آمفیبول، گارنت، پلاژیوکلاز، پيروكسن، اپيدوت، كوارتز و اسفن مىباشد. براساس شيمى كانى، آمفيبول در اين سنگها از نوع كلسيك بوده و عمدتا ترکیبی در محدودهی مگنزیو تا فروهورنبلند دارد. محاسبات تعیین دما -فشار آمفیبولها، فشار $kbar \leq v$ (kbar) ۶-۴ و گستره دمایی ۲۰۰–۷۵۰ درجه سانتی گراد را نشان میدهند. بدین ترتیب بررسی های زمین دما -فشارسنجی این کانی نشان میدهد که آمفیبولیتهای مکران در رخسارههای دگرگونی دمای بالا و فشار کم تا متوسط (دگرگونی نوع آبوکوما) دگرگون شدهاند.

مقدمه

است. آمفیبولیتها از جمله سنگهای دگرگونی پهنه مکران با گستردگی وسیع (با طول حدود هستند که در اکثر مناطق دگرگونی یافت میشوند. ۸۰۰ و عرض حدود ۴۰۰ کیلومتر)، در جنوب فرورفتگی جازموریان قرار گرفته است (شکل ۱). در این پهنه، علاوه بر رخنمون وسیع سنگهای نادگرگونه افیولیتی و غیرافیولیتی، انواع سنگهای دگرگونی با درجات مختلف دگرگونی دیده میشود. رخنمون عمده این سنگها در زون مکران شمالی

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) Triboulet and Audren, 1988;) استفاده مي شود Schulz et al., 1995; Triboulet, 1992; Zenk and DOI http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432

«نویسنده مسئول: احمد احمدی خلجی hmadikhalaj.a@lu.ac.ir «نویسنده مسئول احمد احمدی خلجی

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. (†)(\$ CC http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.105432

Schulz, 2004). بررسی آمفیبولیتها به ویژه ارتوآمفيبوليتها از ديرباز مورد توجه پژوهشگران Evans and Leake, 1960; Bucher) بوده است and Frey, 1994; Winter, 2001). بر روى آمفيبوليتهاى مكران، مطالعات بسيار محدودي صورت گرفته (Esmaeili et al., 2020, 2022;) صورت گرفته Souri et al., 2023) و بيشتر مطالعات انجام گرفته در این منطقه برروی 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 کششی ایجاد شدهاند (Esmaeili et al., 2022). مطالعات زمین شیمیایی آمفيبوليتهاى منطقه مورد مطالعه نشان مىدهد این سنگها دارای خاستگاه آذرین با ترکیب بازالتی از نوع اقیانوسی بوده که از یک گوشتهی غنی شده منشأ گرفتهاند و دارای ویژگیهای زمین شیمیایی مشابه بازالتهای مورب و مناطق آتشقشانی درون صفحهی اقیانوسی می باشند (Esmaeili et al., 2020, 2022; Souri et al., 2023). از آنجا که این نوع سنگها، به طور رایج در کمربندهای کوهزایی و در نوارهای دگرگونی یافت میشوند، مطالعه و تعیین دما و فشار دگرگونی آنها، نقش مهمی در درک تحولات تكتونوترمال و تكتونومتامورفيك پوسته قارهای و همچنین بازسازی ژئودینامیکی کمربندهای 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

شیمیایی نقطهای (ریزپردازنده الکترونی) کانی آمفیبول پرداخته شدهاست که میتواند گام موثری در روشن ساختن رخدادهای زمینشناسی در منطقه باشد.

زمين شناسي عمومي

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-مختار آباد، بندزیارت، تیدار، باجگان-دورکان، مسکوتان و ... بعضاً با توالی کاملی از افیولیتهای كمتر دگرگون شده برونزد دارند. آمفیبولیتها عمدتاً در باجگان- دورکان دیده می شوند. سیستم فرورانشی/ برافزایشی مکران در ایران از شمال به جنوب شامل این بخش هاست: 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: مكران شمالي، مكران دروني، مكران بيروني و مكران ساحلي است (Dolati, 2010) (شکل ۱). آمفیبولیتهای مورد مطالعه از نظر تقسیمات ساختاری در پهنه مکران و از لحاظ

شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیتهای مجموعه برافزایشی ...

