Vol. 8, No. 1, Spring and Summer 2022, pp. 47-74

ISSN (Print): 2538-449X

Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

Investigation of metamorphic conditions and mineralogical changes at green-schist to amphibolite facies transition zone using phase diagrams and composition of the minerals: a case study from the Kurdistan Province metabasites

Mirmohammad Miri[1*]

1. Assistant professor, Faculty of Earth Sciences, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Article info

Article history

Received: 22 January 2022

Accepted: 10 May 2022

Keywords:

Metabasite,

Greenschist,

Amphibolite,

Phase diagram,

Kurdistan.

Abstract

In this paper, metamorphic conditions (T, P and fluid composition) in greenschist to amphibolite facies transition zone are investigated using textural evidence, composition of the minerals and phase diagrams. Metabasites from the south of Kordestan Province were metamorphosed from sub-greenschist to upper amphibolite facies. Field observations and petrography studies show that there are some rocks containing mineral assemblage hornblende + plagioclase + epidote + quartz formed in conditions intermediate between greenschist and amphibolite facies. Electron microprobe analysis and scanning electron microscopy images reveal that the amphiboles have chemical zoning with actinolite cores and hornblende rims and these chemical changes are discontinous. The plagioclases are commonly oligoclase but there is some remnant albite. The epidotes are enriched in Fe with low clinozoisite contents. Geothermobarometry calculations using the amphibole compositions represent 423 °C and 2 kbar for the cores and 543 ºC and 4 kbar for the rims. The calculated phase diagram based on whole-rock composition of a sample indicates that it was formed in 450 to 550 °C and 2.1 to 6.8 kbar that fall in the field of epidote-amphibolite facies condition. The O_2 and CO_2 vs. T variation phase diagrams show that O_2 had a significant role formation of the mineral assemblage but the fluid contained very low CO_2. Chemical discontinuities in the amphiboles and the plagioclases with different compositions demonstrate that the studied rocks formed in disequilibrium conditions.

***Corresponding author:** Mirmohammad Miri; **E-mail:** m.miri@scu.ac.ir

How to cite this article: Miri, M., 2022. Investigation of metamorphic conditions and mineralogical changes at green-schist to amphibolite facies transition zone using phase diagrams and composition of the minerals: a case study from the Kurdistan Province metabasites. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(1), 47-74

BY NC

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

In the transition from green schist facies to amphibolite facies (epidote-amphibolite facies) a series of reactions replace actinolite, epidote, albite and chlorite with hornblende and plagioclase with higher anorthite contents (e.g. Maruyama et al., 1983; Butcher and Gripes, 2010). Metabasites, in such conditions, usually contain different types of amphiboles and plagioclases (Maruyama et al., 1983; Begin, 1992; Bucher and Grapes, 2010; Starr and Pattison, 2019). Study of the conditions and effective factors in the occurrence of these mineral assemblages elevates our knowledge about P-T conditions of metabasite metamorphism. The south of Kurdistan Province, in the border of Hamadan and Kermanshah Provinces, hosts metabasites of Middle to Late Jurassic age (Azizi et al., 2020) metamorphosed during the late Cimmerian orogeny from green schist to amphibolite facies conditions. Some parts where the boundary between green schist and amphibolite facies rocks is traceable, the transition conditions of epidote-amphibolite facies can be investigated. In this research, the samples taken from these borders and other facies of the region are investigated for changes in their mineralogical assemblages and chemical composition. The studied area is located in the Sanandaj-Sirjan zone of Iran (Fig. 1). Metamorphic rocks in the area include metabasite, metapellite and metacarbonate, which contain the evidence of metamorphism from sub-greenschist facies to finally high amphibolite. Metabasites formed from the metamorphism of tuffs resulted from submarine volcanic eruptions with a basaltic composition (Azizi et al., 2020). Metacarbonates include amphibole-, epidote- and, biotite- bearing marbles. Metabasite-marble sequence occurs in most parts of the areas.

Material and methods

The sample thin sections were studied using a polarizing microscope. Three fresh samples were analyzed using XRF (X-ray fluorescence) method in Kansaran Binaloud Lab by a PHILIPS PW1480 instrument. Chemical compostions of the minerals were determined using a Cameca SX50 electron microscope with an accelerating voltage of 30 kV and a beam current of 20 nA at Geology and Geophysics of the Chinese Academy of Sciences.

Results and discussion

Petrography

Based on petrographic studies, samples can be generally divided into two categories incluidng epidote-amphibolite and actinolite-schist. These rocks have little mineralogical diversity and are generally composed of amphibole, plagioclase, epidote and quartz with granoblastic to nematoblastic fabrics (Figure 3). Sphene, zircon and magnetite are the secondary minerals. Epidote is abundant especially in the border of the marble layers, indicating the reaction between the amphibolite layer and the marble.

Whole-rock geochemistry

The chemical composition of the samples is presented in Table 1. The rocks contain (48.8 to 51.3% by weight), Al_2O_3 (12.2 to 12.7% by weight), CaO (11 to 12.5% by weight), FeO (9.5 to 10.3% by weight) and MgO (8.4 to 10.2% by weight), Na_2O (2 to 2.6% by weight) and K_2O (0.3 to 0.6% by weight), respectively. These compositions are similar to a basaltic to basaltic-andesite protolith. The relatively high content of CaO in the samples can be attributed to contamination with calcareous sediments.

Mineral chemistry

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

The rim-to-rim chemical profiles show that the amphiboles are actinolitec to slightly tremolite compositions in their cores that change to hornblende toward the rims. Most of the analyzed plagioclase is oligoclase (average $An_{69.9-84.4}$ $Ab_{15.2-29.6}$), however albite (average $An_{2.6-3.2}$ $Ab_{96.6-97.2}$) is present. The epidotes are Fe-rich, and based on the contents of the end-members their average composition can be considered as $Ep_{0.87}Cz_{0.13}$ (Fig. 4).

Thermobarometry

Calculations using the amphibole chemical composition method (Zenk and Schultz, 2004), show that the core and rim parts of the amphiboles formed at 405 to 438 500 to 572 C°, respectively. The pressure also ranges from 1.6 to 2.4 and 3.5 to 5.1 kb for the cores and rims, respectively. The cores with actinolite composition formed in the range of green schist facies and the rims with hornblende composition formed in the P-T condition of green schist to amphibolite facies (epidote-amphibolite facies) (Fig. 5).

Cation substitutions in the amphibole structures

The Al^{IV}, Al^{VI}, Ti, Na_B, Na_A and K_A variation diagrams indicate that the change in amphiboles composition from the core toward the rims is mainly due to the tschermakite, edenite and pargasite substitutions. They show increase of Al, Fe and Na in the rims (Figure 4c and d). All these successions occur during increasing of metamorphic degree (e.g. Graham, 1974; Shcumacher, 1991; Ríos 2005; Schumacher, 2007; Starr and Pattison, 2019).

Chemical discontinuity in amphiboles

The occurrence discontinuous chemical zoning in the studied amphiboles indicates their formation during different metamorphic conditions. This may be due two reasons; (1) failure to reach a complete equilibrium during the transition from green schist to amphibolite facies, in which case the crystal cores should be considered as relicts and rims as a new phase, (2) the occurrence of a mixing gap in amphiboles at the time of formation. Amphiboles formed due to compositional gaps do not form a continuous line on the $Ti+Al^{VI}+Fe^{+3}$ against Na_B and $(Na+K)_A$ graphs (Laird and Albee, 1981). The studied amphiboles show the compositional gap on these diagrams (Fig. 6c and d). The thermal shock caused by the penetration of igneous masses into regional metamorphic layers can cause this chemical zoning (Miri et al., 2016). On the other hand, textural reaction rims of hornblende and epidote (Fig. 3c) may show an incomplete equilibrium. In addition, the albite-oligoclase compositional gap in the samples indicates formation in disequilibrium conditions during the increasing degree of metamorphism (Starr and Pattison, 2019).

Phase diagrams

A phase diagram was calculated using Perplex software (Connolly, 2005) version 6.9.1.2021 and solid solution models cAmph (G) for amphibole (Green et al., 2016), Ep (HP11) for epidote (Holland and Powell, 2011), Opx (W) for orthopyroxene (White et al., 2014), Chl (W) for chlorite (White et al., 2014) and Fsp(C1) for plagioclase (Holland and Powell, 2003) in a NCFMASHO chemical system (Fig. 7). The fluid was considered as pure water. According to the diagram, the mineralogical assemblage of the sub-greenschist facies includes albite + amphibole 1 (high tremolite content) + chlorite + epidote + vaerakite. Amphibole + quartz become stable (Figure 7). At T above 420 °C, the second type of amphibole appears and chlorite leaves the system. In the 450 to 550 °C temperatures of 2.5 to 6.5 kbar pressures, the mineral assemblage amphibole 1 + amphibole 2 + epidote + plagioclase + quartz become

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

stabe (the field indicated by the yellow dotted line), which is almost within the PT range of epidote-amphibolite facies (Figure 5a). These changes can be traced in the core to the rim of the studied amphiboles.

To investigate the role of the fluid in formation of the studied rocks, we added minor CO_2 to the fluid and calculated a T-XCO_2 diagram (Fig. 9a). The diagram show that at T< 550 C°, carbonate minerals (calcite, dolomite, ancrete) are stable as the amount of CO2 increases. The assemblage amphibole 1 + amphibole 2 + plagioclase + epidote is stable in CO_2 < 9%, and the lack of calcite in the studied samples shows that the CO_2 content of the fluid did not exceed 9%. A T-XO_2 diagram (Fig. 9b) shows that in the T range formation of the samples, in low O_2 contents (XO_2=0), zoisite is the dominant species in the environment, but epidote replaced it with increasing of O_2. Considering the presence of epidote and the absence of zoisite in the studied rocks, it can be concluded that oxygen was present in a high amount in the metamorphic environment and the fluid composition was oxidant.

Conclusion

The chemical zoning of amphibole with actinolitic cores and hornblende rims (with discontinuous changes), diversity in the composition of plagioclase and reation margin of hornblende and epidote in some of the metabasites of the southern Kurdistan Province are evidence for transition from the green schist facies to the amphibolite facies.

Chemical composition of amphiboles changed as a result of substitutions of Al, Fe and Na and by of chermakite, edenite and pargasite cation substitution during increasing in the metamorphism degree.

Geothermobarometry calculations and phase diagram modeling show that the amphibole cores and rims formed in the green schist and epidote-amphibolite facies, restectively.

T-XCO_2 and T-XO_2 phase diagrams reveal that CO_2 has a small contribution to metamorphic fluid but oxygen was high enough to prevent the formation of zoisite.

The presence of amphiboles with discontinuous chemical zoning together with simultaneous presence of oligoclase and albite indicate that a stable equilibrium condition did not achieve at the time of the formation of these rocks, which can be due to the heat fluxes caused by the intrusion of igneous masses and the resulting fluids in the region. Although this is a case study in this regard, it can be the basis for conducting more extensive research.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جلد ۸، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۴۰۱، صفحه ۴۷ تا ۷۴
شاپای چاپی: 2538-449X

مقاله پژوهشی
دسترسی آزاد
مجله علوم زمین خوارزمی
Journal homepage https://gnf.khu.ac.ir

بررسی شرایط دگرگونی و تغییرات کانی‌شناسی در گذر از رخساره شیست‌سبز به آمفیبولیت با استفاده از نمودارهای فازی و ترکیب کانی‌ها: مطالعه موردی در متابازیت‌های جنوب استان کردستان

میرمحمد میری*
استادیار، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله
دریافت: ۱۴۰۰/۱۱/۰۲
پذیرش: ۱۴۰۱/۰۲/۲۰

واژه های کلیدی
متابازیت،
شیست‌سبز،
آمفیبولیت،
نمودار فازی،
کردستان.

چکیده

در این پژوهش با بهره‌گیری از شواهد بافتی، ترکیب شیمیایی کانی‌ها و نمودارهای فازی به بررسی شرایط دگرگونی (دما، فشار و ترکیب سیالات) در گذر از رخساره شیست‌سبز به رخساره آمفیبولیت پرداخته می‌شود. متابازیت‌های جنوب استان کردستان در رخساره‌های زیر شیست‌سبز تا آمفیبولیت بالایی دگرگون شده‌اند. بررسی‌های صحرایی و سنگ‌نگاری نشان می‌دهند در این منطقه سنگ‌هایی با مجموعه‌کانی آمفیبول + پلاژیوکلاز + اپیدوت + کوارتز رخداد دارند که در طی شرایط دما-فشار حدفاصل رخساره شیست‌سبز و آمفیبولیت شکل گرفته‌اند. نتایج تجزیه‌های شیمیایی الکترون مایکروپروب و تصاویر میکروسکوپی الکترونی روبشی آشکار ساختند که آمفیبول‌ها دارای منطقه‌بندی شیمیایی با مراکز اکتینولیتی و حاشیه‌های هورنبلندی هستند و تغییرات ترکیبی آنها از مرکز به حاشیه ناپیوسته است. پلاژیوکلازها نیز عمدتاً ترکیب الیگوکلاز دارند اما آلبیت‌های باقی‌مانده نیز در سنگ به چشم می‌خورند. محاسبات دما و فشارسنجی بر مبنای ترکیب آمفیبول‌ها، دما و فشار ۴۲۳ درجه سانتی‌گراد و ۲ کیلوبار را برای مراکز آمفیبول‌ها و ۵۴۳ درجه سانتی‌گراد و ۴ کیلوبار را برای حاشیه‌های آنها ارائه می‌دهند که کمابیش در محدوده شرایط رخساره اپیدوت آمفیبولیت است. نمودارهای فازی دما-فشار محاسبه شده بر اساس ترکیب شیمیایی سنگ کل نیز نشان می‌دهند که سنگ‌های مورد مطالعه در محدوده دمای ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۱ تا ۶/۸ کیلوبار دگرگون شده‌اند. بر اساس نمودارهای فازی تغییرات محتوای اکسیژن و دی‌اکسید کربن در برابر دما، اکسیژن تاثیر بسزایی در شکل‌گیری مجموعه‌کانی مشاهده شده داشته اما محتوای دی‌اکسید کربن سیال اندک بوده است. حضور آمفیبول‌های با ناپیوستگی شیمیایی و پلاژیوکلازهای با تنوع ترکیبی نشان می‌دهند که سنگ‌های مورد مطالعه در طی تشکیل به تعادل کامل دست نیافته‌اند.

