

**Research Article****Crystal size distribution of garnet and geochemistry of Hal Hal Chaldoran garnet amphibolites-Northwest corner of Iran**Monir Modjarrad<sup>1\*</sup>, Samad Alipour<sup>1</sup>

1- Geology Department, Faculty of Sciences, Urmia University, Urmia, Iran

**Keywords:** Crystal Size Distribution (CSD), Nucleation and growth rate, Garnet, Amphibolite, Hal Hal Chaldoran**1- Introduction**

Garnet has full resistance to weathering and regrowth on the nucleus of previous garnets is common during metamorphic conditions (Manzotti and Balleve, 2013). Four major processes have role in nucleation and growth of porphyroblasts, are: 1- Dissolution of the source material providing the necessary nutrients. 2- Accumulation of necessary materials in different places and /or from different sources and transitions from intergranular space to nucleation sites. 3- Atomic-scale nucleation where chemical components result from the transfer of materials and possibly the local reactant phases are deformed and transformed into a cumulative product phase in sufficient dimensions and suitable and thermodynamically stable. 4- Sedimentation and further deposition of materials on existing surfaces, is called crystal growth (Lanari and Engi, 2017). The overstepping of a reaction is very important. Even if a product phase is thermodynamically and theoretically a stable phase, it is possible that the nucleation of it is failed (Waters and Lovegrove, 2002). Microstructural properties may accelerate nucleation by increasing the free energy, locally. For example, at the hinges of microfolds or at the border of grains, cracks and fissures (Gaidies et al., 2011). Scientists believe that garnet growth at the intersection of ternary grains much faster than the boundary of a dual grain (Spear and Daniel, 2001).

**2- Material and methods**

To study the garnet of Hall Hall Chaldoran amphibolites, dozens of random samples were taken from the area and among them, 20 thin sections were examined. The halves of samples are analyzed at the Tehran Zar-Azma Laboratory by XRD method. Three of them graphical results are brought at the paper. Also 16 samples are analyzed in XRF to earn the major oxide elements and ICP to get trace and rare earth elements of the rocks. The polished surface of the thin sections is put down image processing by Digimizer software and the results are corrected by CSD Correction (Higgins, 2006).

**3- Results and discussion**

The major phases existed in the rocks are almanden-manganian garnet and quartz. The minor phases are hornblende, albite, pumpleiite, muscovite, illite, chlorite and chalcopyrite. It should be noted that the samples are ortho-amphibolitic with tholeiitic basalt parent. The REE pattern of the rocks, normalized to chondrite, is concave with decrease in MREE special in Eu and rise again in HREE with final fall in Lu and Y. Such pattern seconder tholeiitic basalt prohtolite for these rocks (Storkey et al., 2005). The slope of the CSD curves that equivalent with  $-1/Gt$  is  $-3$  to  $-7$ . The linear CSD pattern means to uniform flow of energy into the system and constant degree of overstepping degree in the rocks during regional metamorphism. Intercept value of regression line of the illustrated CSD curve which is equivalent to  $J/G$  factor, is 4 to 7.

\* Corresponding author: m.modjarrad@urmia.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2021.37891.2237

Received 2021-07-05

Accepted 2021-08-28

#### 4- Conclusion

We illustrate the CSD pattern for garnet crystals of Hal Hal amphibolites and consideration and data analysis, these results was obtained: garnet crystals are assign the quarter to half of modal volume of the rocks which is explained suitable chemical composition of the rocks for crystal growth and appropriate of the other factors such as transportation mechanism, sufficient overstepping due to receiving heat flux and the small number of nuclei leading to significant mineral growth.

#### References

- Gaidies, F., Pattison, D.R.M., de Capitani, C., 2011. Toward a quantitative model of metamorphic nucleation and growth. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 162, 974–993.
- Higgins M.D., 2006. *Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology*. Cambridge University Press, 265p.
- Lanari, P., Engi, M., 2017. Local Bulk Composition Effects on Metamorphic Mineral Assemblages. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 83, 55-102.
- Manzotti, P., Ballèvre, M., 2013. Multistage garnet in high-pressure metasediments: Alpine overgrowths on Variscan detrital grains. *Geology* 4, 1151–1154.
- Spear, F.S., Daniel, C.G., 2001. Diffusion control of garnet growth, Harpswell Neck, Maine, USA. *Journal of Metamorphic Geology* 19, 179–195.
- Storkey, A.C., Hermann, J., Hand, M., Buick, I.S., 2005. Using in situ trace-element determinations to monitor partial-melting processes in metabasites. *Journal of Petrology* 46, 1286-1308.
- Waters, D.J., Lovegrove, D.P., 2002. Assessing the extent of disequilibrium and overstepping of prograde metamorphic reactions in metapelites from the Bushveld Complex aureole, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 135–149.

#### HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Modjarrad, M., Alipour, S., 2022. Crystal size distribution of garnet and geochemistry of Hal Hal Chaldoran garnet amphibolites-Northwest corner of Iran. *Adv. Appl. Geol.* 12(3), 537-556.

DOI: 10.22055/AAG.2021.37891.2237

url: [https://aag.scu.ac.ir/article\\_17053.html?lang=en](https://aag.scu.ac.ir/article_17053.html?lang=en)

©2022 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers.



## توزیع اندازه بلوری گارنت و زمین شیمی گارنت آمفیبولیت هال هال، شمال چالدران - گوشه شمالغربی ایران

منیر مجرد\*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

صمد علیپور

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

\*m.modjarrad@urmia.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۴ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۶/۰۶

## چکیده

گارنت آمفیبولیت‌های هال هال چالدران از اجزاء آمیزه رنگی مزوزوئیک، از نظر زمین‌شیمی و نیز توزیع ابعاد بلوری (CSD) بررسی شدند. این سنگها سرشار از گارنت (آهن و منگن‌دار) و آمفیبول سبز/آبی بوده و کمتر دارای پلاژیوکلاز، کلریت، اپیدوت و کانیهای تیره با بافت پورفیروبلاستی و سوگیرش ناشی از دگرگونی ناحیه‌ای می‌باشند. این سنگها از نوع ارتوآمفیبولیت با سنگ مادر بازالت تولییتی بوده که در یک محیط درون صفحه‌ای همراه با آغشتگی شدید با اجزاء پوسته‌ای تشکیل شده است. گارنت با فراوانی قابل توجه (ناشی از دسترسی به مواد مناسب)، الگوی CSD خطی با شیب ۳- برای نمونه‌های دانه درشت تر تا ۷- برای سنگهای دانه ریزتر دارد. نسبت نرخ هسته‌بندی به رشد برای این کانی ها ۴ تا ۷ برابر بوده است. هسته‌های متعدد در نتیجه درجه بالای خروج از حالت تعادل در سنگ تشکیل شده و ریخت‌شناسی منظم بلورها حاکی از تبلور تحت شرایط کنترل بین دانه ای (و نه انتشار سیال) است.

واژه‌های کلیدی: توزیع اندازه بلوری (CSD)، نرخ هسته‌بندی و رشد، گارنت، آمفیبولیت، هال هال چالدران

## مقدمه

دانه‌های موجود است. درشت کردن دانه‌های موجود برای سنگ ساده‌تر از تشکیل هسته جدید و نمو آن است. مثال بسیار مناسب گارنت است که ویژگی‌های فیزیکی شیمیایی انحصاری آن می‌تواند شواهدی از مسیر پیچیده‌ای که سنگ طی چرخه پتروژنتیک تجربه کرده را در خود ثبت کند (Spear, 1991; Vance and Mahar, 1998; Caddick and Kohn, 2013; Ague and Axler, 2016). گارنت تاب آوری کاملی در برابر هوازدگی داشته و رشد مجدد بر روی هسته گارنت‌های قبلی طی شرایط دگرگونی رایج است (Manzotti and Balleve, 2013). چهار فرایند اصلی درگیر هسته‌بندی و رشد پورفیروبلاست‌ها هستند: ۱- انحلال مواد منبع فراهم کننده مواد مغذی لازم ۲- تجمع مواد لازم در محل های مختلف و / یا از منابع متفاوت و انتقال از فضای بین دانه‌ای به محل های هسته‌بندی ۳- هسته‌بندی در مقیاس اتمی جایی که اجزاء شیمیایی ناشی از انتقال مواد و احتمالاً فازهای واکنشگر محلی تغییر آرایش یافته و تبدیل شده به تجمعی از فاز محصول در ابعاد کافی و مناسب و پایدار از نظر ترمودینامیکی. ۴- رسوب و ته‌نشینی بیشتر مواد بر روی سطوح موجود که نام آن رشد بلور است (Lanari and Engi, 2017).