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 Esmaeili et al., 2020,) (کریوی). 2022).

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



شكل ۱- نقشه ساده شدهاى از واحدهاى سنگى و ساختارى منشور برافزايشى مكران، جنوب ايران (McCall, 2002). Fig. 1. The simplified map of lithological and structural units of the Makran accretionary prism (McCall, 2002).

مقطع نازک – صیقلی از آمفیبولیتها (شامل ۳ نمونه آمفیبولیت تودهای و ۱ نمونه آمفیبولیت جهتیافته) تهیه شد و ۶۲ نقطه از این کانی با Joel Jxa استفاده از دستگاه الکترون مایکروپروب-Joel Jxa استفاده از دستگاه الکترون مایکروپروب-138 استفادمی علوم چین (IGG-CAS) با ولتاژ 15kV و شدت جریان Na 20-10 آنالیز شد.

روش مطالعه

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



شکل ۲- نقشه زمین شناسی 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 می شوند (شکل ۳– ۵، ۵). براساس کانی های شاخص دگرگونی، این سنگها شامل انواع آمفیبولیت (جهتیافته و تودهای)، گارنت- پیروکسن آمفیبولیت و اپیدوت-گارنت آمفیبولیت می باشند. هورنبلند و پلاژیوکلاز مهم ترین اجزای تشکیل دهنده ی این آمفیبولیتها می باشند. کانی های گارنت، اپیدوت و کلینوپیروکسن نیز در برخی از نمونه ها یافت می شود.

امفیبولیت: 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– ۲). در پرخی نمونهها، کانیهای هورنبلند به صورت پورفیروبلاست 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. آمفيبولها نيمهشكلدار تا بىشكل (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 بی شکل به مقدار خیلی کم است. در نوع تودهای، به رنگ سبز تیره تا تیره با بافت دانهریز تا دانهدرشت بوده و کانیهای تشكيل دهنده آنها همانند نوع جهتيافته مي باشد. جهتیافتگی ترجیحی در نوع تودهای دیده نمیشود. آمفیبولها (۶۰ درصد حجمی) اغلب درشتدانه مىباشند (شكل ۳– d). بافت ميكروسكپى متداول در این سنگها گرانوبلاستیک است اما بافت پویی کیلوبلاستیک نیز وجود دارد. پلاژیو کلازها به صورت نیمهشکلدار بیشتر به کانیهای رسی و كلسيت دگرسان شدهاند. پلاژيوكلازهاي دگرسان شده ۳۰ درصد حجمی سنگ را تشکیل میدهند. کوارتز با فراوانی کمتر از ۵ درصد حجمی به صورت بی شکل میباشد.

پیروکسن-گارنت آمفیبولیت: این سنگها به صورت تودهای به رنگ سبز روشن تا سبز تیره بوده و دارای بافت دانه ریز تا دانه درشت هستند. اندازه کانی گارنت در برخی از آنها به حد چند میلیمتر میرسد. بافت اصلی سنگ گرانوبلاستیک و پورفیروگرانوبلاستیک بوده و در برخی نمونهها، کانی گارنت به صورت پورفیروبلاست دیده می شود.



شكل ۳- a) رخنمون صحرایی آمفیبولیتهای جهتیافته در منطقه مكران. b) رخنمون صحرایی آمفیبولیتهای تودهای. c) تصویر میكروسكوپی نمونههای آمفیبولیتی با جهتیافتگی مشخص (XPL). b) تصویر میكروسكوپی آمفیبولیتهای تودهای (XPL). e) تصویر میكروسكوپی گارنت- پیروكسن آمفیبولیت (XPL). f) تصویر میكروسكوپی اپیدوت - گارنت آمفیبولیت (XPL). علائم اختصاری (Kretz, 1983) شامل Cpx: كلینوپیروكسن، 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.

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:

Amphibole=Garnet+Quartz+H₂O Plgioclase + Amphibole=Garnet+Quartz+ H₂O

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 بی شکل 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:

$$\label{eq:amphibole} \begin{split} Amphibole + Plagioclase = Clinopyroxene + \\ Garnet + Quartz + H_2O \end{split}$$

Amphibole + Epidote + Quartz = Plagioclase + Clinopyroxene+H₂O

شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیتهای مجموعه برافزایشی ...