***نویسنده مسئول:** میرمحمد میری m.miri@scu.ac.ir

استناد به این مقاله: میری، م. (۱۴۰۱) بررسی شرایط دگرگونی و تغییرات کانی‌شناسی در گذر از رخساره شیست‌سبز به آمفیبولیت با استفاده از نمودارهای فازی و ترکیب کانی‌ها: مطالعه موردی در متابازیت‌های جنوب استان کردستان، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۴۷ تا ۷۴

CC BY NC

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

مقدمه

متابازیت‌ها، برخلاف متاپلیت‌ها که دارای کانی‌های شاخص متعددی جهت تعیین تغییرات درجه دگرگونی هستند، در شرایط دما و فشار رخساره‌های شیست‌سبز و آمفیبولیت تغییرات کانی‌شناسی نسبتاً اندکی بروز می‌دهند. عمده تغییرات متابازیت‌ها در این شرایط، شامل تغییر در ترکیب شیمیایی کانی‌های آمفیبول و پلاژیوکلاز و نیز تغییر در فراوانی آنهاست. در شرایط گذر از رخساره شیست‌سبز به رخساره آمفیبولیت یا همان رخساره اپیدوت – آمفیبولیت (Miyashiro, 1974)، مجموعه‌ای از واکنش‌ها سبب جایگزینی اکتینولیت، اپیدوت، آلبیت و کلریت با هورنبلند و پلاژیوکلازهای با محتوای آنورتیت بالاتر می‌گردند (مانند Maruyama et al., 1983; Bucher and Grapes, 2010). متابازیت‌ها، در چنین شرایطی معمولاً محتوی انواع مختلف آمفیبول و پلاژیوکلاز می‌باشند (Cooper 1972; Maruyama et al., 1983; Begin and Carmichael 1992; Bucher and Grapes, 2010, Starr, 2017; Starr and pattison, 2019). بررسی شرایط و عوامل موثر در رخداد این مجموعه‌های کانیایی، در یافتن درکی بهتر از شرایط دما-فشار و نحوه دگرگونی متابازیت‌ها مفید است.

جنوب استان کردستان در محدوده مرزی استان‌های همدان و کرمانشاه، میزبان متابازیت‌هایی با سن ژوراسیک میانی تا پایانی (Azizi et al., 2020) است که در طی کوهزایی کیمیرین پسین دچار دگرگونی در حد رخساره‌های زیر شیست‌سبز تا شیست‌سبز و آمفیبولیت شده‌اند. حضور سنگ‌های با درجات مختلف دگرگونی در این منطقه، یک آزمایشگاه طبیعی جهت بررسی توالی ظهور کانی‌ها و نحوه تغییرات شیمیایی آنها در طی افزایش درجه دگرگونی در اختیار زمین‌شناسان قرار می‌دهد. عمرانی (۱۳۸۴) دو رویداد دگرگونی ناحیه‌ای (M1 و M2) و دو رویداد دگرگونی مجاورتی (C1 و C2) را در این منطقه معرفی نموده و حد بالایی دگرگونی را در ارتباط با نفوذ توده‌های آذرین در نظر گرفته است. شیخ-ذکریایی (۱۳۸۹)، با توجه به ریزساختارهای دانه‌های کوارتز و مجموعه‌های کانی‌شناسی، درجه دگرگونی رخساره‌های شیست‌سبز تا آمفیبولیت را برای این منطقه در نظر گرفته است. عزیزی و همکاران (۲۰۲۰) ژئوشیمی متابازیت‌ها را از منظر جایگاه زمین‌ساختی بررسی نموده-اند. سایر مطالعات صورت گرفته بر دگرگونی مجاورتی تمرکز داشته‌اند (مانند ترکیان و همکاران، ۱۳۹۶). در بخش‌هایی از منطقه که مرز بین سنگ‌های رخساره‌های شیست‌سبز و آمفیبولیت قابل پیگیری است، می‌توان شرایط انتقالی رخساره اپیدوت – آمفیبولیت را بررسی نمود. در این پژوهش، نمونه‌های برداشت شده از این مرزها و نیز دیگر رخساره‌های منطقه جهت مطالعه تغییرات مجموعه‌های کانی‌شناسی و ترکیب شیمیایی کانی‌ها مورد بررسی قرار می‌گیرند. پژوهش حاضر اولین بررسی کانی-شناسی و ژئوشیمیایی این سنگ‌ها محسوب می‌شود که نتایج آن می‌تواند به کامل شدن هرچه بیشتر سناریوی فرآیند دگرگونی در این بخش از پهنه سنندج-سیرجان کمک نماید.

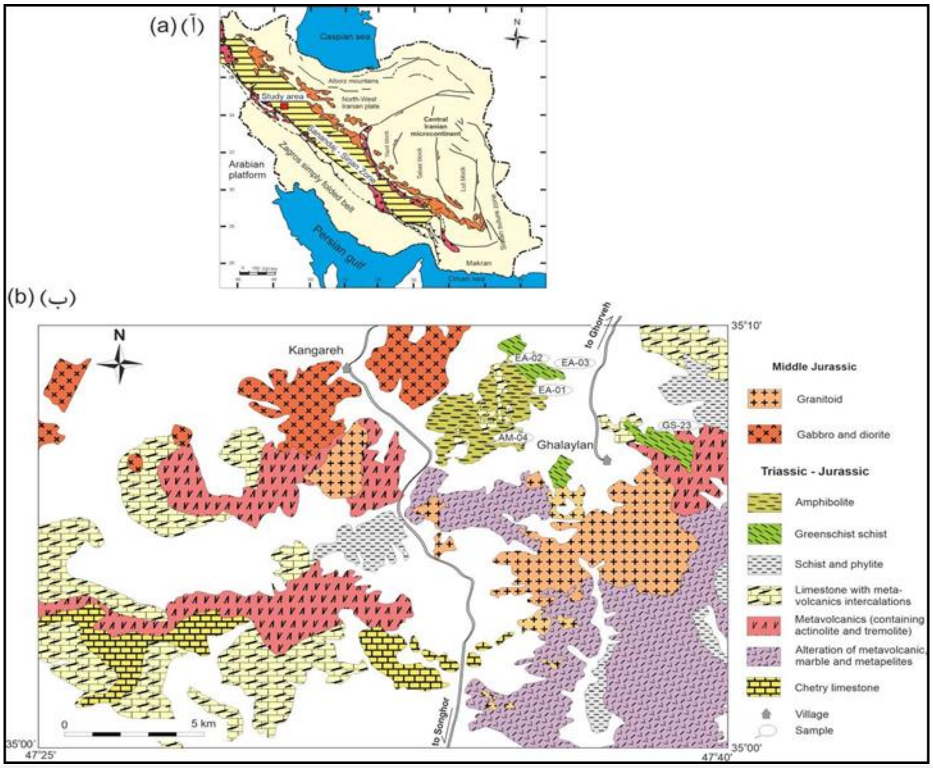
مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

منطقه مورد مطالعه از نظر تقسیم‌بندی پهنه‌های ساختاری ایران در پهنه سنندج-سیرجان شمالی واقع شده است (شکل ۱آ). این پهنه متشکل از توالی سنگ‌های

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

دگرگونی ناحیه‌ای تغییر شکل یافته با سن تریاس بالایی تا ژوراسیک است و توده‌های آذرین با ترکیبات‌های متنوع در طی ژوراسیک میانی تا کرتاسه در آن نفوذ نموده‌اند (Berberian and King, 1981; Ghasemi and Talbol, 2006; Mohajjel and Fergusson 2014; Hassanzadeh and Wernicke, 2016; Azizi et al., 2020). در مورد نحوه پیدایش بخش‌های شمالی این پهنه دو نظریه وجود دارد: (۱) فرورانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس به زیر ایران مرکزی (مانند Berberian and Berberian 1981; Ghasemi and Talbot, 2006; Mohajjel and Fergusson 2014) (۲) یک کافت قاره‌ای با فعالیت محدود به همراه آتشفشان‌های زیردریایی (Azizi and Stern, 2019; Azizi et al., 2020).



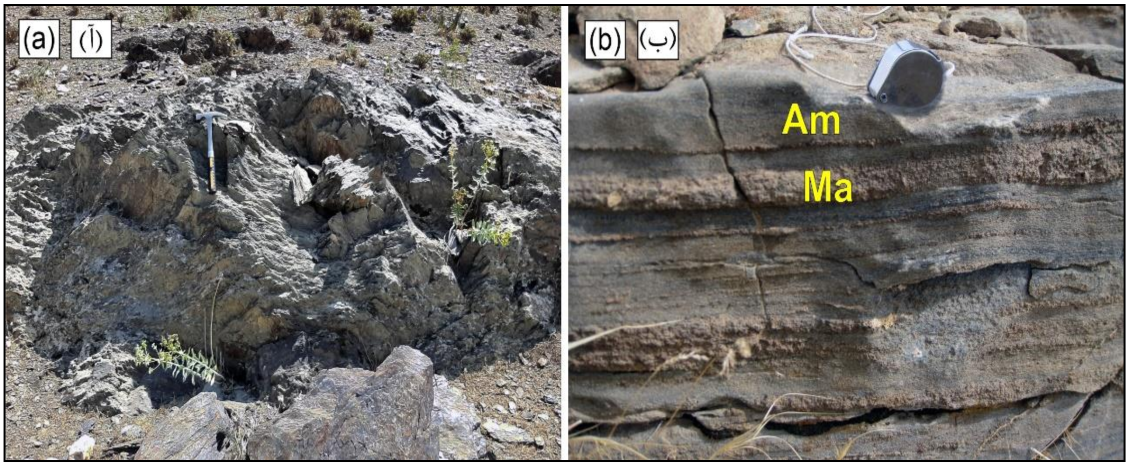
شکل ۱- (آ) نقشه زمین شناسی ایران (برگرفته از Ghasemi and Talbot, 2006) به همراه موقعیت منطقه مورد مطالعه؛ (ب) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه واقع در جنوب استان کردستان (برگرفته از Hosseini, 1999; Sartibi, 2005; Azizi et al., 2020) به همراه نقاط نمونه برداری.

Fig.1. (a) geology map of Iran (after Ghasemi and Talbot, 2006) with the location of the study area; (b) geology map of the study area in south of the Kurdistan Province (after Hosseini, 1999; Sartibi, 2005) with the location of the samples.

بر مبنای مطالعات سنگ های دگرگونی منطقه (عمرانی، ۱۳۸۴؛ میری، ۱۳۹۵)، می‌توان آنها را به انواع متابازیت، متاپلیت و متاکربنات تقسیم‌بندی نمود که شواهد رخداد دگرگونی از رخساره‌های زیر شیست‌سبز تا

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

نهایتاً آمفیبولیت بالایی را در خود دارند. بررسی‌های صورت گرفته بر روی متابازیت های رخساره زیر شیست سبز در منطقه نشان داده‌اند که آنها از دگرگونی توف‌های حاصل از فوران‌های آتشفشانی زیردریایی با ترکیب بازالتی شکل گرفته‌اند (Azizi et al., 2020). متاپلیت‌ها شامل اسلیت، فیلیت و گارنت شیست می‌باشند که در مجاورت توده‌های آذرین، کردیریت به صورت لکه‌ای در آنها شکل گرفته است. متاکربنات‌ها نیز از مرمر های محتوی آمفیبول، اپیدوت و گاهی بیوتیت تشکیل می‌شوند. توالی متابازیت – مرمر در بیشتر مناطق رخنمون دارد. متابازیت‌ها شامل متابازالت‌های رخسارهای زئولیت و پرهنیت-پامپله‌ایت، اکتینولیت شیست‌های رخساره شیست سبز و آمفیبولیت هستند (شکل ۱ب). متابازالت‌ها که بخش عمده منطقه را شامل می شوند گاهی ساختارهای اولیه خود مانند ظاهر بالشی را تا حدی حفظ نموده‌اند، هرچند تشخیص آن مشکل است. شیست‌های سبز، دارای برگوارگی مشخص بوده و به رنگ سبز تیره تا خاکستری رخنمون دارند (شکل ۲آ). در برخی موارد دانه‌های اکتینولیت با چشم غیرمسلح در آنها قابل مشاهده‌اند. آمفیبولیت‌ها به رنگ سبز تیره تا سیاه دیده شده و گاهی میان‌لایه‌های باریکی از مرمر (ضخامت چند میلی‌متر تا چند سانتی‌متر) دارند که به آنها ظاهری نواری می‌دهد (شکل ۲ب). بر خلاف نقشه زمین شناسی منطقه که در آن مرز اکتینولیت شیست – آمفیبولیت بسیار مشخص ترسیم شده است (شکل ۱ب)، انتقال بین این سنگ‌ها در صحرا تدریجی بوده و نمی‌توان موقعیت مشخصی برای آن لحاظ نمود.



شکل ۲- (آ) بیرونزدگی‌های اکتینولیت شیست در منطقه مورد مطالعه (دید به سمت شمال غرب). برگوارگی مشخص در محل بیرونزدگی به چشم می‌خورد. (ب) توالی آمفیبولیت (Am) و مرمر (Ma).

Fig. 2. (a) An outcrop of the actinolite schist in the study area (view to NW). Schistosity is obvious; (b) Amphibolite (Am) and marble (Ma) alternation.