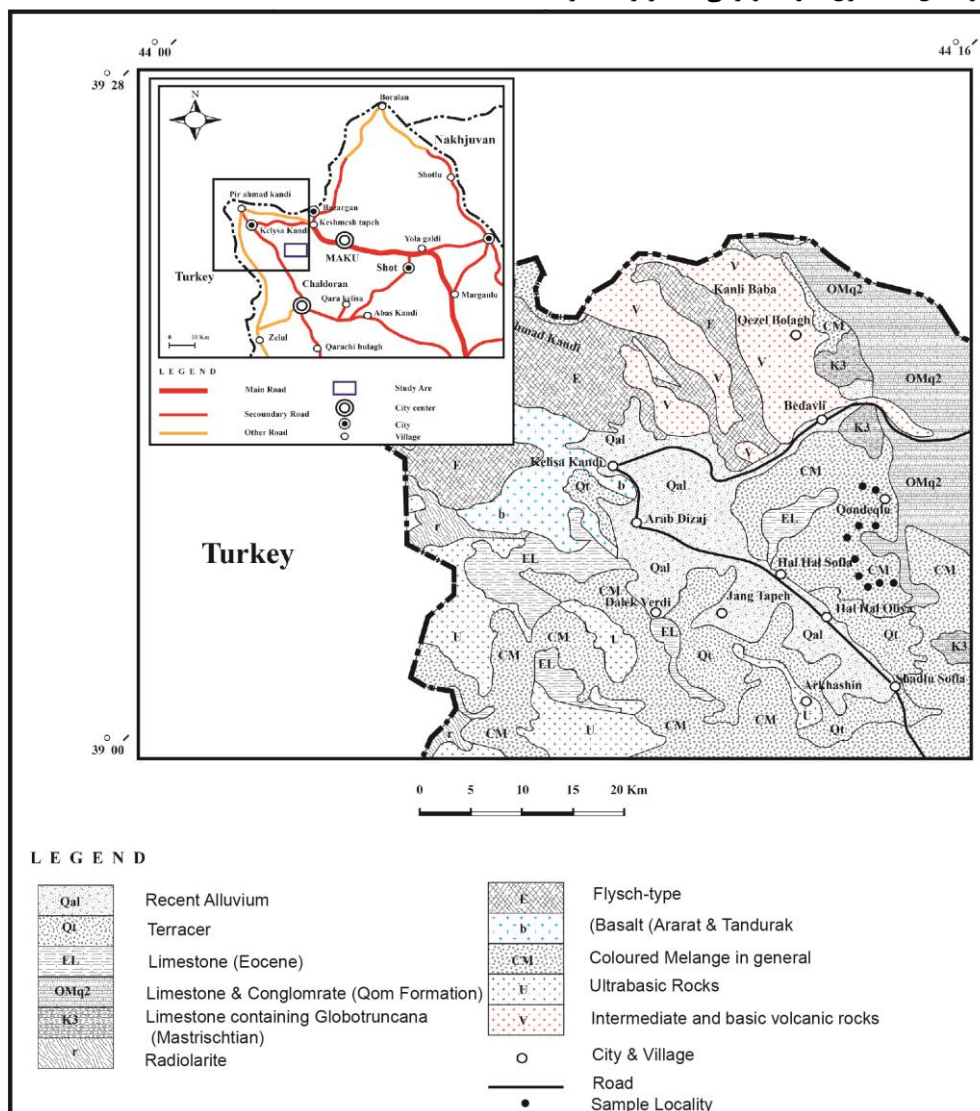
رخداد واکنش شامل مراحل جدایش / انحلال از محل واکنشگر و اتصال / ته‌نشست مواد مغذی در محل محصول است. در این مدل کینتیک می‌تواند بر روی واکنش های دگرگونی در طی هسته بندی،

تبلور دگرگونی یک مثال منحصر بفرد از تغییر و تبدیل غیر زیستی در طبیعت محسوب می‌شود (Kretz, 2006). نیروهای زمین‌ساختی باعث تغییراتی در شرایط فیزیکی لیتوسفر و از نظر دما و فشاری در سنگ‌ها می‌شوند. نتیجه این فرایندهای زمین‌ساختی بصورت واکنش-های حالت جامد در کانی‌ها خود را نشان می‌دهد که بیشتر آنها نشانه تلاش سیستم طبیعی در جهت کاهش سطح انرژی آزاد گیبس می‌باشد (Lanari and Engi, 2017). زمانیکه نرخ تبلور مجدد دگرگونی (شامل هسته بندی و رشد کانی) با دانش ما درباره گذشته دما - فشاری دگرگونی همراه شود، پتانسیل مناسبی جهت درک نرخ گرمایش پوسته-ای، بارگذاری، بالآمدگی و سرد شدن طی کوهزایی‌ها و در نتیجه نرخ فرایندهای تکنیکی فراهم می‌آورد (Spear and Daniel, 1998). مطالعه ریزساختاری سنگها، شامل شکل بلور، اندازه، جهت یافتگی ترجیحی و نیز توزیع فضایی بلورها، در طی ۳۰ سال اخیر بسیار گسترش یافته است (Kretz, 2006). علی‌رغم پیشرفت‌های خوب در زمینه نظری کینتیک واکنش، تخمین نرخ هسته‌بندی و رشد بلورها طی دگرگونی همچنان دشوار است (Kerrick et al., 1991; Joesten, 1991).

رشد پورفیروبلاست‌ها دلالت بر عرضه مداوم اجزاء کانی‌ها و نیز اعمال انرژی فعال کننده به نسبت زیاد برای هسته‌بندی و سپس رشد

ممکن است باعث تسریع هسته‌بندی از طریق افزایش انرژی آزاد بصورت موضعی شوند. بطور مثال در محل لولای ریزچین‌ها یا در مرز دانه‌ها، ترکها و شکاف‌ها (Gaidies et al., 2011). دانشمندان معتقدند رشد گارنت در محل تقاطع سه تایی دانه‌ها بسیار سریع‌تر از طول مرز دوتایی دانه هاست (Spear and Daniel, 2001).

مرحله انتقال بین دانه‌ای و در جریان اجرای واکنش تاثیر بگذارد. آهسته‌ترین مورد از بین این موارد، معمولا در سرعت کلی واکنش از همه تاثیر گذارتر است (Pattison et al., 2011). انفعال و اتصال ماده، فرایندهای سطحی هستند درحالیکه حمل و نقل یونها یک فرایند انتقالی است (Teng, 2013). هسته‌بندی و رشد می‌توانند بواسطه ریزساختارها (موقعیت مناسب ترجیحی) و نیز درجه خروج از حالت تعادل واکنش‌ها کنترل شوند. ویژگی‌های ریزساختاری



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی منطقه چالدران برگرفته از ورقه ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه چشمه (Alavi and Bolourchi, 1975). دایره های سیاه توزیع نمونه برداری را نشان می دهد.

Fig. 1. Geological map of Siah Cheshmeh 1:100000 sheet (Alavi and Bolourchi, 1975). The black circles show sample localities.

توزیع ناهمگن پورفایروبلست‌ها در یک سنگ ممکن است منعکس کننده ترکیب سنگ کل موضعی و / یا دگرشکلی محلی باشد. مثلا انحلال ممکن است در طول زونهای برشی و یا روی یالهای ریزچین‌ها رخ دهد درحالیکه هسته‌بندی در لولای چین‌ها (بدلیل دریافت کمترین تنش) اتفاق می‌افتد (Bell et al., 1986; Vernn, 1989; Williams, 1994). بنابراین فرایندهای محلی و موضعی متعددی ممکن است در انتقال کلی مواد لازم برای رشد دخیل باشند

(Carmichael, 1969). خروج از تعادل یک واکنش بسیار اهمیت دارد. حتی اگر یک فاز محصول از نظر ترمودینامیکی و نظری فاز پایداری باشد، ممکن است هسته‌بندی آن ناموفق باشد (Waters and Lovegrove, 2002). یک واکنش دگرگونی اگر و فقط زمانی که انرژی مکانیکی و شیمیایی بر موانع کینتیکی هسته‌بندی غلبه کند، اجرا می‌شود. این همان حالت عدم تعادل مورد نیاز برای هدایت مقدار انرژی کافی به مرز بین واکنشگرها/محصول جهت شروع واکنش است. این

آتشفشانی به سن سیلورین، گدازه‌های بازالتی طغیانی پلدشت تا ماکو (Bagherzadeh, 2017) در امتداد رود زنگمار که منشأ مشابه آراتر ترکیه را دارند، سازندهای باروت، لشگرک، لالون، کوارتزیت قاعده ساند میلا، دولومیت و سنگ آهک و شیل دونین و کربونifer (سازند مبارک)، واحد کریناته هم ارز سازند روته، آهکهای تریاس بالایی و کرتاسه پیشین، رسوبات ائوسن و الیگو - میوسن هم ارز سازند قم و رسوبات مخروطافکنه‌ای جوان به همراه تراورتن‌های کواترنری که به دنبال فعالیت‌های ولکانیک منطقه و وقوع پدیده‌های زمین گرمایی در منطقه برونزد دارند. این منطقه در متون زمین‌شناسی ایران جزو پوسته اقیانوسی نئوتتیس قلمداد شده (Aghanabati, 2004) و سن آمیزه رنگی کرتاسه در نظر گرفته شده است. افیولیت‌ها شباهت زیادی با افیولیت‌های درونی ایران مرکزی داشته و از غرب به افیولیت‌های آناتولی ترکیه می‌پیوندند.

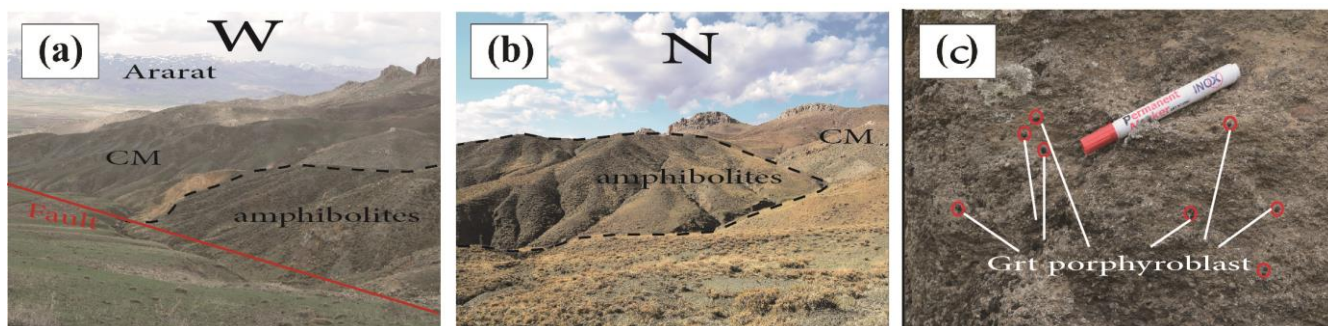
آمیزه افیولیتی مزوزوئیک شامل اولترابازیک‌های سرپانتینیتی، گدازه‌های بازیگ، گابرو، دیاباز، چرت‌های رایبولریت‌دار، شیل قرمز و سنگ آهک پلاژیک بصورت یک مجموعه درهم و تکتونیزه و مخلط با آهک‌های مارنی پالئوسن رخمون دارند (شکل ۱). واحد گارنت آمفیبولیتی مورد مطالعه از اجزاء همین مجموعه می‌باشد (شکل ۲). یکی از موارد مهم در زمین‌شناسی این ناحیه وجود گسل گیلانو - سیه چشمه - خوی با روند شمالغربی و فعالیت امتدادلغز راستگرد می‌باشد (Berberian, 1997). گسل شادلو (Roustaei et al., 2015) در منطقه که منطبق بر جاده کلیسا کندی است نیز شاخه‌ای از این سامانه گسلی است (شکل ۲). این سامانه از ۳ تا ۶ میلیون سال پیش تا کنون سالی ۲ تا ۴ میلیمتر لغزش داشته (Copoly and Jackson, 2006) و منجر به تشکیل حوضه کششی چالدران شده است. لرزه شدید ۴۵ سال پیش، در امتداد گسل چالدران - خوی بموازات گسل شادلو، باعث گسیختگی طولانی در آن شده است (Berberian and Yeats, 1999). آمیزه افیولیتی مد نظر در امتداد همین گسل‌ها در منطقه برونزد یافته است (شکل ۲).