اپيدوت-گارنت آمفيبوليت: به صورت تودهاي،

به رنگ سبز روشن هستند که این رنگ به دلیل

مقدار فراوان اپيدوت (۳۰ درصد حجمي) است.

کانیهای تشکیل دهندهی این سنگها شامل

آمفيبول، پلاژيوكلاز، اپيدوت، گارنت، پيروكسن،

کوارتز و به مقدار کم کانی های کدر می باشد (شکل

f -۳). آمفیبولها به رنگ سبز و بی شکل، ۱۵ درصد

سنگ را تشکیل میدهند. پلاژیوکلازها (۲۵ درصد)،

به صورت نیمه شکل دار بوده و بیشتر به کانی های

رسی و کلسیت دگرسان شدهاند. اپیدوت (۳۰ درصد

حجمی)، به صورت ریزدانه تا متوسط دانه، بی شکل

تا نیمه شکل دار با برجستگی بالا و رنگ سبز پستهای

دیده می شود. گارنتهای موجود در این سنگها

(۲۵ درصد حجمی)، با اندازههای متغیر و عمدتاً

بدون شكل هندسي منظم هستند. پيروكسنها از

نوع کلینوپیروکسن کمتر از ۵ درصد حجمی سنگ

را تشکیل میدهند. به طور کلی هورنبلند +

پلاژيوكلاز ± كوارتز ± گارنت ± كلينوپيروكسن ±

اپیدوت مجموعه کانی های مهم تشکیل دهنده این

برای شناخت ترکیب شیمیایی، خاستگاه

ژئوديناميكي و تعيين دما و فشار تبلور تعادلي

مجموعههای کانیایی سنگهای آمفیبولیتی مکران،

از تجزیه شیمیایی نقطهای کانی آمفیبول

(آمفیبولیتهای تودهای و جهتیافته) استفاده

سنگها هستند.

بحث و نتايج

شیمیکانی آمفیبول

شدهاست. آمفیبولهای آنالیز شده به تعداد ۶۲ نقطه، براساس فرمول ساختاری ۱۵ کاتیون ۲۳ $((15eCNK)T_1+T_2+M_1+M_2+M_3=15)$ اكسيژن محاسبه شده است (Hawthorne et al.,) 2012). طبقهبندى آمفيبول ها براساس روش مرجع که آمفیبول ها 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 می گیرند (Leake et al., 1997) (شکل ۴ -a و ۵-b). نامگذاری Mg/ (Mg + Fe^{2+}) آمفيبول ها براساس نمودار نسبت به Si نشان میدهد که ترکیب آمفیبولهای مورد مطالعه عمدتاً دارای محدودهی مگنزیو تا فروهورنبلند مى باشد (Leake et al., 1997)، (شكل b-۴). براساس نمودار (K+Na) در مقابل Si نیز آمفیبول ها عمدتاً در محدودهی ترکیبی مگنزیو تا فروهورنبلند مى باشند (Coleman et al., 1965) (شکل ۴-c). همچنین براساس نمودار Al^{IV} در

مقابل Ti (Leake et al., 2004) Ti محدوده ترکیبی مگنزیوهورنبلند را نشان میدهند (شکل ۴-b).

از تركيب آمفيبولها ميتوان براي تعيين منشأ و محيط تكتونوماگمايي نيز استفاده نمود. به طوري که بر اساس نمودار Ti در مقابل Si آمفیبولهای مورد مطالعه، خاستگاه دگرگونی نشان میدهند (شکل ۵–۵). همچنین در نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} نیز این آمفیبولها از نوع دگرگونی کلسیک می باشند (شکل b-۵). محیط زمین ساختی این کانی در نمودار درصد وزنی SiO₂ در برابر Na₂O (Coltorti et al., 2007) که دو محدوده آمفیبولهای مناطق کششی درون صفحات (-I Amph) و مناطق فرورانشی (S-Amph) را از یکدیگر تفکیک می کند، در محدوده فرورانش قرار می گیرد (شکل c-۵). همچنین در نمودار Al^{IV} در مقابل نسبت (Fe+Mg) مقابل نسبت 1995) تمایل به بالا بودن نسبی گریزندگی اکسیژن شاهدی بر تشکیل آنها در محیط فرافرورانش می باشد (شکل ۵ –d).