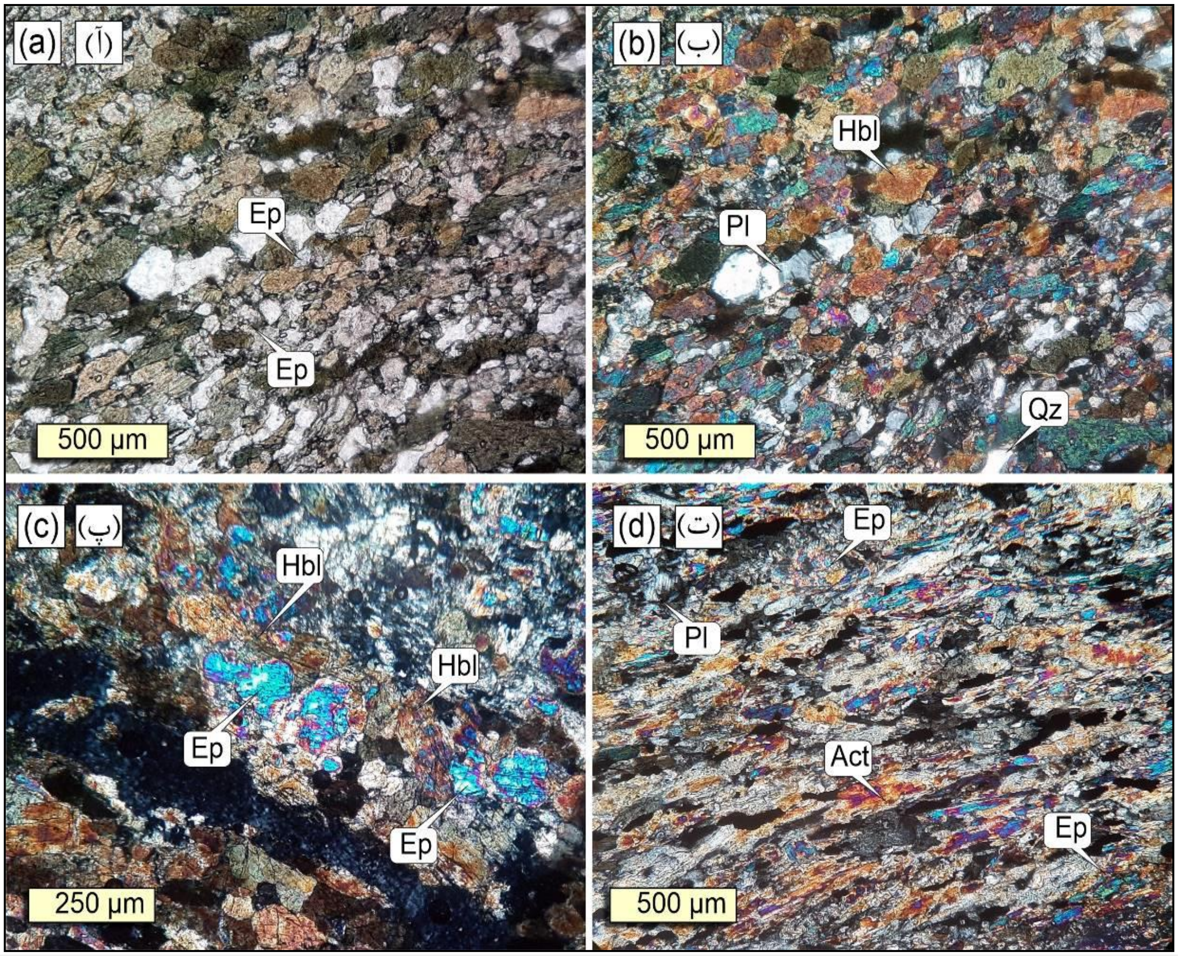
سنگ‌نگاری

بر اساس مطالعات سنگ‌نگاری، نمونه‌های مورد بررسی را می‌توان به طور کلی به دو دسته اپیدوت‌آمفیبولیت و

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

اکتینولیت‌شیست تقسیم‌بندی نمود. این سنگ‌ها تنوع کانی-شناسی کمی دارند و عموماً از آمفیبول، پلاژیوکلاز، اپیدوت و کوارتز ساخته شده‌اند (شکل ۳). اسفن، زیرکن و مگنتیت کانی‌های فرعی مهم در این سنگ‌ها به شمار می‌روند. بافت این سنگ‌ها گرانوبلاستیک تا نماتوبلاستیک است (شکل ۳ آ و ب). هورنبلند، فراوان‌ترین کانی در نمونه‌های اپیدوت آمفیبولیت‌ها می‌باشد که به صورت دانه‌های نیمه شکل‌دار تا بی‌شکل با رنگ سبز و چند رنگی سبز تیره تا سبز روشن در مقاطع دیده می‌شوند. پلاژیوکلاز به صورت دانه‌های ریز بی‌شکل تا نیمه شکل‌دار و دارای ماکل دوقلویی پلی‌سنتتیک در نمونه‌ها حضور دارند (شکل ۳آ و ب). البته با توجه به درجه دگرگونی، احتمال حضور پلاژیوکلازهای بدون دوقلویی نیز هست که شناسایی آنها توسط میکروسکوپ پلاریزان را دشوار می‌سازد. اپیدوت در نمونه‌ها از فراوانی قابل ملاحظه‌ای برخوردار است و در بیشتر بخش‌ها حضور دارد. به ویژه در بخش‌های مجاور لایه‌های مرمری بر مقدار آن افزوده می‌گردد که نشان دهنده واکنش بین لایه آمفیبولیت و مرمر است. ناپایداری در حاشیه‌های اپیدوت و تبدیل آن به هورنبلند در بیشتر نقاط مقطع قابل مشاهده است (شکل ۳پ). زیرکن و اسفن به صورت پراکنده در مقادیر خیلی کم در نمونه‌ها حضور دارند. تشخیص زیرکن به دلیل شباهت رنگ تداخلی آن با اپیدوت در نمونه‌ها دشوار است. اکتینولیت شیست‌ها از اکتینولیت، پلاژیوکلاز، اپیدوت، کلریت، کوارتز و مگنتیت ساخته شده‌اند. بافت این سنگ‌ها نیز نماتوبلاستیک است (شکل ۳ت). اکتینولیت‌ها به صورت بلورهای کوچک اما کشیده و سوزنی در سنگ حضور دارند و جهت‌گیری آنها سبب ایجاد بافت سنگ و برگوارگی در نمونه‌های دستی گشته است. اپیدوت‌ها و پلاژیوکلازهای کوچک به همراه اکتینولیت‌ها در تمام نقاط مقطع دیده می‌شوند. کلسیت نیز گاهی به صورت موضعی حضور دارد که نشان دهنده آلایش سنگ مادر اکتینولیت شیست‌ها با رسوبات آهکی است (میری، ۱۳۹۵).

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۳- تصاویر مقاطع نازک نمونه‌های مورد مطالعه. (آ) و (ب) اپیدوت آمفیبولیت با بافت گرانوبلاستیک تا نماتوبلاستیک. (پ) ناپایداری در حاشیه اپیدوت‌ها و تبدیل آنها به هورنبلند در طی افزایش درجه دگرگونی، (ت) بافت نماتوبلاستیک حاصل جهت‌گیری اکتینولیت‌های سوزنی در اکتینولیت شیست. علائم اختصاری کانی‌ها: Act: اکتینولیت، Ep: اپیدوت، Hbl: هورنبلند، Qz: کوارتز، Pl: پلاژیوکلاز (Whitney and Evans, 2010).

Fig. 3. Micro-photographs of the studied samples. (a) and (b) the epidote amphibolites showing granoblastic to nematobalstic textures, (c) instability in rims of the epidotes and formation of hornblende due to increasing in metamorphic degree. (d) nematoblastic texture formed by orientation of needle-shaped actinolites in an actinolite schist sample. Mineral abbreviations are Act: actinolite, Ep: epidote, Hbl: hornblende, Qz: quartz, Pl: plagioclase (Whitney and Evans, 2010).

روش تجزیه شیمیایی

پس از برداشت نمونه های در محل بیرونزدگی‌ها و تهیه مقاطع نازک، تعداد سه نمونه جهت بررسی ترکیب شیمیایی سنگ کل به آزمایشگاه شرکت کانساران بینالود ارسال و در آنجا با روش XRF توسط دستگاه PHILIPS PW1480 مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفتند. همچنین دو نمونه با کمترین میزان دگرسانی و مجموعه

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

کانیایی مورد نظر در این پژوهش جهت تجزیه شیمیایی به روش ریزوکاو الکترونی انتخاب شدند. مقاطع نازک - صیقلی تهیه شده از این نمونه ها به موسسه زمین شناسی و ژئوفیزیک آکادمی علوم چین ارسال و توسط دستگاه ریزکاو الکترونی Cameca SX50 با ولتاژ شتاب دهنده ۳۰ کیلو ولت و جریان پرتوی ۲۰ نانو آمپر مورد تجزیه قرار گرفتند.

ژئوشیمی سنگ کل

ترکیب شیمیایی نمونه‌های تجزیه شده در جدول ۱ ارائه شده‌اند. در این سنگ‌ها SiO_2 بیشترین سهم را دارا بوده (۴۸/۸ تا ۵۱/۳ درصد وزنی) و پس از آن، Al_2O_3 (۱۲/۲ تا ۱۲/۷ درصد وزنی)، CaO (۱۱ تا ۱۲/۵ درصد وزنی)، FeO (۹/۵ تا ۱۰/۳ درصد وزنی) و MgO (۸/۴ تا ۱۰/۲ درصد وزنی) فراوان‌ترین اکسیدها هستند. همچنین مقدار Na_2O (۲ تا ۲/۶ درصد وزنی) بیشتر از K_2O (۰/۳ تا ۰/۶ درصد وزنی) می‌باشد. این ویژگی‌های ژئوشیمیایی با یک سنگ‌مادر بازالتی مشابهت دارد. محتوای نسبتاً بالای CaO در نمونه‌ها می‌تواند تا اندازه‌ای به دلیل آلایش با رسوبات آهکی همزمان با آنها رخ داده باشد (مانند Oliveira et al., 2003).

جدول ۱- ترکیب شیمیایی سنگ کل متابازیت‌های مورد مطالعه
Table 1. Whole rocks chemical composition of the studied metabasites (in wt%).

Sample	EA-01	EA-02	EA-03
SiO_2	۵۰،۱۸	۴۸،۸۶	۵۱،۳۰
TiO_2	۱،۸۴	۱،۸۰	۱،۶۷
Al_2O_3	۱۲،۷۳	۱۲،۲۵	۱۲،۶۶
FeO	۱۰،۳	۹،۵۰	۹،۹۰
MnO	۰،۱۹	۰،۱۷	۰،۱۴
MgO	۹،۲۰	۱۰،۲۶	۸،۴۵
CaO	۱۱،۰۹	۱۲،۵	۱۱،۸۳
Na_2O	۲،۵۷	۲،۷۵	۲،۰۵
K_2O	۰،۶۲	۰،۳۴	۰،۳۱
P_2O_5	۰،۲۳	۰،۱۰	۰،۲۰
LOI	۱،۲۰	۱،۴۰	۱،۳۰
Total	۱۰۰،۱۷	۹۹،۹۵	۹۹،۸۶

شیمی کانی‌ها

آمفیبول

پروفیل‌های شیمیایی تهیه شده از حاشیه به حاشیه در دو نمونهٔ آمفیبول (خطوط سفید رنگ در شکل ۴ آ و ب)، حضور منطقه‌بندی شیمیایی را در این کانی آشکار ساختند (شکل ۴ پ و ت). مسیرهای تجزیه شیمیایی به گونه‌ای ترتیب داده شدند که تا حد ممکن از مرکز بلورها عبور نمایند تا بیشترین تغییر ترکیب را آشکار سازند.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

نتایج به دست آمده از این تجزیه‌ها در جدول ۲ ارائه شده‌اند. فرمول ساختاری آمفیبول‌ها توسط نرم‌افزار WinAmphcal (Yavuz, 2007) بر اساس ۲۳ اتم اکسیژن محاسبه و با ۱۳ کاتیون به استثناء کلسیم، سدیم و پتاسیم (13eCNK) به هنجار شدند (جدول ۲). تمامی نتایج به دست آمده در گروه آمفیبول‌های کلسیک قرار می‌گیرند (Ca_B>1.5, Na_A+K_A<0.5) اما ترکیب آمفیبول‌ها در مرکز متفاوت از حاشیه است. مهمترین تغییرات، شامل افزایش Al، Fe, Na و K و کاهش Si و Mg از مرکز به سمت حاشیه آمفیبول‌ها هستند (شکل ۴ پ و ت).

بر اساس نمودار تقسیم‌بندی آمفیبول‌های کلسیک، بخش‌های مرکزی ترکیب اکتینولیت تا اندکی متمایل به ترمولیت داشته اما بخش‌های حاشیه‌ای مشخصاً ترکیب هورنبلندی دارند (شکل ۴ث). شایان ذکر است که این تغییرات تدریجی نیستند. به عبارت دیگر ترکیب حد واسطی بین بخش مرکزی و حاشیه دیده نمی‌شود.