انرژی بین سطحی (Gaidies et al., 2011) خروج از تعادل لازم قبل از هسته‌بندی یک فاز و نیز انرژی آزاد سیستم را برای رسیدن به پائین‌ترین سطح ممکن کنترل می‌کند. خروج از تعادل یک واکنش را می‌توان از تفاوت بین انرژی آزاد گیبس بین محصولات متبلور پایدار و واکنشگرهای نیمه پایدار تخمین زد. این کمیت تحت عنوان وابستگی واکنش (reaction affinity) شناخته می‌شود (Fisher and Lasaga, 1981; Lasaga, 1986; White, 2013). چنانچه خروج از تعادل بدلیل اعمال دما باشد ممکن است به نرخ گرمایش سنگ وابسته باشد (Gaidies et al., 2011; Pattison et al., 2011).

مطالعات الگوی CSD بیشتر بر سنگهای آذرین متمرکز بوده (Modjarrad, 2015; Modjarrad and Sheykhbaglou, 2016a; Modjarrad, 2019) که مشتمل بر نتایجی در ارتباط با مدت زمان اقامت ماگما در اتاقک ماگمایی و یا اختلاط دو ماگماست. استفاده از CSD در سنگ های دگرگونی در ایران کمتر رایج بوده (Moazzen and Modjarrad, 2005; Modjarrad and Sheykhbaglou, 2016b; Modjarrad, 2020). لذا اهمیت پرداختن به این مسئله جهت تعیین تاریخچه تبلور دگرگونی توسط سنگ شناسان بیشتر است. با عنایت به وجود پورفیروباست های گارنت در ابعاد گوناگون در آمفیبولیت های حال حال چالدران (که پتانسیل بسیار مناسبی برای پژوهش های CSD دارد) و نیز نو بودن بررسی ابعاد دانه ها در سنگهای آمفیبولیتی در ایران و ارتباط آن با فرایندهای حین دگرگونی، تصمیم بر آن شد که مطالعه حاضر صورت گیرد.

### زمین‌شناسی منطقه

محدوده‌ی مورد نظر با مختصات طول های جغرافیایی  $39^{\circ} 08'$  تا  $39^{\circ} 18'$  و عرض های جغرافیایی  $46^{\circ} 10'$  تا  $46^{\circ} 16'$  در ورقه زمین-شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سیه چشمه (نقشه‌ی ۱:۲۵۰۰۰۰ ماکو) در ۲۵ کیلومتری شمال غرب شهرستان ماکو و اطراف روستای حال حال واقع شده است. واحدهای سنگی موجود در منطقه به ترتیب سن عبارتند از (Alavi and Bolourchi, 1975): سنگهای آذرین خروجی شامل گدازه‌های حدواسط و آذرآواری مثل آندزیت، ریوداسیت، توف و برش



شکل ۲- تصاویر صحرایی از منطقه؛ (a) با دید به غرب که در آن آتشفشانی آراتر، آمیزه رنگی، گسل شادلو و آمفیبولیت های مورد مطالعه مشخص شده اند، (b) با دید به شمال و (c) دانه های درشت گارنت در آمفیبولیت های منطقه.

Fig. 2. Field photos from the area; (a) View to the West in which the Ararat volcano, Shadelou Fault and the area amphibolites are shown, (b) View to the North and (c) Garnet porphyroblasts in the amphibolites.

جدول ۱ - نتایج آنالیز XRF سنگ کل گارنت آمفیبولیت های حال حال (مقادیر بر اساس درصد وزنی هستند).

Table 1. Whole rock XRF analysis results of the Hal Hal garnet amphibolites (in wt%).

Sample	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08
SiO <sub>2</sub>	35.59	33.48	33.77	56.09	42.42	34.50	31.22	47.66
TiO <sub>2</sub>	1.61	1.49	1.26	0.97	1.22	1.29	1.18	1.46
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	19.89	19.18	21.97	14.37	17.04	19.93	22.68	17.02
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	27.89	30.68	24.01	19.78	29.73	32.26	26.72	19.24
MnO	0.91	1.63	0.46	0.94	1.56	1.51	0.32	0.52
MgO	2.89	3.06	2.48	2.60	2.84	2.71	7.35	2.96
CaO	5.21	5.70	8.92	4.22	5.23	6.15	2.53	3.89
K <sub>2</sub> O	1.07	0.23	1.41	0.76	0.43	0.74	3.13	2.37
Na <sub>2</sub> O	0.27	0.08	0.70	0.29	0.09	0.17	0.29	0.61
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	<0.05	<0.05	<0.05	0.29	0.35	0.41	0.17	0.56
LOI	0.08	<0.05	2.04	<0.05	<0.05	<0.05	4.23	2.31
Total	100.53	100.79	99.62	100.44	100.94	101.31	100.60	100.23
Sample	M-09	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
SiO <sub>2</sub>	51.49	51.71	35.93	52.49	57.69	40.59	54.21	34.21
TiO <sub>2</sub>	0.97	1.00	1.60	1.10	0.80	1.66	0.97	1.52
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.40	14.97	20.15	15.07	14.09	20.33	15.56	20.59
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.64	22.15	24.93	22.72	19.47	24.50	21.09	26.63
MnO	0.83	0.92	0.42	0.65	0.55	0.79	0.62	0.41
MgO	2.79	2.41	4.38	2.76	2.59	3.26	2.53	3.75
CaO	3.87	4.47	6.27	3.68	3.44	6.05	3.94	5.74
K <sub>2</sub> O	1.11	1.08	2.05	1.21	0.77	1.65	0.71	1.91
Na <sub>2</sub> O	0.21	0.24	0.84	0.15	0.15	0.37	0.23	0.75
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.33	0.33	0.42	0.35	0.12	<0.05	0.28	<0.05
LOI	0.17	0.10	2.66	<0.05	<0.05	0.49	<0.05	2.55
Total	100.23	100.22	101.05	100.37	99.84	100.61	100.24	100.30

جدول ۲- نتایج آنالیز ICP-MS عناصر جزئی گارنت آمفیبولیت های حال حال (نتایج بر حسب ppm هستند).

Table 2. The ICP-MS analysis results of the Hal Hal garnet amphibolites for trace elements (in ppm).

Sample	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08
Ag	2.3	1.1	4.7	0.4	0.7	2.2	0.1	1.9
Ba	221	46	256	163	83	163	494	412
Ni	5	5	6	6	4	5	44	5
Sc	33	36.2	19.8	20.1	30.1	27.5	34.3	21.4
Be	0.5	0.4	1	0.5	0.4	0.4	1	0.7
Bi	3.8	1	4.6	0.9	0.9	3.2	0.8	3.1
Cd	0.1	0.1	0.2	0.1	<0.1	0.2	<0.1	0.1
Cr	22	25	20	32	24	21	247	26
Co	32	28.8	64.2	28.4	29.4	43.6	123.7	40.8
Cs	1	0.8	0.9	0.9	0.8	0.9	2.3	1.1
Cu	14984	2113	28797	435	368	12111	1420	13104
Li	9	6	5	4	5	6	44	7
Mo	1.9	0.1	0.2	0.4	0.4	3	0.4	30.1
Nb	11.7	12.3	9.9	8.7	11.9	12.4	7.7	16.4
Pb	5	5	3	2	4	2	5	6

جدول ۲- ادامه.

Table 2. Continued.

Rb	29	8	29	15	11	15	87	46
S	14178	2881	3000	1411	460	14447	15458	17980
Sb	1.7	6.9	2.9	2.4	4.7	4.6	3.3	1.6
Se	7.55	3.33	13.17	4.42	1.51	8.09	3.82	10.93
Sn	1.4	0.9	1.6	1.3	1.1	1.3	2.4	1.2
Sr	108.2	40.2	248.4	68	54.6	93.5	57.8	71.9
Ta	1.03	1.04	0.74	0.6	0.9	0.99	0.7	1.17
Te	0.5	0.1	1.46	0.1	0.1	0.45	0.21	0.52
Th	6.46	4.52	4.42	3.34	5.21	5.26	3.25	5.34
Tl	0.24	0.1	0.41	0.12	0.1	0.2	0.62	0.31
U	2.4	1.3	2.7	1.2	1.5	2.18	1.4	2.3
V	63	47	68	46	46	63	166	77
Y	132	161	87	117	150	126	25	80
Zn	67	40	110	33	34	56	55	57
Zr	81	127	50	76	95	87	18	47

جدول ۲- ادامه.

Table 2. Continued.