Table 1. Representative EPMA data of amphibole in the Makran amphibolites.										
Rock type	Amphibolite (foliated)					Amphibolite (massive)				
No.	S-28	S-28	S-28	S-28	S-28	S-38	S-38	S-38	S-38	S-38
SiO ₂	43.98	44.95	45.33	46.51	45.30	46.80	45.17	45.02	45.72	44.63
TiO ₂	0.58	0.69	0.65	0.61	0.63	0.59	0.60	0.55	0.68	0.68
Al ₂ O3	11.84	11.04	10.63	9.45	10.46	9.52	11.03	10.94	9.41	10.95
Cr ₂ O3	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
Na ₂ O	1.27	1.13	1.09	1.05	1.28	1.34	1.60	1.49	1.35	1.56
K ₂ O	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
Alt	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

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

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
MgQ	10.34	11.17	9.81	10.03	10.02	11 11	11.60	12.80	11.81	11.02
CaO	11 12	11.17	11.12	10.05	11.14	11.11	11.00	12.00	11.01	11.02
Na O	1.0	1.20	1.12	1.93	1.14	11.56	1.70	0.71	1.00	1.72
Na2U	1.02	1.30	1.67	1.82	1.59	1.54	1.58	0.71	1.20	1.50
K2O Total	0.51	0.43	0.52	0.53	0.51	0.56	0.51	0.13	0.37	0.56
	95.17	95.55 Ca	97.02	90.97 the basis of	97.32 23 Oxyge	95.02 ns	93.90	95.92	90.10	97.03
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
Fe³⁺	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
	2.50	2.35	1.70	1.23	1.78	2.49	2.39	2.65	1.02	2.44
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 Ma	2.05	2.03	2.16	2.14	2.05	1.76	1.68	1.78	1.80	1.95
Ma	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
К	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 (2012) Hawthorne et al., 2012) برای آمفیبولیتهای مورد مطالعه. a) نمودار (B) Na (C) در برابر K+Na انمودار نسبت (Leake et al., 1997) Si به Mg/ (Mg + Fe ²⁺) نمودار (Leake et al., 1997) (Ca+Na B) در مقابل Si (Coleman et al., 1965) Si نمودار Ti در برابر مقابل Si (Coleman et al., 1965).

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 + Fe²⁺) versus Si diagram (Leake et al., 1997). c) K+Na versus Si diagram (Coleman et al., 1965). d) AI^{IV} versus Ti diagram (Leake et al., 2004).

در دهههای اخیر، مطالعه و بررسیهای زمیندماسنجی و زمینفشارسنجی برای شناخت شرایط دما و فشار تشکیل سنگها، به ویژه برای آمفیبولیتها به دلیل حساسیت آنها به دما و فشار، بسیار مفید بوده است. این محاسبات براساس

آنالیز شده در محدودهی فشار کم – متوسط قرار

شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیتهای مجموعه برافزایشی ...

میدهد که ترکیب آمفیبولهای مورد مطالعه در

گرفتهاند. همچنین براساس شکل ۶ -b. رخسارهی فشار کم تا متوسط مطابق با محدودهی مفیبولهای مورد بررسی از نوع آمفیبولهای فشار آبوكوما ژاپن مى باشند (Shido, 1958; Shido and متوسط هستند (Hynes, 1982). شكل ۶- ۲، نشان .(Miyashiro, 1959 0.5 a 2.5 b 0.4 2.0 Lencous Annihilippies Al^{IV}(apfu) Ti(apfu) Igneous Amphiboles 0.2 1.0 Metaorphic 0.1 0.5 Ca-Amphibole **Metamorphic Amphiboles** 0.0∟ 0.0 6.50 Si(apfu) 0.0 5.50 6.00 7.00 7.50 8.00 0.5 1.0 1.5 Al (apfu) 1.0 C d LowfO₂ 0.8 **I-Amph** Fe^t/Fe^t+Mg 50 50 0.6 Intermediat fO2 3 Na₂O(wt.%) High 7O2 0.2 S-Amph 0.0L 0 Al^{IV} (apfu)² 40 45 SiO₂(wt.%) 50 55

شکل a-۵- نمودار Ti در مقابل Si (Leake, 1965). b) نمودار Al^{IV} در مقابل Al^{VI} (C. رمقابل i C. مقابل i c) نمودار SiO₂ (Coltorti et al., 2007). A2 و ارتباط آن با فوگاسیته اکسیژن در برابر Pe/(Fe+Mg) (Coltorti et al., 2007). Na₂O در مقابل نسبت (Fe/(Fe+Mg). علائم مشابه شکل ۴ میباشند.