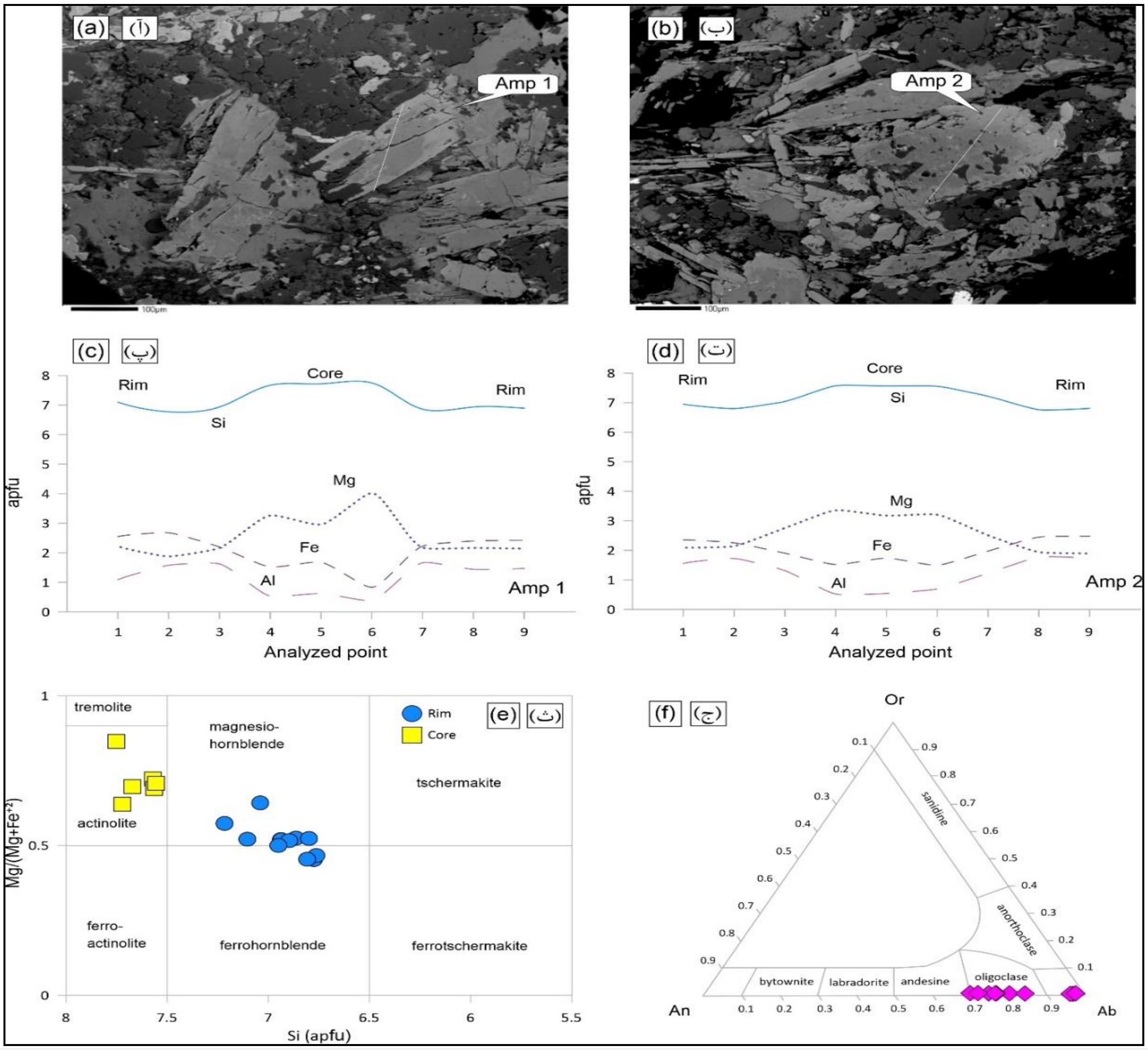
پلاژیوکلاز

پلاژیوکلازها ترکیب متنوعی در اپیدوت آمفیبولیت‌های مورد مطالعه دارند (جدول ۳). داده‌های زیرکاو الکترونی، منطقه‌بندی شیمیایی خاصی در آنها نشان نمی‌دهند اما در عوض ترکیب تک بلورها مختلف‌اند. عمدهٔ پلاژیوکلازهای تجزیه‌شده، ترکیب الیگوکلاز (میانگین $An_{69.9-84.4}Ab_{15.2-29.6}$) دارند (شکل ۴ج). تعداد ۳ بلور نیز ترکیب آلبیتی (میانگین $An_{2.6-3.2}Ab_{96.6-97.2}$) نشان می‌دهند (شکل ۴ج). در بین الیگوکلازها نیز نایکنواختی ترکیبی به چشم می‌خورد که با مقایسه داده‌های جدول ۱ و نمودار شکل ۴ج این موضوع روشن است.

اپیدوت

اپیدوت‌های مورد مطالعه ترکیبی کمابیش یکنواخت دارند (جدول ۳). در این اپیدوت‌ها مقدار آهن بر منیزیم فزونی داشته و بر اساس محتوای اعضای انتهایی، ترکیب میانگین آنها را می‌توان به صورت $Ep_{0.87}Cz_{0.13}$ در نظر گرفت. بر این اساس، آنها از نوع اپیدوت‌های محتوی کلینوزوئیزیت هستند.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



۴- (آ) و (ب) تصاویر میکروسکوپ الکترونی از نمونه‌های مورد مطالعه که مسیرهای پروفیل‌های شیمیایی تهیه شده از آمفیبول‌ها (خطوط سفید رنگ) را نشان می‌دهند؛ (پ) و (ت) تغییرات شیمیایی عناصر Si، Mg، Al و Fe در آمفیبول‌های تجزیهٔ شیمیایی شده؛ (ث) نمودار رده‌بندی آمفیبول‌های کلسیک (Hawthorn and Oberti, 2007)؛ (ج) نمودار رده‌بندی شیمیایی فلدسپارها برای پلاژیوکلازهای مورد مطالعه (Deer et al., 1963).

Fig. 4. (a) and (b) Electron microprobe images of the studied samples indicating chemical zoning in the amphiboles; (c) and (d) chemical variations in Si, Mg, Al and Fe in the analyzed amphiboles; (e) composition of analyzed points from cores and rims of the amphiboles (Hawthorn and Oberti, 2007); (f) chemical classification diagram for feldspars (Deer et al., 1963) from the studied plagioclases.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جدول ۲- ترکیب شیمیایی آمفیبول‌های تجزیه‌شده در اپیدوت آمفیبولیت‌های جنوب کردستان. اکسیدهای عناصر اصلی به صورت درصد وزنی (wt%) هستند. R: حاشیه، C: هسته

Table 2. Chemical composition of the analyzed amphiboles in epidote amphibolites from the south of Kurdistan. The major element oxides are in wt%. R: rim, C: core.

Sample					EA-01									EA-02				
Mineral					Amp 1									Amp 2				
	R	R	R	C	C	C	R	R	R	R	R	R	C	C	C	R	R	R
point	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	b1	b2	b3	b4	b5	b6	b7	b8	b9
SiO_2	۴۷،۰۴	۴۴،۲۲	۴۶،۳۲	۵۴،۲	۵۲،۶	۵۵،۵	۴۵،۹	۴۵،۹۱	۴۵،۷۱	۴۶،۵۳	۴۵،۲۷	۴۸،۱۶	۵۲،۴۲	۵۲،۵۴	۵۲،۷	۴۸،۶۹	۴۴،۸۶	۴۴،۹۳
TiO_2	۰،۳۹	۰،۷	۰،۳۹	۰،۱۲	۰،۰۳	۰،۰۰	۰،۴	۰،۴۱	۰،۵۱	۰،۴۵	۰،۴۹	۰،۲۴	۰،۲۹	۰،۰۸	۰،۰۰	۰،۳۳	۰،۴۴	۰،۲۵
Al_2O_3	۶،۱۲	۸،۷۵	۹،۲۱	۳،۲۲	۳،۵۸	۲،۴	۹،۴۳	۸،۱	۸،۲۹	۸،۸۳	۹،۷۴	۷،۶۲	۳،۰۸	۳،۱۸	۴،۱	۷،۰۱	۹،۹۷	۹،۷۶
MnO	۰،۳۲	۰،۲۹	۰،۴۲	۰،۱۹	۰،۷۴	۰،۵	۰،۳۹	۰،۳۶	۰،۳۷	۰،۳۴	۰،۴	۰،۲	۰،۲	۰،۲۶	۰،۹	۰،۵۷	۰،۴۶	۰،۵۶
FeO	۲۰،۱۹	۲۰،۸۹	۱۷،۵۴	۱۳،۳۱	۱۳،۶۵	۷،۴	۱۷،۷۹	۱۹	۱۹،۲۱	۱۸،۸۹	۱۷،۹۵	۱۵،۵۷	۱۲،۶	۱۴،۴۱	۱۲،۵	۱۵،۹۳	۱۹،۴۲	۱۹،۵۶
MgO	۹،۸۸	۸،۲۳	۹،۷۱	۱۵،۴۶	۱۳،۵۲	۱۹،۳	۹،۷۷	۹،۶۱	۹،۵۳	۹،۳۸	۹،۵۷	۱۲،۶۴	۱۵،۵۸	۱۴،۸	۱۵	۱۱،۳۵	۸،۶۴	۸،۳۹
CaO	۱۱،۶۶	۱۱،۸	۱۲،۱۳	۱۲،۲۴	۱۱،۶۶	۱۲،۳	۱۲،۱۸	۱۱،۸۷	۱۱،۸۳	۱۱،۸۴	۱۲،۰۸	۱۱،۹۳	۱۲،۵۴	۱۲،۲۲	۱۲،۳	۱۱،۸۳	۱۱،۹۵	۱۱،۹۸
Na_2O	۰،۷۱	۱،۰	۰،۵۹	۰،۳۳	۰،۳۲	۰،۴	۰،۶۷	۰،۶۸	۰،۷	۰،۷	۰،۶۷	۱،۱۲	۰،۲۸	۰،۴۱	۰،۳۵	۰،۸۴	۰،۸۳	۰،۸۱
K_2O	۰،۱۴	۰،۳۴	۰،۵	۰،۰۸	۰،۱۵	۰،۱۰	۰،۶۳	۰،۳۸	۰،۴۳	۰،۴۱	۰،۶۵	۰،۲۱	۰،۱۱	۰،۱۳	۰،۱۰	۰،۴۳	۱،۰۴	۱،۰۱
Total	۹۶،۴۵	۹۶،۲۲	۹۶،۸۱	۹۹،۱۶	۹۶،۲۵	۹۷،۹	۹۷،۱۶	۹۶،۳	۹۶،۵۶	۹۷،۳۵	۹۶،۸۱	۹۷،۶۹	۹۷،۱	۹۸،۰۳	۹۷،۹۵	۹۶،۹۹	۹۷،۶۱	۹۷،۲۵
Si	۷،۱	۶،۷۸	۶،۹۴	۷،۶۷	۷،۷۲	۷،۷۵	۶،۸۶	۶،۹۴	۶،۹	۶،۹۵	۶،۸	۷،۰۴	۷،۵۷	۷،۵۷	۷،۵۶	۷،۲۲	۶،۷۶	۶،۸۱
Al^{IV}	۰،۹	۱،۲۳	۱،۰۶	۰،۳۳	۰،۲۸	۰،۲۵	۱،۱۴	۱،۰۶	۱،۱	۱،۰۵	۱،۲	۰،۹۶	۰،۴۳	۰،۴۴	۰،۴۵	۰،۷۸	۱،۲۴	۱،۱۹
Ti	۰،۰۴	۰،۰۸	۰،۰۴	۰،۰۱	۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۵	۰،۰۵	۰،۰۶	۰،۰۵	۰،۰۶	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۰۱	۰،۰۰	۰،۰۴	۰،۰۵	۰،۰۳
Al^{VI}	۰،۱۹	۰،۳۵	۰،۵۶	۰،۲۱	۰،۳۴	۰،۱۵	۰،۵۳	۰،۳۸	۰،۳۷	۰،۵۱	۰،۵۲	۰،۳۵	۰،۱	۰،۱۱	۰،۲۵	۰،۴۴	۰،۵۳	۰،۵۵
Fe^{3+}	۰،۵	۰،۴۲	۰،۲	۰،۱	۰،۰۰	۰،۱۲	۰،۲۶	۰،۴	۰،۴۲	۰،۲۸	۰،۳۱	۰،۳۴	۰،۲۳	۰،۲۹	۰،۱۸	۰،۱۲	۰،۲۴	۰،۲۱
Mn^{2+}	۰،۰۰	۰،۰۱	۰،۰۳	۰،۰۰	۰،۰۲	۰،۰۰	۰،۰۳	۰،۰۱	۰،۰۱	۰،۰۰	۰،۰۲	۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۰	۰،۰۵	۰،۰۴	۰،۰۳	۰،۰۵
Fe^{2+}	۲،۰۵	۲،۲۶	۲،۰	۱،۴۳	۱،۶۸	۰،۷۲	۱،۹۷	۲،۰	۲،۰	۲،۰۸	۱،۹۵	۱،۵۷	۱،۲۹	۱،۴۵	۱،۳۲	۱،۸۶	۲،۲۱	۲،۲۷
Mg	۲،۲۲	۱،۸۸	۲،۱۷	۳،۲۶	۲،۹۶	۴،۰۲	۲،۱۸	۲،۱۷	۲،۱۴	۲،۰۹	۲،۱۴	۲،۷۵	۳،۳۶	۳،۱۸	۳،۲۱	۲،۵۱	۱،۹۴	۱،۹
Mn^{2+}	۰،۰۴	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۰۲	۰،۰۷	۰،۰۶	۰،۰۲	۰،۰۴	۰،۰۴	۰،۰۴	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۰۲	۰،۰۳	۰،۰۶	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۰۳
Ca	۱،۸۹	۱،۹۴	۱،۹۵	۱،۸۶	۱،۸۳	۱،۸۴	۱،۹۵	۱،۹۲	۱،۹۱	۱،۹	۱،۹۴	۱،۸۷	۱،۹۴	۱،۸۹	۱،۸۹	۱،۸۸	۱،۹۳	۱،۹۵
Na_B	۰،۰۶	۰،۰۳	۰،۰۳	۰،۰۶	۰،۰۹	۰،۰۷	۰،۰۳	۰،۰۴	۰،۰۵	۰،۰۶	۰،۰۳	۰،۰۷	۰،۰۳	۰،۰۶	۰،۰۵	۰،۰۹	۰،۰۴	۰،۰۳
Na_A	۰،۱۵	۰،۲۶	۰،۱۴	۰،۰۳	۰،۰۰	۰،۰۴	۰،۱۷	۰،۱۶	۰،۱۶	۰،۱۵	۰،۱۶	۰،۲۵	۰،۰۵	۰،۰۶	۰،۰۵	۰،۱۵	۰،۲۱	۰،۲۱
K	۰،۰۳	۰،۰۷	۰،۱	۰،۰۲	۰،۰۳	۰،۰۲	۰،۱۲	۰،۰۷	۰،۰۸	۰،۰۸	۰،۱۲	۰،۰۴	۰،۰۲	۰،۰۲	۰،۰۲	۰،۰۸	۰،۲	۰،۲
Sum	۱۵،۱۷	۱۵،۳۳	۱۵،۲۴	۱۵،۰۵	۱۵،۰۲	۱۵،۰۶	۱۵،۲۹	۱۵،۲۳	۱۵،۲۴	۱۵،۲۲	۱۵،۲۹	۱۵،۲۹	۱۵،۰۷	۱۵،۰۸	۱۵،۰۷	۱۵،۲۳	۱۵،۴۱	۱۵،۴
Mg#	۰،۵۲	۰،۴۵	۰،۵۲	۰،۷	۰،۶۴	۰،۸۵	۰،۵۳	۰،۵۲	۰،۵۲	۰،۵	۰،۵۲	۰،۶۴	۰،۷۲	۰،۶۹	۰،۷۱	۰،۵۷	۰،۴۷	۰،۴۵
Al t	۱،۰۹	۱،۵۸	۱،۶۳	۰،۵۴	۰،۶۲	۰،۴	۱،۶۶	۱،۴۴	۱،۴۷	۱،۵۶	۱،۷۲	۱،۳۱	۰،۵۲	۰،۵۴	۰،۶۹	۱،۲۳	۱،۷۷	۱،۷۴
Fe t	۲،۵۵	۲،۶۸	۲،۲	۱،۵۳	۱،۶۸	۰،۸۴	۲،۲۳	۲،۴	۲،۴۲	۲،۳۵	۲،۲۵	۱،۹	۱،۵۲	۱،۷۴	۱،۵	۱،۹۸	۲،۴۵	۲،۴۸

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

جدول ۳- ترکیب شیمیایی پلاژیوکلاز و اپیدوت در اپیدوت‌آمفیبولیت‌های جنوب کردستان. اکسیدهای عناصر اصلی به صورت درصد وزنی (wt%) هستند.