Sample	M-09	M-10	M-11	M-12	M-13	M-14	M-15	M-16
Ag	0.4	1.1	0.4	0.4	0.3	0.7	0.4	2.7
Ba	243	187	302	217	149	190	167	305
Ni	6	5	6	5	4	6	4	6
Sc	24.3	20.2	21.4	25.4	18.9	27.8	22.4	18.7
Be	0.5	0.5	1.1	0.4	0.5	0.5	0.5	0.8
Bi	1.3	1.7	3.3	1.3	1.2	2.5	1.1	3.9
Cd	<0.1	0.2	<0.1	0.1	<0.1	<0.1	<0.1	0.1
Cr	19	15	18	19	19	25	27	41
Co	35.1	30.6	70.2	34.2	25.7	58.6	31.1	41.3
Cs	1	0.8	1.5	1.2	0.9	1.1	0.9	1.4
Cu	2076	6670	3044	936	1372	3214	636	20745
Li	6	5	20	8	4	10	5	12
Mo	0.5	0.4	0.1	0.5	0.6	1	0.9	0.5
Nb	8.7	9	16.5	10.7	8.1	17.6	10.1	18.8
Pb	2	5	3	4	7	4	5	3
Rb	26	21	51	37	18	35	16	50
S	4300	8784	14147	1884	2339	11337	901	29385
Sb	2.3	0.9	3.9	0.5	0.5	0.8	1.5	2.9
Se	7.59	7.21	5.66	2.48	3.22	2.14	3.23	14.39
Sn	1.4	0.9	2.2	1.2	0.9	1.5	1.1	1.8
Sr	101	74	166	128	91	93	95	167
Ta	0.68	0.75	1.04	0.91	0.76	1.29	0.81	1.45
Te	0.1	0.3	0.5	0.1	0.1	0.33	0.1	2.12
Th	4.22	4.14	7.68	5.72	4.31	7.25	4.92	6.79
Tl	0.18	0.17	0.33	0.22	0.14	0.28	0.12	0.82
U	1.6	1.8	3.5	2.1	1.41	2.8	1.85	3.3
V	54	48	102	61	40	64	45	74
Y	127	97	65	94	110	100	107	66
Zn	37	58	74	34	28	50	29	96
Zr	53	71	60	78	58	84	66	26

جدول ۳- نتایج آنالیز ICP-MS برای عناصر نادر خاکی گارنت آمفیبولیت های هال هال (نتایج بر حسب ppm هستند).

Table 3. The ICP-MS analysis results of the Hal Hal garnet amphibolites for rare earth elements (REEs) (in ppm).

sample	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08
La	22	20	35	17	17	19	10	29
Ce	51	49	76	40	42	44	15	64
Pr	7.14	5.57	9.79	4.78	6.01	6.28	2.74	8.04
Nd	26.8	20.3	37	17.7	22.1	23.4	10.2	29.5
Sm	7.18	4.7	10.08	4.22	5.43	5.85	2.12	7.61
Eu	1.39	0.91	2.06	1.48	1.18	0.89	1.11	1.34
Gd	10.92	7.74	12.93	6.74	9.39	8.77	2.83	10.27
Tb	2.98	2.52	2.69	2.03	3.07	2.51	0.66	2.37
Dy	21.59	20.54	14.17	15.42	24.3	18.92	3.65	13.22
Er	22.24	23.42	10.82	15.49	26.27	20.97	2.54	9.48
Tm	4.77	5.03	2.19	3.19	5.55	4.35	0.5	1.77
Yb	35.9	44	20.2	27.5	37.8	31.8	5.2	14.6
Lu	3.85	4.1	1.7	2.5	4.42	3.29	0.39	1.23
$\Sigma REE$	217.76	207.83	234.63	158.05	204.52	190.03	56.94	192.43
(Pr/Yb) <sub>cn</sub>	0.34	0.22	0.84	0.3	0.27	0.34	0.91	0.95
Ce/Ce*	0.9	1.1	0.9	1	1.1	0.9	0.7	0.9
Eu/Eu*	0.5	0.4	0.5	0.8	0.5	0.4	1.4	0.5
sample	M-01	M-02	M-03	M-04	M-05	M-06	M-07	M-08
La	19	21	31	20	16	24	16	24
Ce	43	45	66	45	35	54	37	52
Pr	5.81	5.98	9.86	6.97	5.52	8.72	5.79	9.35
Nd	21.6	21.9	36.2	25.7	20.3	32.3	21.6	34.8
Sm	5.19	5.28	9.42	6.67	5.01	8.46	5.37	9.27
Eu	1.72	1.07	1.66	1.29	1.08	1.51	1.52	1.41
Gd	8.04	7.41	12.24	10.65	8.11	11.9	8.68	11.88
Tb	2.43	1.91	2.6	2.97	2.57	3.04	2.75	2.72
Dy	17.94	13.11	13.3	18.64	18.55	18.7	19.24	14.31
Er	18.63	14.44	9.83	16.16	19.2	19.47	18.75	12.02
Tm	3.8	3.01	1.89	3.17	3.91	4.08	3.74	2.37
Yb	28.7	24	13.2	20.3	24.4	25.8	23.2	15.1
Lu	2.87	2.39	1.33	2.36	3	3.27	2.83	1.8
$\Sigma REE$	178.73	166.5	208.53	179.88	162.65	215.25	166.47	191.03
(Pr/Yb) <sub>cn</sub>	0.35	0.43	1.3	0.59	0.4	0.6	0.43	1.07
Ce/Ce*	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.8
Eu/Eu*	0.8	0.5	0.5	0.5	0.51	0.4	0.7	0.4

### روش مطالعه

قرار گرفته و از این طریق طول و عرض بلورها، مساحت تحت پوشش هر بلور و نیز میزان گردشگی بلورهای گارنت حاصل شد. نتایج در نرم افزار CSD Corrections (Higgins, 2006) مورد تصحیح بلوری قرار گرفت. گرچه بلور گارنت بواسطه رده تبلور مکعبی و نسبت ابعاد ۱:۱:۱ آن، کمترین خطای ناشی از تبدیل محاسبات دویبعدی به سه بعدی را داراست (جدول ۴). ترسیم الگوی CSD برای گارنت های هر سنگ و معادله خط وایزشی عبوری از بین داده ها، سایر اطلاعات از قبیل نرخ هسته بندی به رشد و نیز نسبت معکوس سرعت رشد در زمان را بدست داده است (جدول ۵).

برای مطالعه گارنت آمفیبولیت های هال هال چالدران دهها نمونه تصادفی از منطقه اخذ و از میان آنها ۲۰ مقطع نازک مورد بررسی قرار گرفت. نیمی از نمونه ها در آزمایشگاه زرازمای تهران مورد تجزیه پراش اشعه ایکس (XRD) قرار گرفته و نتایج گرافیکی سه نمونه بصورت معرف در مقاله گنجانیده شد. همچنین تعداد ۱۶ نمونه برای بدست آوردن اکسید عناصر اصلی (جدول ۱) و عناصر جزئی و نادر خاکی (جدول ۲ و ۳) به ترتیب با روش های فلوتورسانس اشعه ایکس (XRF) و طیف سنجی جرمی پلاسمای جفتیده القائی (ICP-MS) مورد تجزیه قرار گرفتند. جهت انجام مطالعات اندازه بلوری گارنت، سطوح صیقلی مقاطع، مورد پردازش تصویری توسط نرم افزار Digimizer

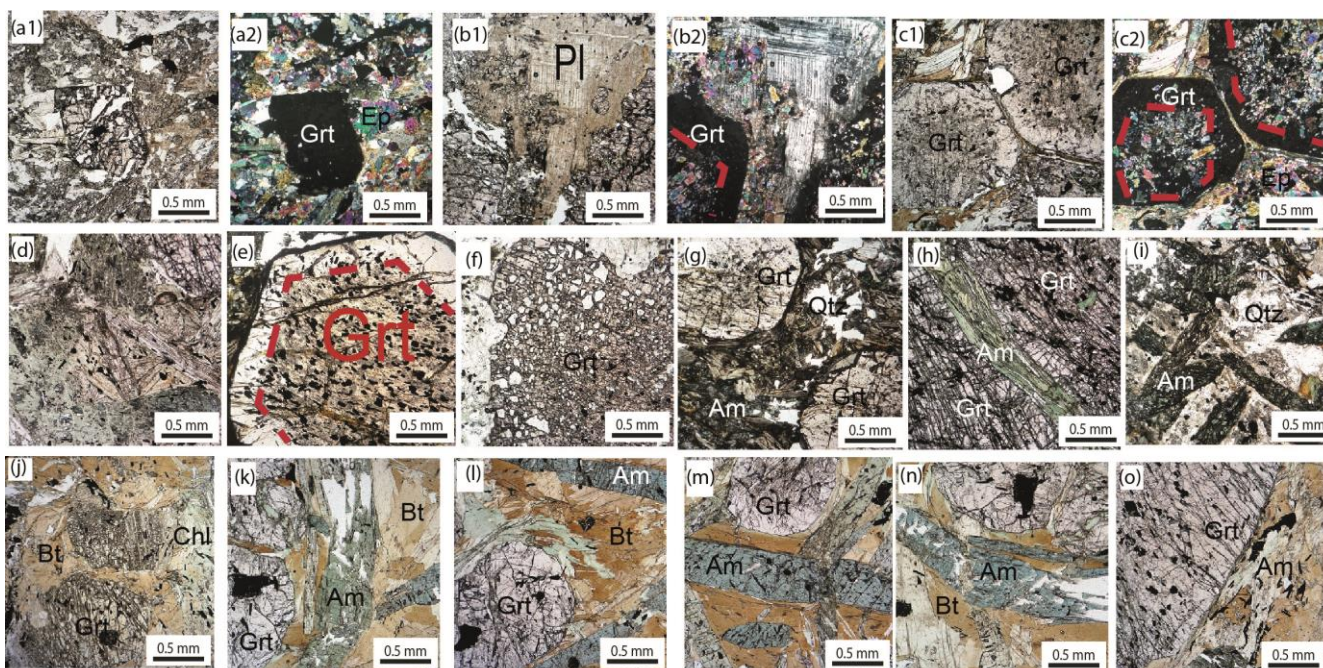


## نتایج

## سنگ‌نگاری

گارنت آمفیبولیت‌های هال چالدران واجد پورفایروبلاست‌های قهوه‌ای گارنت (تا ۱ سانتیمتر) در یک متن سبز تیره با لکه‌های سفید بوده و در آن آمفیبول‌ها و پلاژیوکلازها در نمونه مزوسکوپی قابل رؤیت هستند. در مقاطع میکروسکوپی علاوه بر گارنت، آمفیبول و پلاژیوکلاز، می‌توان کانی‌های کلریت، بیوتیت و کانی‌های تیره را به همراه مقدار اندکی از اپیدوت‌های ریز، کلسیت و میکای سفید دید (شکل ۳).