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

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

نمودارهای Altot در مقابل نسبت Fe*/Fe*+Mg Schmidt, 1992) (شکل ۲۵، Al^{vi} در مقابل Si در مقابل (Raase, 1974) (شكل Na_{M4} و نسبت Na_{M4} در مقابل Brown, 1977) Al^{IV}) (شکل c-۷)، فشار ۲ kbar (۲ تا ۶ کیلوبار) را نشان میدهند. با توجه به شکل b ،a -۸، آمفیبول های مورد مطالعه

در زون گارنت (Laird and Albee, 1981) قرار می گیرند که نشان می دهد کاتیون های Al, Na, K Ti در آمفیبولها بیشترین وابستگی به دما را نشان میدهند و Si نیز با افزایش دما کاهش مییابد. همچنین برای برآورد فشار تبلور آمفیبول از روش-های مرسوم زمین شناسی 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 یارامترها مثل دمای محیط و... در نظر گرفته نشده است.

1. $P(\pm 3 \text{ kbar}) = -3.92 \pm 5.03 \text{ Al}^{\text{tot}}$ (Hammarstrom and Zen, 1986)

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

سنگهای منطقهی مکران به دست آمده است (شکل ۵-۹). با توجه به مقادیر 'Al نسبت به مقدار فشار (Johnson and Rutherford, 1989)، نيز گستره دمایی ۸۰۰–۷۵۰ درجه سانتیگراد برای آمفیبولهای مورد بررسی برآورد شده است (شکل .(b-۹

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



لمكل 6- a و b) نمودار Ti در مقابل 100 Al/(Si+Al). c) نمودار (Hynes, 1982) Al در برابر (Ti در مقابل Ti و b) مودار (Ca+Na)، مودار (Leake, 1965) Al در برابر (Albee, 1981). Al در مقابل Al^{VI} در مقابل Al^{VI} در برابر (Albee, 1981). Al در مقابل Al^{VI} در مقابل Al^{VI} در مقابل Al^{VI} می باشند. 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

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.



(c .(Raase, 1974) Si در مقابل نسبت (b .(Schmidt, 1992) Fe*/(Fe*+Mg) نمودار Al^{VI} در برابر Al^{VI} در مقابل نسبت (Brown, 1977) Al^{VI} در برابر Na _(M4) نمودار (Mau) میاشند. Fig. 6. a) Alt 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.

به روشهای مختلف.	امفيبوليتهاى مكران	ں بلورهای امفیبول در	۲- محاسبه فشار تشکیل	جدول ′
------------------	--------------------	----------------------	----------------------	--------

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 A-) نمودار (Laird and Albee, 1981) 100Al/(Si+Al) در مقابل Al^{VI} در مقابل (Laird and Albee, 1981). b) نمودار (a - X در مقابل Al^{VI}). d) نمودار (Laird and Albee, 1981). علائم مشابه شکل ۴ می باشند.

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



سکل (a - 1) تمودار Ar در مقابل Ar (معابل Johnson and Rutherford, 1989) مقادیر فشار ((a - 1) مقادیر فشار (Johnson and Rutherford, 1989). علائم مشابه شکل (a - 1) می باشند.

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

شیمی کانی آمفیبول در آمفیبولیتهای مجموعه برافزایشی ...

References

- Anderson, J.L., Smith, D.R., 1995. The effects of temperature and fO₂ 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 Caamphibole 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 termochronology across the Makran accretionary wedge in Iran. Diss ETH, No. 19151, 215p.
- Esmaeili, 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-

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-

Pb geochronology. Tectonics 39(2), e2019TC005963.

- 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.
- 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 Frood 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 comparision 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., G., 1997. Nomenclature of Youzhi, 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 geobarometery. Zaminazmoon, 99p.
- Souri, M., Ahmadi-Khalaji, A., Ebrahimi, M., Esmaeili, 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.