Table 3. Chemical compositions of plagioclase and epidote in epidote amphibolites from south Kurdistan. The major element oxides are in wt%. R: rim, C: core.

Sample	Ea01		Ea02									Ea01		Ea02	
Mineral	Plagioclase										Epidots				
	Pl1	Pl2	Pl3	Pl4	Pl5	Pl6	Pl7	Pl8	Pl9	Pl10		Ep-1	Ep-2	Ep-3	Ep-4
SiO_2	۶۴٫۲۶	۶۳٫۰۷	۶۳٫۵۵	۶۳٫۳۸	۶۵٫۳۱	۶۱٫۷۶	۶۲٫۲۱	۶۸٫۶۷	۶۸٫۷۸	۶۸٫۶۲	SiO_2	۳۷٫۲۳	۳۷٫۳۳	۳۷٫۷۱	۳۷٫۶۹
Al_2O_3	۲۲٫۴۹	۲۳٫۱۴	۲۳٫۰۸	۲۳٫۰۴	۲۱٫۸	۲۳٫۹۹	۲۳٫۸۶	۱۹٫۶۲	۱۹٫۶۷	۱۹٫۶۲	TiO_2	۰٫۳۲	۰٫۱۱	۰٫۰۶	۰٫۰۸
FeO	۰٫۲۷	۰٫۲۳	۰٫۱۴	۰٫۳۳	۰٫۳	۰٫۲	۰٫۲۶	۰٫۲۴	۰٫۲۳	۰٫۳۹	Al_2O_3	۲۲٫۴۵	۲۲٫۵۷	۲۲٫۸۳	۲۳٫۲۹
CaO	۳٫۶۷	۴٫۷۴	۴٫۳۷	۴٫۴۷	۲٫۹	۵٫۶۹	۵٫۳۵	۰٫۴۹	۰٫۵۵	۰٫۶۱	FeO	۱۴٫۳۵	۱۴٫۱۱	۱۲٫۹۱	۱۲٫۵۸
Na_2O	۸٫۴۴	۷٫۹۲	۸٫۱۹	۸٫۱۹	۸٫۹	۷٫۴۳	۷٫۷۳	۱۰٫۰۵	۱۰٫۱۴	۱۰٫۲۴	MnO	۰٫۲۸	۰٫۰۵	۰٫۰۸	۰٫۰۹
K_2O	۰٫۰۷	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۸	۰٫۰۶	۰٫۰۹	۰٫۱	۰٫۰۳	۰٫۰۳	۰٫۰۴	MgO	۰٫۱۹	۰٫۱۵	۰٫۰۲	۰٫۰۱
MnO	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۱	۰٫۰۰	۰٫۰۰	۰٫۰۱	CaO	۲۲٫۶۲	۲۳٫۱۴	۲۳٫۷۶	۲۳٫۸۷
Total	۹۹٫۲۱	۹۹٫۱۸	۹۹٫۴۲	۹۹٫۵	۹۹٫۲۷	۹۹٫۱۷	۹۹٫۵	۹۹٫۱۱	۹۹٫۳۹	۹۹٫۵۲	Total	۹۷٫۵۴	۹۷٫۵	۹۷٫۴	۹۷٫۶۴
Si	۱۱٫۳۸	۱۱٫۲۱	۱۱٫۲۵	۱۱٫۲۳	۱۱٫۵۴	۱۱٫۰۱	۱۱٫۰۵	۱۲٫۰۴	۱۲٫۰۳	۱۲٫۰۱	Si	۲٫۹۶	۲٫۹۶	۲٫۹۹	۲٫۹۸
Al	۴٫۶۹	۴٫۸۵	۴٫۸۲	۴٫۸۱	۴٫۵۴	۵٫۰۴	۵	۴٫۰۵	۴٫۰۵	۴٫۰۵	Ti	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱
Fe^{+2}	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۲	۰٫۰۵	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۴	۰٫۰۴	۰٫۰۳	۰٫۰۶	Al	۲٫۱	۲٫۱۱	۲٫۱۳	۲٫۱۷
Ca	۰٫۷	۰٫۹	۰٫۸۳	۰٫۸۵	۰٫۵۵	۱٫۰۹	۱٫۰۲	۰٫۰۹	۰٫۱	۰٫۱۱	Fe^{+3}	۰٫۹۶	۰٫۹۴	۰٫۸۶	۰٫۸۴
Na	۲٫۹	۲٫۷۳	۲٫۸۱	۲٫۸۱	۳٫۰۵	۲٫۵۷	۲٫۶۶	۳٫۴۱	۳٫۴۴	۳٫۴۷	Mn	۰٫۰۲	۰	۰٫۰۱	۰٫۰۱
K	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰٫۰۱	۰٫۰۱	۰٫۰۱	Mg	۰٫۰۲	۰٫۰۲	۰	۰
Total	۱۹٫۷۳	۱۹٫۷۴	۱۹٫۷۵	۱۹٫۷۸	۱۹٫۷۳	۱۹٫۷۶	۱۹٫۷۹	۱۹٫۶۴	۱۹٫۶۶	۱۹٫۷۱	Ca	۱٫۹۳	۱٫۹۷	۲٫۰۲	۲٫۰۲
An	۱۹٫۲۹	۲۴٫۷۳	۲۲٫۶۶	۲۳٫۰۶	۱۵٫۱۸	۲۹٫۵۸	۲۷٫۵	۲٫۶۳	۲٫۸۹	۳٫۱۷	Na	۰	۰	۰	۰٫۰۱
Ab	۸۰٫۲۷	۷۴٫۷۷	۷۶٫۸۵	۷۶٫۴۵	۸۴٫۴۲	۶۹٫۸۶	۷۱٫۹۲	۹۷٫۱۷	۹۶٫۹۲	۹۶٫۶	X Ep	۰٫۹۱	۰٫۸۹	۰٫۸۷	۰٫۸۳
Or	۰٫۴۴	۰٫۵	۰٫۴۹	۰٫۴۹	۰٫۴	۰٫۵۷	۰٫۵۸	۰٫۲	۰٫۱۹	۰٫۲۴	X Czo	۰٫۱	۰٫۱۱	۰٫۱۳	۰٫۱۷

دما و فشارسنجی

با توجه به تنوع در ترکیب پلاژیوکلازهای تجزیه‌شده و همچنین حضور آلبیت در نمونه‌ها، استفاده از روش دما-فشارسنجی متداول هورنبلند–پلاژیوکلاز (Holland and Blundy, 1994) به دلیل فراهم نبودن معیارهای بافتی و ژئوشیمیایی امکان‌پذیر نیست. تنوع اندک کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه نیز استفاده از ترکیب دیگر زوج کانی‌ها برای این کار را محدود می‌سازد. لذا در اینجا از روش دما-فشارسنجی بر اساس ترکیب شیمیایی آمفیبول (Zenk and Schultz, 2004) استفاده می‌شود که مبنای آن تغییرات کاتیون‌های آلومینیوم، آهن و سیلیسیم با تغییرات دما و فشار در ساختار آمفیبول‌ها است. نتایج حاصل از این دما-فشارسنجی در جدول ۴ ارائه شده است. بر اساس نتایج این محاسبات، بخش‌های مرکزی در دمای ۴۰۵ تا ۴۳۸ درجه سانتی‌گراد و بخش‌های حاشیه‌ای در دمای ۵۰۰ تا ۵۷۲ درجه سانتی‌گراد شکل گرفته‌اند. فشار نیز برای بخش‌های مرکزی از ۱/۶ تا

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

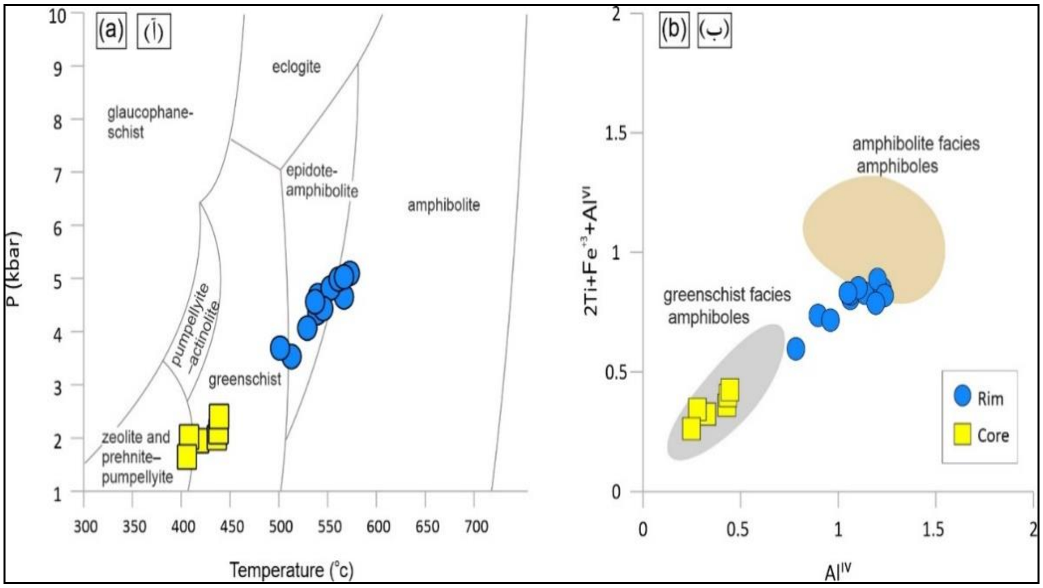
۲/۴ کیلوبار و برای بخش های حاشیه‌ای از ۳/۵ تا ۵/۱ کیلوبار تغییر می‌کند.

جدول ۴- نتایج محاسبات دما-فشارسنجی بخش‌های مرکزی (C) و حاشیه‌ای (R) آمفیبول‌های مورد مطالعه.
Table 4. Geothermobarometry calculation results for cores (C) and rims (R) of the studied amphiboles.

	Amph1								
	R	R	R	C	C	C	R	R	R
T (± 37 ºC)	۵۱۲،۲۴	۵۶۶،۰۱	۵۳۹،۳۲	۴۱۷،۶۷	۴۰۷،۴	۴۰۵،۲	۵۵۲،۱۹	۵۳۸،۷۸	۵۴۴،۸۷
P (kbar)	۳،۵۵	۴،۶۷	۴،۶۹	۱،۹۷	۲،۰۴	۱،۶۶	۴،۸۴	۴،۳۸	۴،۴۵
	Amph 2								
	R	R	R	C	C	C	R	R	R
T (± 37 ºC)	۵۳۶،۴	۵۶۰،۴۵	۵۲۸،۳۹	۴۳۵،۷۵	۴۳۷،۴۹	۴۳۸،۰۴	۵۰۰،۴۹	۵۷۲	۵۶۶،۰۳
P (kbar)	۴،۵۸	۵،۰۰	۴،۰۸	۲،۰۲	۲،۱۴	۲،۴۲	۳،۷۱	۵،۱۱	۵،۰۵
Rim average T		۵۴۳،۱							
Rim average P		۴،۵۱							
Core average T		۲،۰۴							
Core average P		۴۲۳،۶							

مقادیر دما و فشار به دست آمده برای این آمفیبول‌ها، در شکل ۵آ با شرایط رخساره‌های دگرگونی (Bushmin and Glebovitsky, 2008) مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌شود، بخش‌های مرکزی با ترکیب اکتینولیتی عمدتاً در محدوده رخساره شیست‌سبز و بخش‌های حاشیه‌ای با ترکیب هورنبلندی در محدوده رخساره‌های شیست‌سبز تا آمفیبولیت قرار گرفته‌اند اما تمرکز اصلی در محدوده رخساره اپیدوت-آمفیبولیت است. جهت بررسی بیشتر این موضوع، ترکیب آمفیبول‌ها با ترکیب دیگر آمفیبول‌های مطالعه شده در متابازیت‌های رخساره‌های شیست‌سبز و آمفیبولیت (Starr, 2017; Gutiérrez-Aguilar et al 2019) مقایسه شدند (شکل ۵ب). اکتینولیت‌ها در محدوده آمفیبول‌های رخساره شیست‌سبز واقع می‌گردند اما هورنبلندها در فاصله مابین رخساره‌های آمفیبولیت و شیست‌سبز قرار می‌گیرند. این نتایج با نمودار شکل a۶ همخوانی خوبی دارد.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۵- (آ) مقایسه مقادیر دما و فشار تشکیل بخش‌های مرکزی و حاشیه‌ای آمفیبول‌های مورد مطالعه با شرایط دما و فشار رخساره‌های دگرگونی (Bushmin and Glebovitsky, 2008)، (ب) مقایسه ترکیب شیمیایی بخش‌های مرکزی و حاشیه‌ای آمفیبول‌های مورد مطالعه با آمفیبول‌های متابازیت‌های رخساره‌های آمفیبولیت و شیست‌سبز (Starr, 2017; Gutiérrez-Aguilar et al 2019).

Fig. 5. (a) Comparison of P-T conditions of the amphibole cores and rims with those of metamorphic facies (Bushmin and Glebovitsky, 2008); (b) Comparison of chemical composition of the amphibole cores and rims with those of amphiboles from amphibolite and greenschist facies metabasites (Starr, 2017; Gutiérrez-Aguilar et al 2019).