شاید بتوان از نظر شکل ظاهری گارنت‌های موجود، سنگهای مورد نظر را به دو دسته تقسیم نمود که در یکی گارنت دارای منطقه‌بندی و ترکیبی بوده و دارای هسته صورتی (احتمالاً مملو از منگنز) و پر از میانبراه‌های کوارتز، کانی اپیک، اپیدوت و ... بوده و حاشیه فاقد میانبار و روشن تر است (شکل e۳) و در دسته دوم



شکل ۳- تصاویر میکروسکوپی گارنت آمفیبولیت‌های هال چالدران. تصاویر (a-c) در کنار تصویر PPL تصویر XPL هم آورده شده است. بقیه عکس‌ها در حالت PPL تهیه شده است. تصاویر (b-c) و (e) گارنت‌های دارای منطقه‌بندی گرفته شده است. در عکس‌های (h) و (i) آمفیبول‌های سبز کلسیک و در تصاویر (k-n) آلکالی آمفیبول‌های آبی سدیک دیده می‌شوند. اسامی مخفف کانی‌ها از (Kretz, 1983) گرفته شده است.

Fig. 3. Microscope photographs of the Chaldoran Hal Hal garnet amphibolites. For (a-c) the XPL photo are beside the PPL. The others are taken in plain light, (b-c) and (e) are show zoned garnets, (h) and (i) are microphotographs of green hornblende but (k-n) are taken from sodic blue-green alkali amphiboles. The abbreviations are after Kretz, (1983).

فازهای اصلی شامل گارنت از نوع آلماندن - اسپسارتن و کوارتز. فازهای فرعی شامل هورنبلند، آلبیت، پومپلینیت، موسکویت، ایلیت، کلریت و کالکوپریت. فازهای جزئی شامل اپیدوت، آنورتیت، کلسیت و پیریت. مطالعات قبلی در منطقه ترکیب اعضاء نهایی گارنت را بر روش XRF بصورت 5 Spss 15 Pyp 20 Grs 60 Alm تعیین کرده است (Molaiy Gaznagh, 2018).

## زمین شیمی

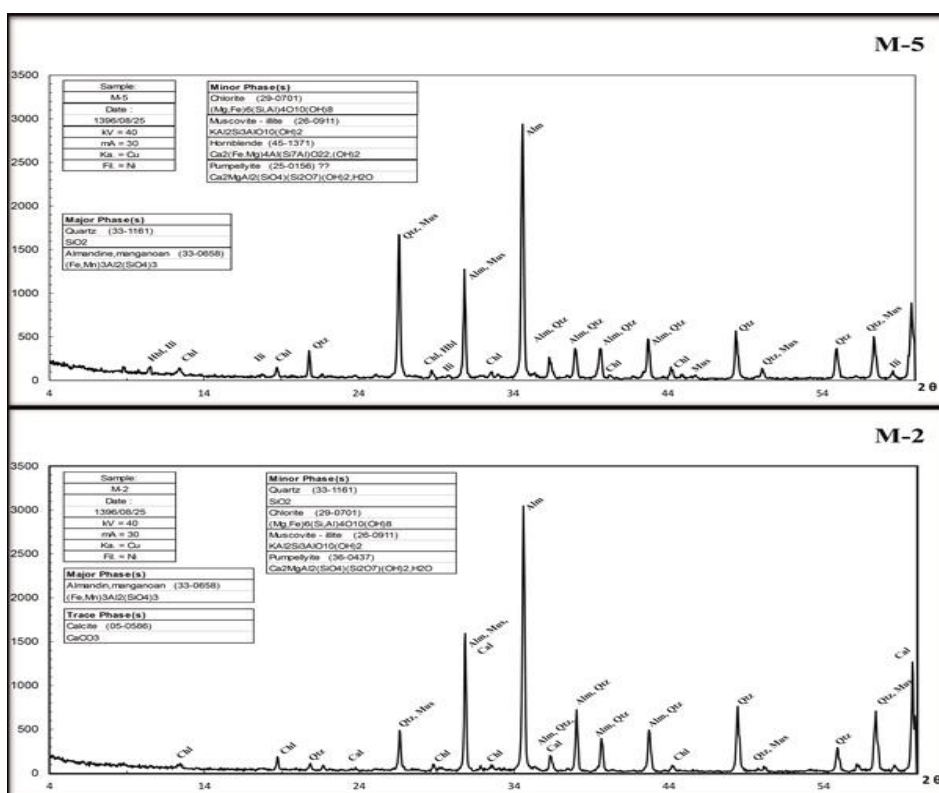
## نتایج XRD

به منظور مطالعه نمونه‌های گارنت آمفیبولیتی هال چالدران به روش پراش پرتوی ایکس، چندین نمونه تجزیه شده و فقط دو نمونه معرف در متن گنجانده شده (شکل ۴) که نتایج حاصل عبارتند از:

## زمین شیمی سنگ کل (تعیین خاستگاه)

آمفیبولیت‌ها برای شناسایی تاریخچه تکامل پوسته‌ای سرزمین-های قدیمی کاربرد زیادی دارند (Graham, 1976; Elueze, 1985; 1987). وجوه تمایز زمین‌شیمیایی و صحرایی ارتو - و پارا-آمفیبولیت‌ها شناخته شده است (Leake and Singh, 1986). تعداد ۱۶ نمونه از سنگ‌های آمفیبولیتی حال حال مورد تجزیه شیمیایی قرار گرفته و نتایج در جداول ۱ و ۲ نوشته شده است. میزان سیلیس در این سنگها بین ۳۱ تا ۵۱ درصد وزنی بوده و فقط در چند نمونه به ۵۷ درصد وزنی می‌رسد. تیتان از ۱ تا ۱/۵ درصد

وزنی، اکسید آهن بین ۱۹ تا ۳۲ درصد وزنی بوده و اکسید یتاسیم آنها بیشتر از اکسید سدیم بوده و در برخی نمونه ها به ۲ تا ۳ درصد وزنی می‌رسد. اکسید کلسیم اغلب حدود ۶ درصد وزنی بوده و تا ۸ درصد وزنی نیز بالا رفته است. قبل از هر چیز باید به این نکته توجه کرد که نمونه‌ها از نوع ارتوآمفیبولیتی بوده اند (Misra, 1971; Walker et al., 1960) و لذا می‌توان از نمودارهای متعلق به سنگهای آذرین جهت بررسی زمین شیمیایی آنها بهره برد (شکل ۵). با عنایت به اینکه سنگها دگرگونی هستند، سعی شده تا از نمودارهای واجد عناصر غیر متحرک برای این امر استفاده شود.

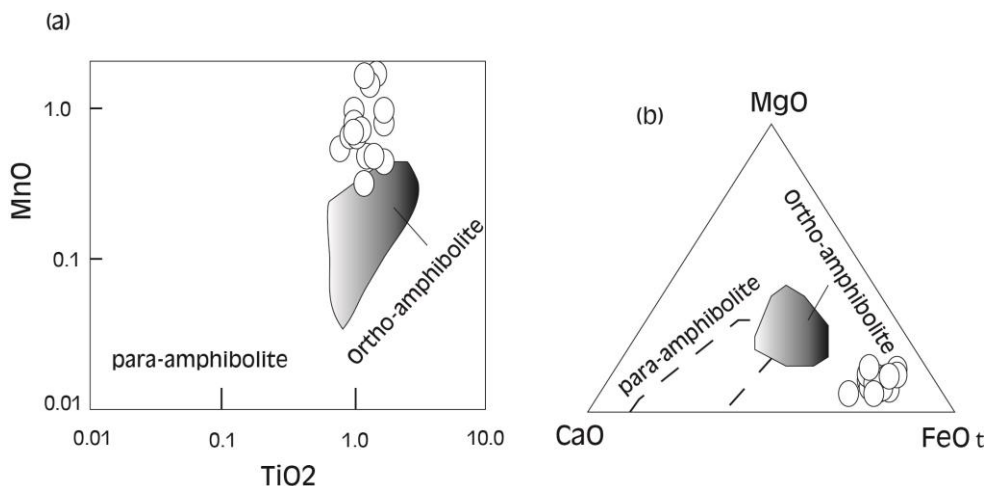


شکل ۴- نتایج معرف حاصل از آنالیز XRD سنگ های مورد بحث. کانی های موجود شامل گارنت آلماندینی و اسپسارتنی، کوارتز، آمفیبول، پلاژیوکلاز، میکای سفید، کلریت، اپیدوت و سولفید فلزات بوده است.

Fig. 4. The representative XRD analysis results from the studied rocks. The consisted minerals are almandine and spessartine, quartz, amphibole, plagioclase, white mica, chlorite, epidote, and metal sulfides.