نتایج و بحث

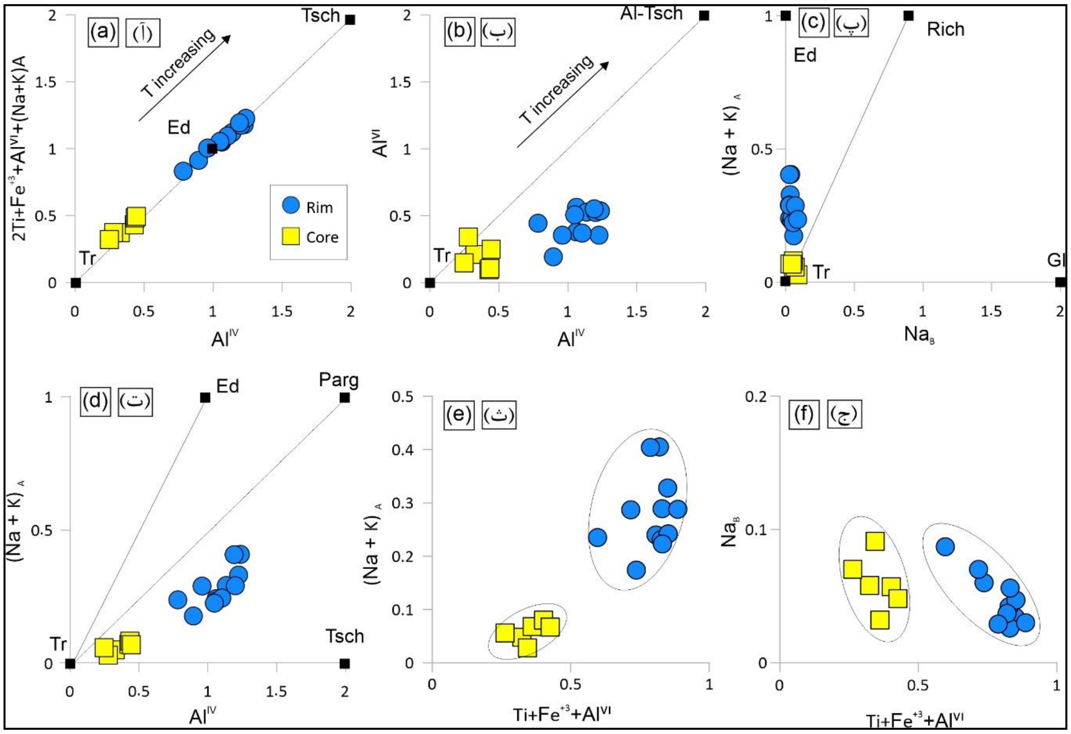
جانشینی‌های کاتیونی در ترکیب آمفیبول‌ها

کانی آمفیبول تقریباً محتوی تمامی اکسیدهای عناصر اصلی بوده و تغییرات آن توسط مکانیسم‌های جانشینی‌های کاتیونی کنترل می‌شود (Hawthorn, 1983; Schumacher, 2007). جانشینی‌ها می‌توانند به طور ساده باشند، مانند جابجایی یک عنصر با عنصر دیگر، مثلا جانشینی Mg به جای Fe^{2+} و برعکس. اما جانشینی‌های پیچیده‌تر نیز رخ می‌دهند که جانشینی‌های چرماکیت، ادنیت، پارگازیت و گلوکوفان متداول‌ترین‌ها در سنگ‌های دگرگونی هستند. اینها در نتیجه تغییر در محتوای آلومینیوم، سدیم، تیتانیم و آهن فریک به وقوع می‌پیوندند. ترکیب جانشینی‌های ادنیتی و چرماکیتی سبب ایجاد عضو انتهایی پارگازیت در آمفیبول‌ها می‌گردد (Graham, 1974). در یک بیان ساده، اینها شامل جانشینی این عناصر در ساختار پایه ترمولیت می‌شوند. این جانشینی‌ها را می‌توان به طور ساده به صورت ذیل توصیف نمود:

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

برای جانشینی چرماکیتی	$Mg_{(B)} + Si$ به جای $Al^{(VI)} + Al^{(IV)} + Fe^{+3} + Ti^{(VI)}$
برای جانشینی ادنیتی	$\square(A) + Si$ به جای $Na_{(A)} + Al^{(IV)}$
برای جانشینی گلوکوفان	$Mg_{(B)} + Ca_{(B)}$ به جای $Na_{(B)} + Al^{(VI)}$
برای جانشینی پارگازیتی	$Si + Mg_{(B)}$ به جای $Na_{(A)}+Al^{(VI)}+Fe^{+3}$

بنابراین، از طریق رسم نمودارهای تغییرات این عناصر در برابر یکدیگر می‌توان جانشینی‌های رخ داده در ترکیب آمفیبول‌ها در طی افزایش درجه دگرگونی را بررسی نمود. در اینجا از تغییرات Al^{IV}، Al^{VI}، Ti، Na_B، Na_A و K_A (جدول ۱) جهت بررسی جانشینی‌های کاتیونی ساختار آمفیبول‌های مورد مطالعه استفاده می‌شود (شکل ۶). نمودارهای ارائه شده به خوبی نشان می‌دهند که تغییر در ترکیب آمفیبول‌ها در مرکز به سمت حاشیه به طور عمده در نتیجه جانشینی‌های چرماکیتی، ادنیتی و پارگازیتی ایجاد شده است. این جانشینی‌ها سبب افزایش آلومینیوم، آهن و سدیم در بخش‌های حاشیه‌ای گشته‌اند (شکل c۴ و d). تمامی این جانشینی‌ها همراه با افزایش درجه دگرگونی رخ می‌دهند (مانند Graham, 1974; Shcumacher, 1991; Ríos 2005; Schumacher, 2007; Starr and Pattison, 2019).



شکل ۶- جانشینی‌های کاتیونی در آمفیبول‌های مورد مطالعه. Ed: ادنیت، Parg: پارگازیت، Rich: ریشتریت، Tsch: چرماکیت.

Fig. 6. Cation substitutions in the studied amphiboles. Ed: edenite, Par: Pargasite, Tsch: tschermakite, Rich: Richterite.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

ناپیوستگی شیمیایی در آمفیبول‌ها

رخداد منطقه‌بندی شیمیایی کم و بیش ناپیوسته در آمفیبول‌های مورد مطالعه نشان دهنده تشکیل آنها در طی شرایط دگرگونی متفاوت است. این موضوع می‌تواند به دو دلیل رخ داده باشد: (۱) عدم رسیدن به یک تعادل کامل در طی گذر از رخساره شیست‌سبز به آمفیبولیت که در این صورت باید مراکز بلورها را به عنوان بازمانده (relict) و بخش‌های حاشیه‌ای را به عنوان فاز جدید در نظر گرفت. (۲) رخداد یک نبود (gap) اختلاطی در آمفیبول‌ها در زمان تشکیل.

در سیستم‌های دگرگونی، آمفیبول‌هایی که در درجات پائین شکل می‌گیرند می‌توانند به عنوان سطحی برای رشد آمفیبول‌های درجات بالاتر عمل نمایند. این موضوع سبب رورشدی آمفیبول‌ها بر روی یکدیگر می‌گردد. چنانچه دما به اندازه کافی بالا باشد تا سبب انتشار بین-لایه‌ای شود، تغییرات شیمیایی به طور پیوسته رخ داده و به صورت منطقه‌بندی شیمیایی آشکار در مقاطع میکروسکوپی بروز می‌کنند. اما در دماهای پائین، ناپیوستگی شیمیایی بین آمفیبول‌های نوع اول و نوع دوم ایجاد می‌شود. این ناپیوستگی می‌تواند تابعی از نرخ و دمای وقوع واکنش‌ها و نرخ سردشدگی باشند. در نتیجه، ناپیوستگی شیمیایی به عنوان شاهدی بر نبودهای اختلاطی در نظر گرفته می‌شود (Schumacher, 2007).

نبود اختلاطی هورنبلند – اکتینولیت در شرایط دگرگونی فشار پائین تا متوسط رخ داده و سبب منطقه-بندی شیمیایی می‌گردد (مانند Smelik et al., 1991; Zingg, 1996). بهترین نمود این نبود در شرایط رخساره اپیدوت –آمفیبولیت است (Grapes, 1975; Schumacher, 2007). نبود اختلاطی هورنبلند – اکتینولیت نخستین بار توسط Oba (۱۹۸۰) و Oba و Yagi (۱۹۸۷) در امتداد بردار جانشینی ترمولیت – اکتینولیت -پارگازیت بررسی شد. نبود ترکیبی از اکتینولیت به هورنبلند با افزایش در مقدار کاتیون در جایگاه ساختاری A آمفیبول مشخص می‌شود، یعنی ^{C}Al، ^{C}Ti، $^{C}Fe^{3+}$ و ^{B}Na افزایش یافته و ^{T}Si، ^{B}Ca و XMg ($X_{Mg} = Mg/Mg+Fe^{+2}$) کاهش می‌یابد (Starr and Pattison, 2019). آمفیبول‌های با X_{Mg} پائین‌تر مشخصاً محتوی آلومینیوم بیشتری نسبت به انواع با X_{Mg} بالا هستند (Robinson et al., 1982). از این رو، کاهش X_{Mg} سبب بالا رفتن نرخ جانشینی چرماکیتی و ادنیتی در آمفیبول‌ها شده و این نبود ترکیبی بارز می‌گردد. بررسی‌های Zingg (۱۹۹۶) نشان می‌دهند که تغییر در مقادیر Fe^{+2} موجب کاهش دمای رخداد این نبود گشته و در ترکیبات با منیزیم بالاتر احتمال رخداد این نبود بیشتر است. تغییر شکل ناشی از تنش‌های برشی در طی دگرگونی می‌تواند بر میزان ناپیوستگی شیمیایی بین اکتینولیت و هورنبلند بیفزاید (Grapes, 1984).

آمفیبول‌های دارای منطقه‌بندی شیمیایی که در نتیجه نبود اختلاطی ایجاد شده‌اند در نمودارهای $Ti+Al^{VI}+Fe^{+3}$ در برابر Na_B و $(Na+K)_A$ یک خط ممتد تشکیل نداده و در بین آنها فاصله ایجاد می‌شود (Laird and Albee, 1981). آمفیبول‌ها مورد مطالعه در شکل ۶ ث و ج بر روی این نمودارها ترسیم شده‌اند و همانطور که مشخص است در روند قرارگیری نقاط ناپیوستگی مشهود است. این ناپیوستگی در سایر نمودارهای شکل ۵ نیز دیده می‌شود که تایید کننده رخداد یک نبود اختلاطی در زمان تشکیل می‌باشد. شوک

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

حرارتی ناشی از نفوذ توده‌های آذرین به درون لایه‌های دگرگونی ناحیه‌ای می‌تواند سبب این منطقه‌بندی شیمیایی شود (Miri et al., 2016).

از سوی دیگر، شواهد بافتی مانند حاشیه‌های واکنشی هورنبلند و اپیدوت (شکل ۳پ) را می‌توان گواهی بر حاصل نشدن یک تعادل کامل در تشکیل این مجموعه کانیایی در نظر گرفت. همچنین نبود ترکیبی آلبیت – الیگوکلاز نیز که در نمونه‌ها مشاهده می‌شود در متابازیت-های فشار متوسط تا پائین در شرایط انتقالی شیست‌سبز - آمفیبولیت رخ داده (Laird and Albee, 1981; Maruyama et al., 1982) و نشان دهنده تشکیل در شرایط عدم تعادل در طی افزایش درجه دگرگونی است (Starr and Pattison, 2019). بر این اساس، به نظر می‌رسد که رخداد منطقه‌بندی شیمیایی ناپیوسته در نمونه‌های مورد مطالعه محصول عوامل مختلفی بوده و نمی‌توان آنها را منحصر به یک موضوع دانست.

نمودارهای فازی

نمودارهای فازی در تعیین شرایط تشکیل و تحلیل رخداد مجموعه‌های کانیایی سنگ‌های دگرگونی بسیار مفید هستند. در این پژوهش نمودار فازی با بهره‌گیری از نرم‌افزار Perplex (Connolly, 2005) نسخه 6.9.1.2021 و مدل‌های محلول جامد cAmph(G) برای آمفیبول (Green et al., 2016)، Ep(HP11) برای اپیدوت (Holland and Powel, 2011)، Opx(W) برای ارتوپیروکسن (White et al., 2014)، Chl(W) برای کلریت (White et al., 2014) و Fsp(C1) برای پلاژیوکلاز (Holland and Powell, 2003) ترسیم شده‌اند (شکل ۷).

ترکیب شیمیایی نمونه EA01 که از نظر سنگ‌نگاری دارای مقادیر متناسب هورنبلند و اپیدوت (گواهی بر شرایط رخساره اپیدوت-آمفیبولیت) و نیز دارای کمترین ناخالصی کانی‌های کربناتی بود، جهت انجام محاسبات استفاده شد (لازم به توضیح است که مقادیر بالای CaO سبب تشکیل بیش از اندازه فازهای دارای کلسیم در نمودارهای فازی سنگ‌های متابازیک شده و تاثیر زیادی بر مسیر دیگر واکنش‌ها می‌گذارند). نمودار فازی دما و فشار با استفاده از مقادیر اکسید عناصر CaO، Na_2O، FeO، MgO و Al_2O_3 محاسبه شده است (جدول ۱، شکل ۷). همچنین آب و اکسیژن مازاد نیز به سیستم اضافه شد تا مجموعه کانی مشاهده شده در نمونه مورد مطالعه ایجاد گردند. بر این اساس، سیستم شیمیایی مورد استفاده را می‌توان NCFMASHO تعریف نمود. سیال در ابتدا به صورت آب خالص در نظر گرفته شد تا تاثیر متشکله CO_2 بعداً به صورت مجزا بررسی گردد. نمودار به دست آمده نشان دهنده تغییرات کانی‌شناسی نمونه مورد مطالعه از شرایط رخساره زیر شیست‌سبز تا آمفیبولیت بالایی می‌باشد. همچنین به منظور بررسی تغییرات ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازها با افزایش دما و فشار در نمودار فازی شکل ۷، خطوط هم ترکیب (Isopleth) برای متشکله‌های چرماکیت، ترمولیت و آنورتیت در سیستم مورد مطالعه محاسبه شدند (شکل ۸).

بر اساس این نمودارها، مجموعه کانیایی رخساره زیر شیست‌سبز شامل آلبیت + آمفیبول ۱ (محتوی ترمولیت بالا) + کلریت + اپیدوت + وایراکیت بوده که در شرایط رخساره شیست‌سبز، وایراکیت از سیستم حذف شده و مجموعه پلاژیوکلاز + اپیدوت + کلریت + آمفیبول + کوارتز، پایدار می‌گردد (شکل ۷). در دماهای بالاتر از ۴۲۰

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

درجه سانتی‌گراد، نوع دوم آمفیبول در سیستم ظاهر شده و کلریت رفته رفته سیستم را ترک می‌کند. در محدوده دمایی ۴۵۰ تا ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد و فشار ۲/۵ تا ۶/۵ کیلوبار، مجموعه کانی آمفیبول۱ + آمفیبول۲ + اپیدوت + پلاژیوکلاز + کوارتز به پایداری می‌رسد (محدوده مشخص شده با خط‌چین زردرنگ) که تقریباً در محدوده شرایط رخساره اپیدوت-آمفیبولیت قرار می‌گیرد (شکل ۵آ). شکل‌گیری این مجموعه را می‌توان در تغییرات ترکیبی آمفیبول‌های مورد مطالعه از مرکز به حاشیه مشاهده نمود. میانگین مقادیر دما و فشار محاسبه شده برای نمونه‌ها (جدول ۳) که با نمادهای ستاره (۱ و ۲) بر روی نموداری شکل ۷ نشان داده شده‌اند انطباق خوبی با محدوده موردنظر دارند. اگرچه دماهای بخش‌های حاشیه‌ای مقداری بیشتر است (حدود ۲۵ درجه سانتیگراد) اما این نیز در محدوده خطای تخمینی روش مورد استفاده (37± °C) قرار می‌گیرد.

در شرایط گذر از رخساره شیست‌سبز به رخساره آمفیبولیت، تغییرات عمده شامل افزایش آلومینیوم آمفیبول‌ها و کلسیم پلاژیوکلازها از طریق واکنش‌های مصرف کننده اکتینولیت، اپیدوت و کلریت می‌باشد تا مجموعه کانیایی هورنبلند + الیگوکلاز شکل بگیرد. این تغییرات سبب بالا رفتن محتوای چرماکیت و پائین آمدن محتوای ترمولیت آمفیبول‌ها (جانشینی چرماکیتی) به همراه افزایش محتوای آنورتیت پلاژیوکلازها می‌گردند. افزایش نسبت چرماکیت / ترمولیتِ آمفیبول و آنورتیتِ پلاژیوکلاز در نمودارهای خطوط هم‌ترکیب شکل ۸ با افزایش دما و فشار کاملاً مشخص بوده و تأیید کننده رخداد جانشینی چرماکیتی در این سنگ‌هاست که پیش از این در نمودارهای شکل ۶ نیز دیده شد.

این تغییرات کانی‌شناسی از طریق واکنش های زیر امکان‌پذیر هستند (مانند Graham 1974; Laird 1982):

واکنش ۱

اکتینولیت + کلریت + اپیدوت + کوارتز = چرماکیت + آب

واکنش ۲

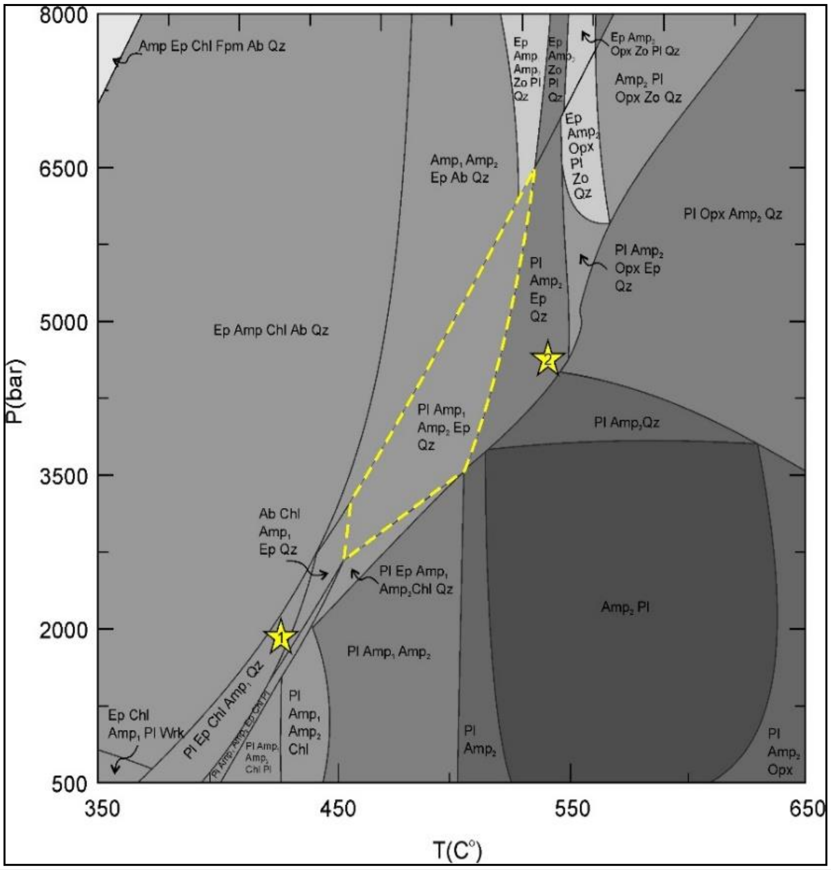
آلبیت + اکتینولیت = ادنیت + کوارتز

واکنش ۳

کلریت + اپیدوت + کوارتز = چرماکیت + آنورتیت + آب

رخداد این واکنش‌ها را می‌توان در حاشیه‌های ناپایدار اپیدوت و آمفیبول (شکل ۳پ) مشاهده نمود. نبود کلریت در نمونه‌ها، نشان‌دهنده مصرف کامل آن در طی این واکنش‌ها است. با افزایش دما و فشار، اپیدوت و آمفیبول۲ از سیستم حذف و ارتوپیروکسن و زوئیزیت جایگزین آنها می‌گردند. نبود ارتوپیروکسن و زوئیزیت در هیچ یک از نمونه‌های مورد مطالعه، نتایج تخمین زده شده توسط نمودار را تأیید می‌نمایند.

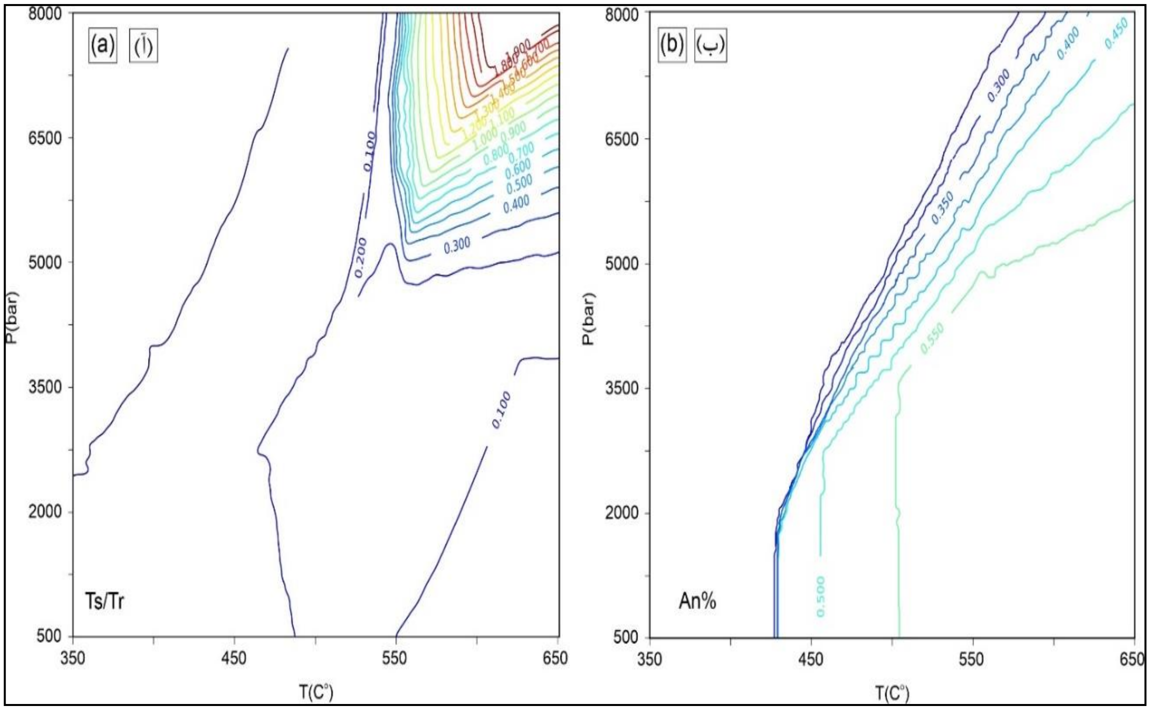
[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۷- نمودار فازی دما – فشار محاسبه شده بر اساس ترکیب شیمیایی نمونه EA01. علامت‌های اختصاری کانی‌ها: Ab: آلبیت، Amp: آمفیبول، Chl: کلریت، Ep: اپیدوت، Fpm: فروپامپلئیت Opx: ارتوپیروکسن، Pl: پلاژیوکلاز، Qz: کوارتز، Wrk: وایراکیت، Zo: زوئیزیت (Whitney and Evans, 2010). نشانه‌های ستاره ۱ و ۲، به ترتیب مقادیر میانگین دما و فشار محاسبه شده برای بخش‌های مرکزی و حاشیه‌ای آمفیبول‌های مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

Fig. 7. P-T phase diagram calculated using EA01 sample composition. Mineral’s abbreviations are Ab: albite, Amph: amphibole, Chl: chlorite, Ep: epidote, Fpm: ferropumpellyite, Opx: orthopyroxene, Pl: plagioclase, Qz: quartz, Wrk: wairakite, Zo: zoisite (Whitney and Evans, 2010). The star symbols 1 and 2 show average geothermobarometry P-T calculated for cores and rims of the studied amphiboles, respectively.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]



شکل ۸- خطوط هم‌ترکیب (Isoplth) محاسبه شده برای (آ) تغییرات نسبت محتوای چرماکیت به ترمولیت (Ts/Tr) در آمفیبول و (ب) آنورتیت در پلاژیوکلاز در نمودار فازی شکل ۷.

Fig. 8. Calculated isopleths for (a) tschermakite/tremolite (Ts/Tr) ration for amphibole and (b) anorthite for plagioclase in the Fig. 7 phase diagram.

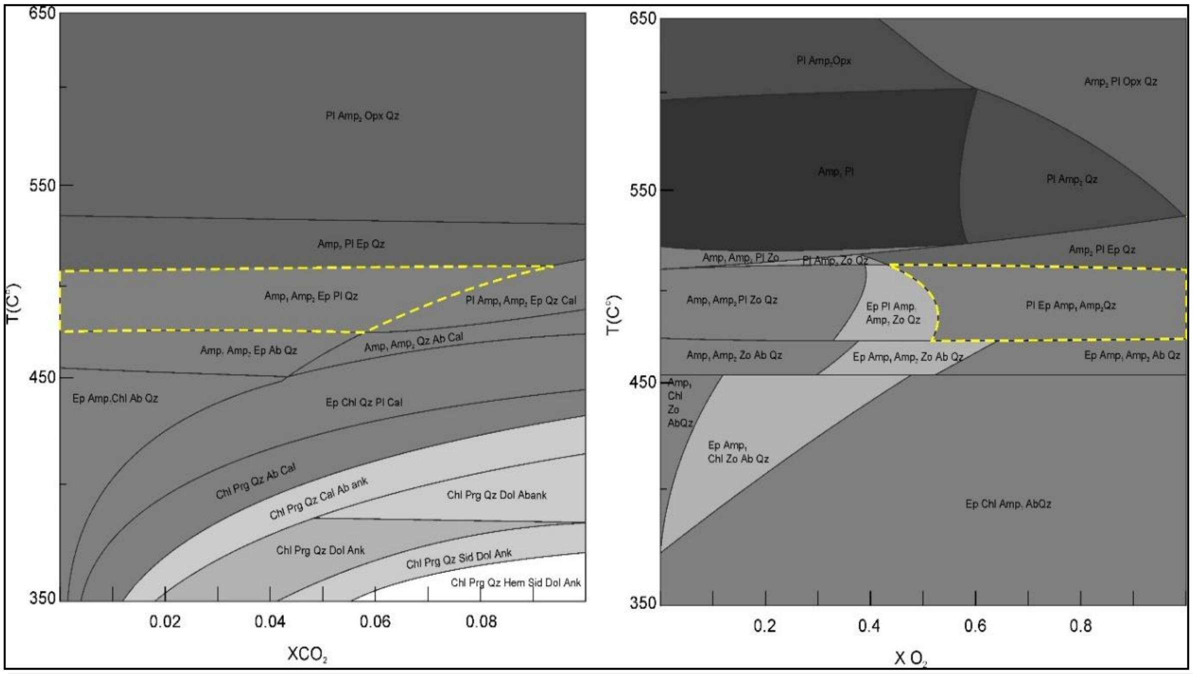
ترکیب سیال می‌تواند نقشی تعیین کننده در ایجاد مجموعه‌های کانیایی در طی فرآیندهای دگرگونی داشته باشد. به طور پیش‌فرض، سیال دگرگونی را ترکیبی از آب – دی‌اکسید کربن (H_2O-CO_2) در نظر می‌گیرند اگرچه، متشکله‌های دیگر مانند O_2، F، Cl و CO نیز می‌توانند به‌صورت محدود و محلی لحاظ شوند. به منظور بررسی تاثیر ترکیب سیال در دگرگونی متابازیت‌های مورد مطالعه، نمودارهای فازی دما-محتوای دی‌اکسید کربن (T-XCO_2) و دما – محتوای اکسیژن (T-XO_2) در فشار ثابت ۴/۵ کیلوبار محاسبه شده است (شکل ۹).