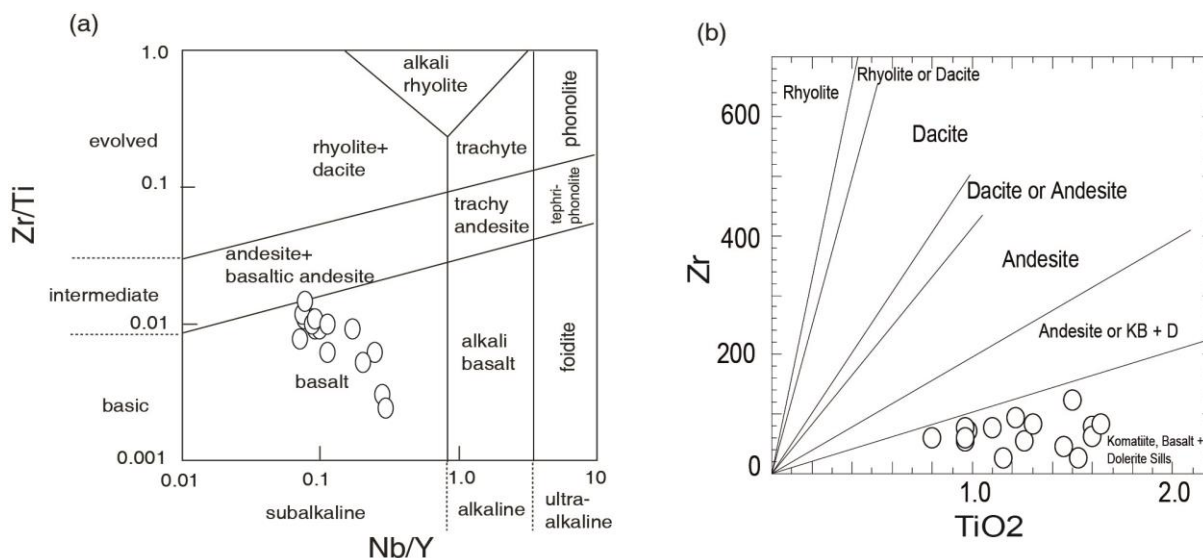
روبروست. خیز مجدد در HREE و افت در انتهای الگو (Lu, Y) در الگو مشهود است (شکل ۸). چنین الگویی تایید کننده سنگ مادر بازالت تولییتی برای این سنگهاست (Storkey et al., 2005).

سنگ مادر آمفیبولیت‌های حال حال از نوع بازالتی (شکل ۶) و تولییتی (شکل ۷) بوده است. الگوی عناصر نادر خاکی (بهنجار شده نسبت به کندریت) این سنگها (شکل ۸)، یک الگوی دارای تقعر بوده بطوریکه از LREE غنی، با افت در MREE بویژه ناهنجاری منفی در Eu



شکل ۵- نمودارهای متمایز کننده ارتو - و پارا - آمفیبولیتها (a) و (b) (Walker et al., 1960) و (b). در هر دو مورد گارنت آمفیبولیت‌های منطقه نزدیک به نوع ارتو - آمفیبولیتی ارزیابی می‌شود.

Fig. 5. The ortho- and para-amphibolite discrimination diagrams, (a) from Misra (1971) and (b) from Walker et al. (1960). From both the graphs, the studied amphibolites are considered as ortho-amphibolitic.



شکل ۶- طبقه بندی پروتولیت سنگهای مورد مطالعه بر اساس عناصر جزئی (a) (Winchester and Floyd, 1977) و (b) (Hayashi et al., 1997).

Fig. 6. The protholith classification of the area rocks on the basis of trace elements. (a) From Winchester and Floyd (1977) and (b) after Hayashi et al. (1997).

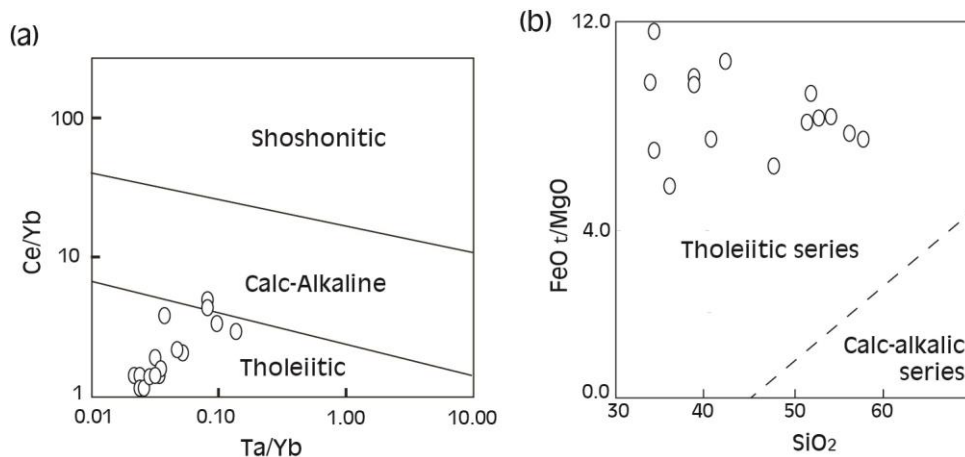
است تغییرات ثانوی در ترکیب بازالت‌ها رخ داده باشد که ناشی از آرایش گسترده ماگمای بازالتی حین صعود و یا مربوط به اثر پذیری آمفیبولیت‌ها در مسیر دگرگونی (مثلا کانال فرورانش) با مواد پوسته‌ای باشد (Bruand et al., 2011). برای پاسخ دقیق نیاز به مطالعات ایزوتوپی است که برای نگارنده میسر نبود.

#### نتایج مطالعه توزیع اندازه بلور (CSD) گارنت

تحلیل منحنی CSD اولین بار توسط Marsh (۱۹۸۸) به زمین شناسی راه یافت. داده‌های ابعاد بلور ابتدا در یک هیستوگرام پیاده شده و منحنی‌های تجمعی آن ترسیم می‌شود. سپس شیب منحنی تجمعی (تراکم جمعیتی) در برابر ابعاد بلور رسم می‌شود.

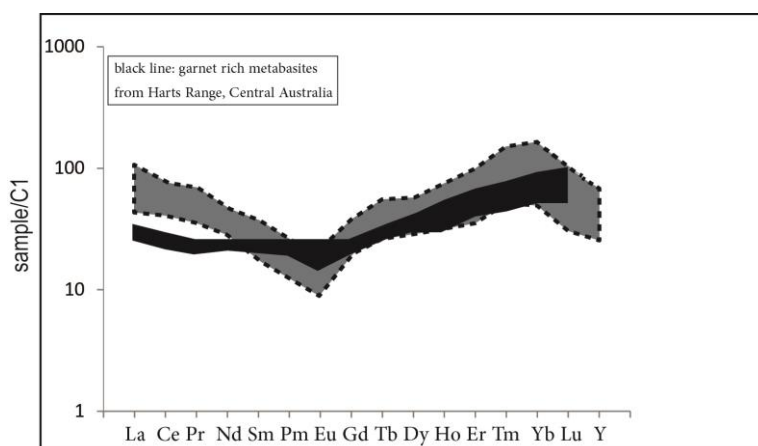
بالا بودن فراوانی LREE وابسته به مشخصات منبع و نیز نشانه عمق زیاد تشکیل ماگمای اولیه بازالتی است. کمبود پلاژیوکلاز دلیل مقدار پائین Eu بوده و غنی شدگی HREE را می‌توان به حضور فراوان گارنت نسبت داد. کاهش مجدد در Lu و Y را باید در فقدان فازهای فسفات‌ها نظیر زنونیم در این سنگها جست. این الگو قابل قیاس با الگوی متنازیت های غنی از گارنت رشته کوه هارتز در استرالیای مرکزی (Storkey et al., 2005) می باشد (شکل ۸).

با هدف تعیین محیط تکتونیکی پروتولیت آمفیبولیت‌ها، از نمودارهای متعددی حاوی عناصر جزئی و نادرخاکي بهره گرفته شد (شکل‌های ۹ و ۱۰). در بیشتر موارد یک محیط درون صفحه ای (و نه قوسی و پشته اقیانوسی) را می‌توان برای این بازالت‌ها در نظر گرفت. همچنین ممکن



شکل ۷- تعیین سری ماگمایی سنگ مادر بازالتی مولد گارنت آمفیبولیت های حال حال چالدران (a) بر پایه نسبت  $Ce/Yb$  در برابر  $Ta/Yb$  (Pearce, 1982) و (b) بر اساس نسبت  $FeO t/MgO$  در مقابل سیلیس (Miyashiro, 1974) که هر دو مورد تولییتی بودن بازالت ها را نشان می دهد.

Fig. 7. Determination of magmatic series for the basaltic protolith of the Chadoran Hal Hal amphibolites using trace element contents (a) after Pearce (1982) and (b) from (Miyashiro, 1974). Both the diagrams show the tholeiitic affinity for the basalts.



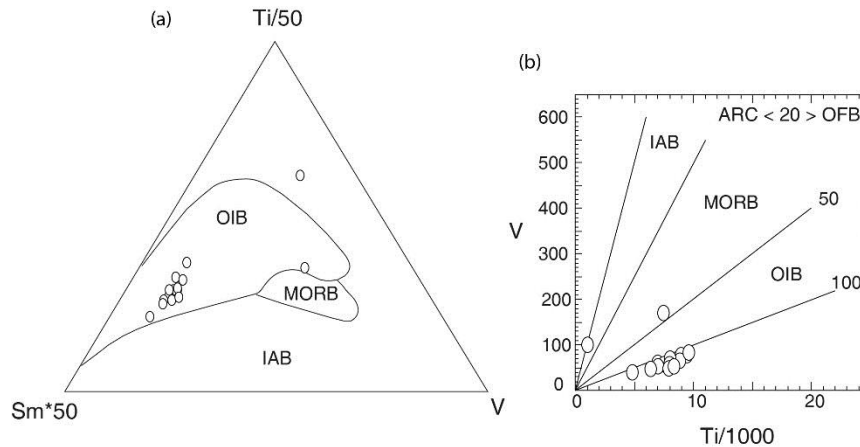
شکل ۸- الگوی عناصر نادر خاکی بهنجار شده نسبت به کندریت (McDonough et al., 1992) سنگ مادر گارنت آمفیبولیت های حال حال. الگوی بدست آمده دارای تقعر با غنی شدگی در LREE و HREE و ناهنجاری منفی از یوروپیم می باشد. الگوی مشکی مربوط به متابازیت های غنی از گارنت رشته کوه هارتز در استرالیای مرکزی است (Storkey et al., 2005) که از یک سنگ مادر بازالت تولییتی درون صفحه ای حاصل شده است. مقایسه این گروه با سنگ های مورد نظر شباهت قابل قبولی را با آن نشان می دهد.