با توجه به تاثیر فراوان دی‌اکسید کربن بر مجموعه‌های کانیایی و به منظور تمرکز بیشتر بر تغییرات کانی‌شناسی نمونه‌های مورد مطالعه، در نمودار T-XCO_2، تنها مقدار تغییرات ۰ تا ۱۰ درصد در اینجا نشان داده شده است (شکل ۹آ). همانطور که مشاهده می‌گردد، در دماهای کمتر از ۵۵۰ درجه سانتی‌گراد، مجموعه کانی‌ها با بالا رفتن مقدار دی‌اکسیدکربن دارای کانی کربنات (کلسیت، دولومیت، آنکریت) می‌گردند. مجموعه آمفیبول ۱ + آمفیبول ۲ + پلاژیوکلاز + اپیدوت در مقادیر دی‌اکسید کربن کمتر از ۹ درصد پایدار است و نبود کلسیت

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

در نمونه‌های مورد مطالعه نشان می‌دهد که محتوای دی-اکسید کربن سیال از این فراتر نرفته است.

در تشکیل مجموعه‌های اپیدوت‌دار، اکسیژن نقش مهمی دارد. با تغییرات مقدار اکسیژن در محیط، کانی‌های زوئیزیت، کلینوزوئیزیت و اپیدوت جایگزین هم می‌شوند (Grapes and Hoskin, 2004). نمودار $T-XO_2$ (شکل ۹ب) نشان می‌دهد که در محدوده دمایی تشکیل نمونه‌ها، در شرایط کم اکسیژن ($XO_2=0$) زوئیزیت گونه غالب در محیط است اما با افزایش اکسیژن، زوئیزیت از سیستم حذف شده و اپیدوت جایگزین آن گردیده است (محدوده مشخص شده با خط چین زرد رنگ در شکل ۹ب). با توجه به وجود اپیدوت و نبود زوئیزیت در سنگ‌های مورد مطالعه، می‌توان نتیجه گرفت که اکسیژن به میزان بالا در محیط دگرگونی حضور داشته و ترکیب سیال اکسیدان بوده است.



شکل ۹- آ) نمودار فازی $T-XCO_2$ و ب) نمودار فازی $T-XO_2$ محاسبه شده با استفاده از ترکیب شیمیایی نمونه EA01. علائم اختصاری کانی‌ها مشابه با شکل ۷. خط چین‌ها مرز مجموعه‌های پایدار در نمونه های مورد مطالعه با سایر مجموعه‌ها را نشان می‌دهند.

Fig. 9. (a) $T-XCO_2$ and (b) $T-XO_2$ phase diagrams calculated using EA01 sample composition. The mineral abbreviations are as Fig. 7. The dash-lines show boundaries between the stable assemblages in the studied samples and the other assemblages.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

نتیجه‌گیری

منطقه‌بندی شیمیایی آمفیبول با مراکز اکتینولیتی و حاشیه‌های هورنبلندی (با تغییرات ناپیوسته)، تنوع در ترکیب پلاژیوکلازها و حاشیه‌های واکنشی هورنبلند و اپیدوت در بخشی از متابازیت‌های منطقه جنوب استان کردستان را می‌توان گواهی بر شرایط گذر از رخساره شیست‌سبز به رخساره آمفیبولیت دانست. هرچند اثبات کامل این موضوع نیاز به انجام بررسی‌های بیشتر در دیگر نقاط این منطقه دارد.

تغییرات ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها در نتیجه جانشینی‌های آلومینیوم، آهن و سدیم و در راستای بردارهای جانشینی چرماکیت، ادنیت و تا حدی پارگازیت، همزمان با افزایش درجه دگرگونی رخ داده است.

محاسبات دما و فشارسنجی و مقایسه ترکیب شیمیایی آمفیبول‌ها با سایر پژوهش‌ها، نشان می‌دهند که بخش‌های مرکزی در شرایط رخساره شیست‌سبز و بخش‌های حاشیه‌ای در شرایط رخساره اپیدوت-آمفیبولیت (شرایط مرزی رخساره‌های شیست‌سبز و آمفیبولیت) شکل گرفته‌اند. این موضوع با نمودارهای فازی محاسبه شده تا حد زیادی سازگاری دارد.

نمودارهای فازی دما-ترکیب سیال نشان می‌دهند، که CO_2 مشارکت اندکی در رخداد مجموعه کانیایی متابازیت‌های مورد مطالعه داشته و اکسیژن تا اندازه‌ای بالا بوده که مانع از تشکیل زوئیزیت شود.

حضور آمفیبول‌های دارای منطقه‌بندی شیمیایی ناپیوسته و حضور همزمان الیگوکلاز و آلبیت نشان دهنده نرسیدن به یک شرایط تعادل پایدار در زمان تشکیل این سنگ‌هاست که می‌تواند به دلیل شارهای حرارتی ناشی از نفوذ توده‌های آذرین و سیالات منتج شده از آنها در منطقه باشد. اگرچه این یک مطالعه موردی در این خصوص است اما می‌تواند اساسی برای انجام پژوهش‌های گسترده‌تر در این باره باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از دانشگاه شهید چمران اهواز جهت تامین هزینه آنالیز نمونه‌های مقاله حاضر از محل اعتبار پژوهانه (SCU.EG.1400.44295) قدردانی به عمل می‌آید.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

منابع

ترکیان، ا.، ایزدیار، ج.، رضوانی مکبر، ز.، سپاهی، ع. ا.، "سنگ‌نگاری و کاربرد شیمی بلور در بررسی‌های ترمودینامیکی سنگ‌های دگرگونی، منطقه زرینه، جنوب قروه- کردستان". مجله بلورشناسی و کانی شناسی ایران، دوره ۲۵، شماره ۴ (۱۳۹۸) صفحات ۷۸۶-۷۷۵.

شیخ ذکریایی، ج.، منصف، ا.، "کانی شناسی - پتروفابریک مجموعه دگرگونی قروه (شمال غرب ایران)"، مجله علوم پایه دانشگاه آزاد اسلامی، دوره ۲۰ ، شماره ۷۷ (۱۳۸۹)، صفحه ۲۰۳ تا ۲۲۰.

عمرانی، ه.، "مطالعه دگرگونی و دگرشکلی سنگ های جنوب و جنوب قروه، استان کردستان"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تبریز، (۱۳۸۴).

میری، م، م.، "شیمی کانی، ترموبارومتری و تحول دگرگونی آمفیبول شیست ها و آمفیبولیت های مناطق قروه و همدان"، پایان نامه دکتری، دانشگاه بوعلی سینا، (۱۳۹۵).

Azizi, H., Nouri, F., Stern R. J., Azizi, M., Lucci, F., Asahara, Y., Zarinkoub, M.H., Chung, S. L., New evidence for Jurassic continental rifting in the northern Sanandaj Sirjan Zone, western Iran: the Ghalaylan seamount, southwest Ghorveh. International Geology Review, 62 (2020) 1–23.

Azizi, H., Stern, R.J. "Jurassic igneous rocks of the central Sanandaj‐Sirjan zone (Iran) mark a propagating continental rift, not a magmatic arc", Terra Nova. 31 (2019) 415-423.

Begin, N., “Contrasting mineral isograd sequences in metabasites of the Cape Smith Belt, northern Quebec, Canada: three new bathograds for mafic rocks”. Journal of Metamorphic Geology, 10 (1992) 685–704.

Berberian, F., Berberian, M., "Tectono-plutonic episodes in Iran", In: Zagros, Hindukush, Himalaya Geodynamic Evolution, Eds. Gupta, H.K., Delany, F.M., AGU, (1981) 5–32.

Berberian, M. King, G., "Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran", Canadian Journal of Earth Sciences, 18 (1981) 210–265.

Bucher, K., Grapes, R., "Petrogenesis of metamorphic rocks. Springer", (2011) 428p.

Bushmin, S.A., Glebovitsky, V.A., "Scheme of Mineral Facies of Metamorphic Rocks", Geology of Ore Deposits, 50 (2008), 659-669.

Connolly, J.A.D., "Computation of phase equilibria by linear programming: A tool for geodynamic modeling and its application to subduction zone decarbonation", Earth and Planetary Science Letters, 236 (2005), 524–541.

Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., "Rock forming minerals, volume4A, framework silicates". Wiley, (1963), 992p.

Ghasemi, A., Talbot, C.J., "A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran)", Journal of Asian Earth Science, 26 (2006) 683–693.

Graham, C.M., "Metabasite amphiboles of the Scottish Dalradian". Contributions to Mineralogy and Petrology, 47 (1974) 165–185

Grapes, R.H., Hoskin P.W.O. "Epidote Group Minerals in Low–Medium Pressure Metamorphic Terranes", Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 56 (2004) 301-345.

Grapes, R.H., "Actinolite-Hornblende Pairs in Metamorphosed Gabbros, Hidaka Mountains,

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

Hokkaido", Contributions to Mineralogy and Petrology, 49 (1975), 125-140.
Green, E.C.R., White, R.W., Diener, J.F.A., Powell, R., Holland, T.J.B., Palin, R.M., "Activity-composition relations for the calculation of partial melting equilibria in metabasic rocks", Journal of Metamorphic Geology, 34 (2016), 845-869.
Gutiérrez-Aguilar, F., Schaaf, P., Solís-Pichardo, G., Arrieta-García, G., Hernández-Treviño, T., Linares-López, C., "Phase equilibrium modelling of the amphibolite facies metamorphism in the Yelapa-Chimo Metamorphic Complex, Mexico", Geoscience Frontiers, 12 (2021) 293-312.
Hassanzadeh, J., Wernicke, B., "The Neotethyan Sanadaj–Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin–arc transitions". Tectonics, 35 (2016) 586–621.
Hawthorn, F.C., Oberti, R., "Classification of the amphiboles", Reviews in Mineralogy and Geochemistry 67 (2007) 55–88.
Hawthorne, F.C., "The Crystal Chemistry of the Amphiboles", Canadian Mineralogist, 21, (1983) 173–480.
Holland, T. J. B., Powell, R., "Activity-composition relations for phases in petrological calculations: an asymmetric multicomponent formulation", Contributions to Mineralogy and Petrology 145 (2003) 492-501.
Holland, T. J. B., Powell, R., "An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids", Journal of Metamorphic Geology, 29 (2011) 333 – 383.
Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., "Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons," American Mineralogist, 72 (1987) 231–239.
Hosseini, M., "Geological map of Qorveh, 1:100000", Geological Survey of Iran, (1999).
Laird, J., "Phase relations of metamorphic amphiboles; natural occurrence and theory; amphiboles in metamorphosed basaltic rocks; greenschist facies to amphibolite facies", Reviews in Mineralogy and Geochemistry 9 (1982) 113–138.
Laird J., Albee A.L., "Pressure, temperature, and time indicators in mafic schist: their application to reconstructing the polymetamorphic history of Vermont". American Journal of Science, 281 (1981) 127-175.
Maruyama, S., Liou, J.G., Suzuki, K., "The peristerite gap in low-grade metamorphic rocks". Contributions to Mineralogy and Petrology, 81 (1982) 268–276.
Miri, M., Sepahi, A., Aliani, F., Maanijou, M., "Chemical Zoning of Ca-Amphiboles in Amphibolites, from the Hamedan Area, West Iran", Arabian Journal of Geosciences 9 (2016) 13:619.
Miyashiro, A., "Volcanic Rock Series in Island Arcs and Active Continental Margins", American Journal of Science, 274 (1974) 321-355.
Mohajjel, M., Fergusson, C.L., "Jurassic to Cenozoic tectonics of the Zagros Orogen in northwestern Iran", International Geology Reviews, 56 (2014) 263–287.
Oba, T.U, Yagi, K., "Phase Relations on the Actinolite-Pargasite Join", Journal of Petrology 281 (1987) 23–36.
Oba, T., "Phase relations in the tremolite-pargasite join", Contribution to Mineralogy and Petrology 71(1980) 247–256

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]

Oliveira, D.P., Wiechowski, A., Robb, L., Inverno, C., "Amphibolite vs. banded amphibolite: a case study in the São Martinho-Arronches area, Tomar Cordoba Shear Zone, NE Ossa Morena Zone, Portugal", Cadernos Lab. Xeolóxico de Laxe, 28 (2003) 213-229.

Ríos, C., "Cation substitutions governing the chemistry of amphibole in the Silgará Formation metabasites at the southwestern Santander Massif", Boletín de Geología UIS, 27 (2005), 13-30.

Robinson, P., Spear, F.S., Schumacher, J.C., Laird, J., Klein, C., Evans, B.W., Doolan, B.L., "Phase relations of metamorphic amphiboles: Natural occurrence and theory", In: Amphiboles: Petrology and Experimetal Phase Relations, Eds. Veblen D.R., Ribbe P.H., Reviews in Mineralogy, 9 (1982), 1-227.

Sartibi, A.H., "Geological map of Sanandaj, 1:100000", Geological Survey of Iran, (2005).

Schumacher, J.C., "Metamorphic amphiboles: composition and coexistence", Reviews in Mineralogy and Geochemistry, 67 (2007) 359–416.

Schumacher, R., (1991) "Compositions and phase relations of calcic amphiboles in epidote- and clinopyroxene-bearing rocks of the amphibolite and lower granulite facies, central Massachusetts, USA Renate Schumacher", Contributions to Mineralogy and Petrology, 108 (1991) 196-211

Smelik, E.A., Veblen, D.R., "Exsolution of cummingtonite from glaucophane - a new orientation for exsolution lamellae in clinoamphiboles". American Mineralogist 76 (1991) 971-984.

Starr, P., "Sub-Greenschist to Lower Amphibolite Facies Metamorphism of Basalts: Examples from Flin Flon, Manitoba and Rossland, British Columbia", Phd thesis, University of Calgary (2017).

Starr, P.G., Pattison, D.R.M., "Equilibrium and disequilibrium processes across the greenschist–amphibolite transition zone in metabasites", Contributions to Mineralogy and Petrology, (2019) 174:18.

White, R.W., Powell, R., Holland, T.J.B., Johnson, T.E., Green, E.C.R., "New mineral activity-composition relations for thermodynamic calculations in metapelitic systems", Journal of Metamorphic Geology, 32 (2014) 261-286.

Whitney, D.L. Evans, B.W., "Abbreviations for names of rock-forming minerals", American Mineralogist, 95 (2010) 185-187.

Yavuz, F., " WinAmphcal: A Windows program for the IMA04 amphibole classification", Geochemistry, Geophysics, Gcosystems, 8 (2007) 1-12.

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

Zingg, A.J., "Immiscibility in Ca-amphiboles", Journal of Petrology, 37 (1996) 471- 496.

[Downloaded from gnf.khu.ac.ir on 2025-12-15]