Fig. 8. The chondrit normalized REE pattern (McDonough et al., 1992) of the Hal Hal amphibolites. The normalization values are after McDonough et al. (1992). The patterns are concave with enrichments in HREE and LREE and negative Eu anomalies. The black pattern is related to garnet rich metabasites from Hartz Mountain at the Central Australia (Storkey et al., 2005) formed from a tholeiitic basaltic protolith. We use it for comparison with our rocks, which show considerable similarities.

کند. بسیاری از تکنیک های مورد استفاده در پترولوژی دگرگونی بر پایه کاربرد ترمودینامیک تعادلی برای توضیح تاریخچه پیچیده تبلور دگرگونی بنا شده است (Dragovic et al., 2012). در حالیکه ما به خوبی می دانیم برخی فرایندهای اساسی از قبیل هسته بندی، رشد و انتشار مواد فقط با برداشته شدن شرایط تعادلی میسر می شود (George and Gaidies, 2017). بلورهای درشت تر گارنت ممکن است زودتر تبلور یافته باشند و یا بعدها توسط بازپخت (ripening) دچار درشت شدگی شده باشند و زمانیکه هسته اولیه آنها تبلور یافته سنگ بدون گارنت بوده است. رشد گارنت باعث تغییرات تدریجی تصاعدی در شیمی سنگ کل در نتیجه تبلور تفریقی گارنت می شود

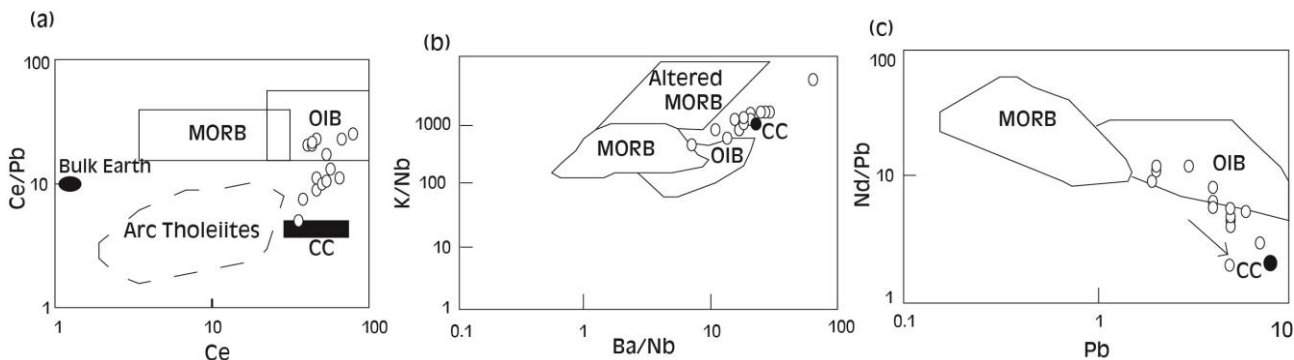
بطور کلی این مطلب مورد قبول اکثر سنگ شناسان است که شرایط دمایی دگرگونی وابسته به فاصله از منبع گرما و قدرت و شدت منبع گرما بوده و می تواند بخصوص در پوسته بسیار اثرگذارتر از فشار باشد (England and Thompson, 1984). از طرفی اثر فرایندهای ناشی از دگرگونی پسروده می تواند بطور کامل مجموعه کانیاپی سنگ را عوض کرده و تشخیص شرایط دگرگونی اولیه را بسیار دشوار کند یا حتی همه اطلاعات مربوط به اوج دگرگونی را نابود کند (Komzolkin et al., 2019). پس مطالعات بافتی روی سنگ های دگرگونی می تواند داده های خوبی از شرایط دگرگونی را نسبت به مطالعاتی که صرفاً مبتنی بر شیمی کانی هستند (مانند آنالیز نقطه ای) برای سنگ شناسان ارائه

رشد بالا باشد مقدار رشد، پائین و بلورها ریز دانه خواهند بود. چنانچه تعداد اولیه هسته‌ها زیاد باشد رشد اندکی را شاهد خواهیم بود زیرا ماده موجود بین تمامی هسته‌ها توزیع خواهد شد.



شکل ۹- نمودارهای تمایز محیط تکتونیکی؛ (a) در  $V$  برابر  $Ti/1000$  (Vermeesch, 2006) و (b) نمودار سه تایی  $Ti/50$ ،  $Sm*50$  و  $V$  (Shervais, 1982) که هر دو مورد محیط درون صفحه‌ای را برای سنگ مادر بازالتی گارنت آمفیبولیت‌ها نشان می‌دهد.

Fig. 9. The tectonic setting discrimination diagrams (a) after Vermeesch (2006) and (b) Shervais (1982). In both graphs within plate setting for protholite basalts, are estimated.



شکل ۱۰- نمودارهای تمایز محیط تکتونیکی انواع بازالتی ها (Bruand et al., 2011) که بیانگر محیط درون صفحه ای و حجم بالای آلیش با مواد پوسته ای می باشد. MORB=middle oceanic ridge basalt, OIB=oceanic island basalt, CC=continental crust.

Fig. 10. Some other tectonic environment perception graphs from Bruand et al. (2011) which are displayed OIB setting with crustal contamination. MORB=middle oceanic ridge basalt, OIB=oceanic island basalt, CC=continental crust.

۲- شیب الگوی CSD ترسیمی که با فاکتور  $1/Gt$  معادل است بین ۳- تا ۷- می‌باشد. این الگو خطی بوده و تنها در دو نمونه حالت زنگوله‌ای دارد که بیانگر وقوع بازپخت استوالد و پیوستگی بلورهای ریز به هم و ایجاد درشت بلورها می‌باشد. خطی بودن این الگو به معنای شارش یکنواخت انرژی به سیستم و درجه ثابت خروج از حالت تعادل در این سنگها طی دگرگونی ناحیه‌ای می‌باشد.

۳- عرض از مبدا خط وایازشی الگوی CSD ترسیمی برای گارنت-های هال هال که با فاکتور  $J/G$  معادل است، ۴ تا ۷ می باشد. با اندکی دقت معلوم می‌شود عرض از مبدا ۴ متعلق به نمونه‌ها شماره M-09 و M-15 می‌باشد که متوسط مساحت هر بلور در آنها بیشترین مقدار را دارد. یعنی بلورها بسیار درشت بوده و در مقابل شیب خط وایازشی آنها از همه کمتر بوده است، به معنای تعداد کمتر هسته در کنار بیشینه رشد ممکن (جدول ۵). در مقابل بیشترین عرض از مبدا متعلق به

## بحث

درشت بلور بودن گارنت‌ها در سنگ‌های دگرگونی متابازیتی هال چالدران به ما این امکان را داده است تا بتوانیم توزیع اندازه بلوری در این سنگ‌ها را مطالعه (جدول ۴) و تاریخچه تبلور را بررسی کنیم (شکل ۱۱). پس از پردازش تصویر حاصل از پراکنش بلورهای گارنت و تحلیل داده های مستخرج از برنامه Digimizer اطلاعات زیر حاصل شد:

۱- مساحت قابل توجهی از سطح مقاطع مورد مطالعه توسط گارنت پوشانده شده بطوریکه حدود ربع تا نیمی از سطح مشاهده شده را اشغال کرده است (جدول ۵). بلور مکعبی گارنت، مطابق انتظار گردشگری مناسبی داشته (بالای ۷۰٪) و متوسط طول و عرض هر بلور حدود ۳۰ تا ۶۰ میلی‌متر بوده است (جدول ۵).

به درجه بالای خروج از حالت تعادل و امکان تشکیل هسته‌های متعدد در کنار مقدار اندک ماده مناسب برای رشد گارنت بوده باشد (جدول ۵).

نمونه M-05 است که کمینه مساحت هر بلور مربوط به آن نمونه می‌باشد. پس نرخ J/G در آن بالاترین مقدار بوده و تعداد هسته‌های بیشتر اما رشد کمتر را به خود اختصاص داده است. علت این امر شاید مربوط

جدول ۴- نتایج توزیع تعداد بلورهای گارنت در بازه های تعریف شده ابعاد طولی در گارنت آمفیبولیت های حال حال چالدران که اساس ترسیم الگوی CSD بوده اند.

Table 4. The results of garnet crystals distribution at the determined size intervals for the Hal Hal amphibolites which are the basis of the CSD curves illustration.

Sample	Size interval (cm)						
	0.100	0.158	0.251	0.398	0.631	1.000	1.58
M-02	0	2	4	13	8	1	
M-03	0	1	4	3	3	1	
M-05	0	2	0	7	2		
M-07		0	1	4	3	1	1
M-09		0	3	7	7	3	3
M-10			0	5	7	2	
M-14	0	1	2	2	12	4	
M-15			0	2	6	5	1

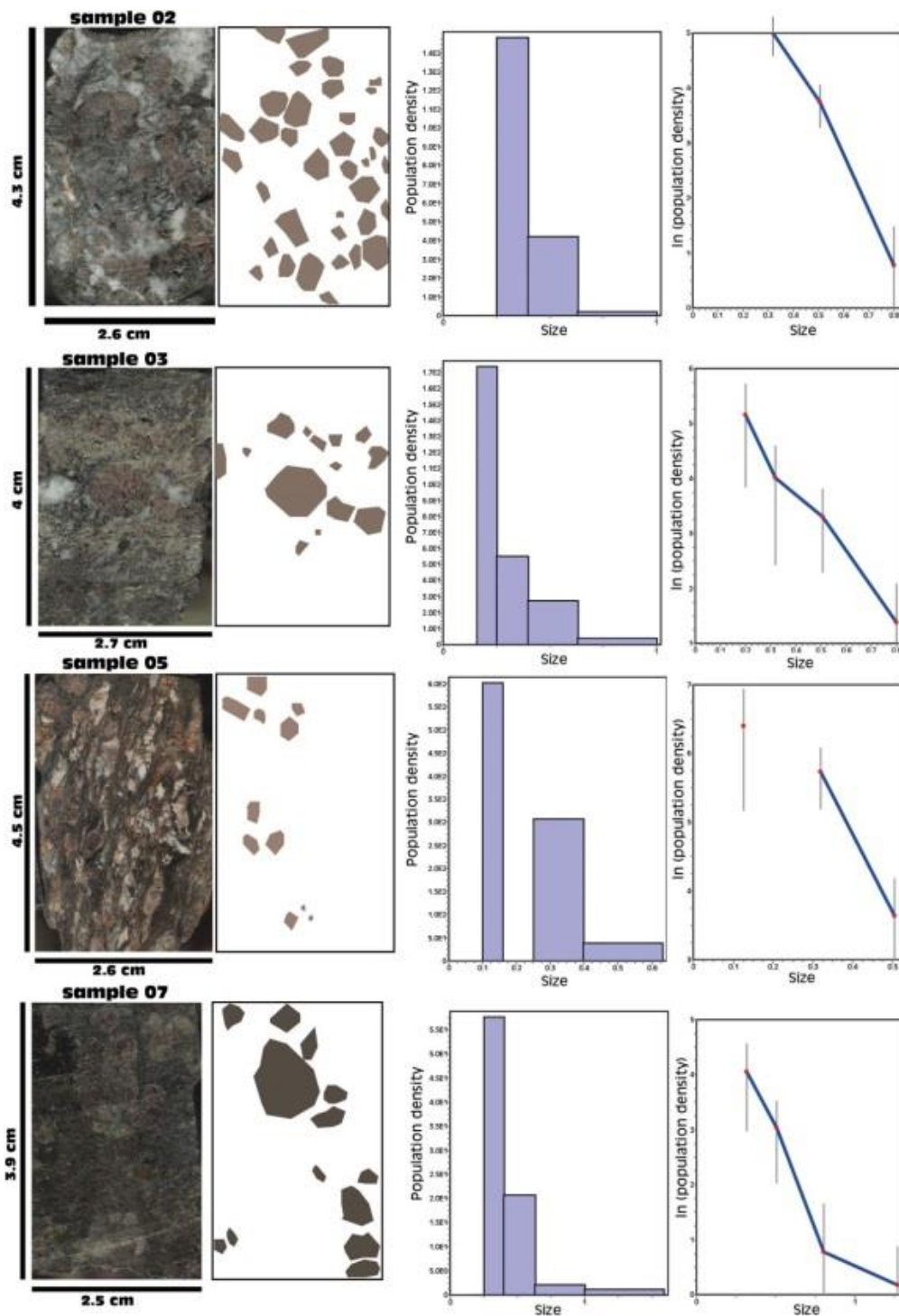
جدول ۵- نتایج حاصل از پردازش تصویر شامل گردشگی، مساحت و طول و عرض بلور گارنت و اطلاعات شیب و عرض از مبدا مربوط به خط وایازشی CSD به همراه محاسبه طول زمان تقریبی رشد بلور.

Table 5. The results of image processing including roundness, area, length and width of garnet crystals are presented. Some other data about the slope and intercept of the regression best fit line of CSD curve are added. The important calculated time length of crystals growth, are at the last column.

Sample	Total area of crystal (cm <sup>2</sup> ) on the thin section with 8 cm <sup>2</sup> area	Average roundness of crystal	Average length of crystal (cm)	Average width of crystal (cm)	Average area which crystal covered (cm <sup>2</sup> )	Slope of regression (-1/Gt) of CSD curve	Intercept of regression (cm <sup>-4</sup> )	Average crystal growth time on the basis of estimated growth rate 10 <sup>-10</sup> (cm/s)
M-02	2.05	0.74	0.34	0.27	0.07	-6.74	7.15	47
M-03	1.12	0.75	0.35	0.29	0.09	-5.75	6.16	55
M-05	0.59	0.75	0.32	0.24	0.05	-7.25	7.79	44
M-07	1.51	0.70	0.50	0.34	0.15	-5.50	5.81	58
M-09	3.62	0.71	0.51	0.37	0.16	-3.48	4.66	91
M-10	1.80	0.76	0.49	0.37	0.13	-7.08	7.27	45
M-14	2.86	0.74	0.50	0.37	0.14	----	----	----
M-15	2.69	0.72	0.63	0.44	0.19	-2.95	4.41	107

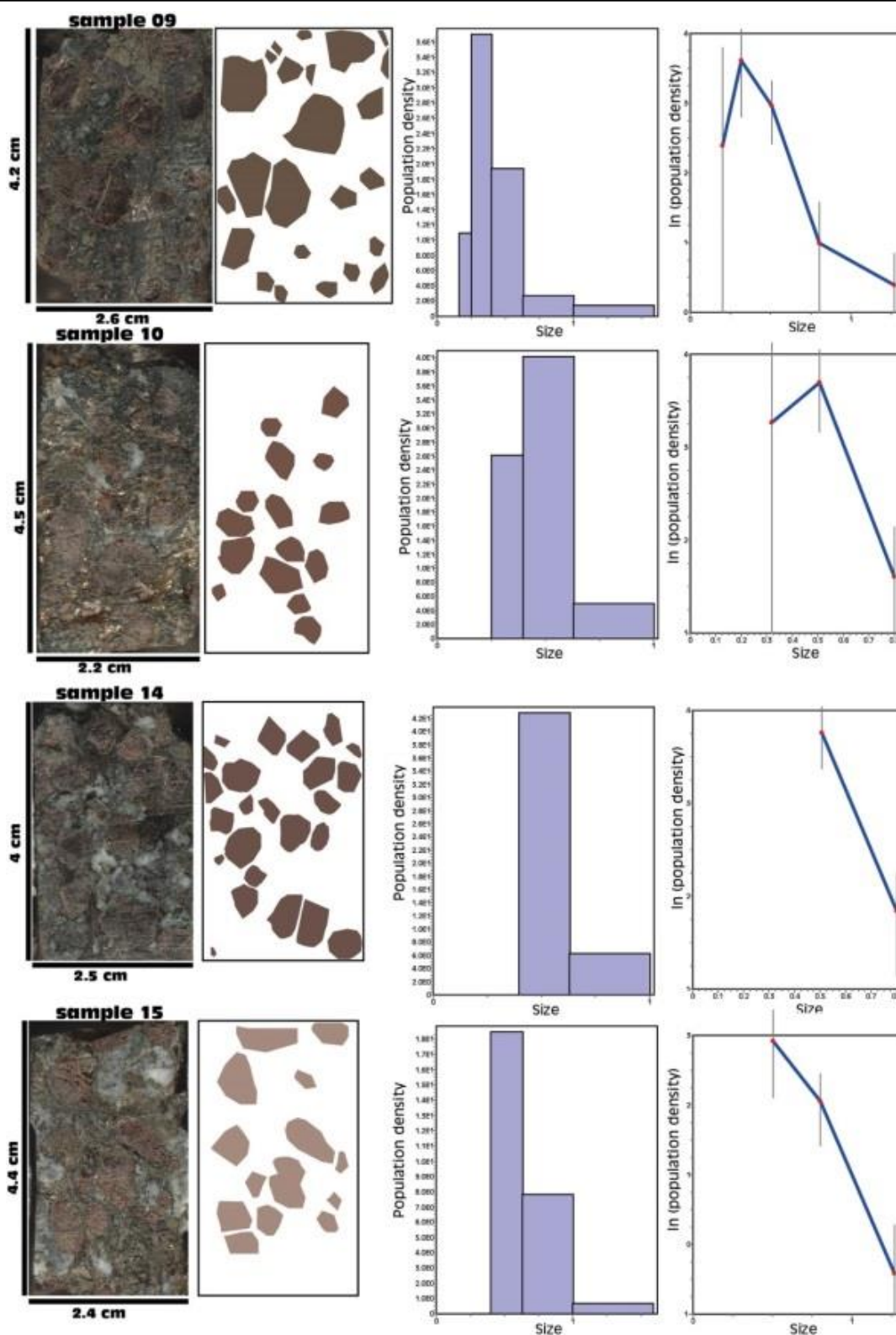
۵- بررسی‌ها نشان می‌دهد چنانچه ریخت درشت بلورهای گارنت بی‌نظم باشد نشانه رشد آنها در رژیم‌های تحت کنترل انتشار سیال است (مانند Tajbakhsh and Moosavizadeh, 2020). رشد گارنت-های با شکل هندسی منظم مانند آنچه درباره سنگ‌های حاضر رخ داده، در درجه بالایی از عدم تعادل در شرایط تحت کنترل بین دانه‌ای اتفاق می‌افتد (Miyazaki, 2015). انرژی بین دانه‌ای کنترل شدیدی بر روی شکل و اندازه بلورها داشته از اینرو رشد در شرایط درجه بالای عدم تعادل با تعداد محدود هسته، منجر به ایجاد بافت پورفیروبلاستی شکل-دار شده است.

۴- چنانچه سرعت فرضی متوسطی برای رشد گارنت در نظر بگیریم (10<sup>-10</sup> cm/s) می‌توان با استفاده از شیب خط وایازشی و فاکتور -1/Gt، زمان نسبی مورد نیاز جهت رشد گارنت در هر نمونه را بدست آورده و در حقیقت پلی میان میزان رشد اتفاق افتاده و زمان مصروف جهت رشد برقرار نمود (ستون آخر جدول ۵). به این ترتیب متوسط زمان لازم برای رسیدن گارنت‌ها به ابعاد حاضر حدود ۵۰ سال بوده است. فقط برای دو نمونه M-09 و M-15 که کمترین تعداد هسته و بیشترین میزان رشد را داشته‌اند، زمانی حدود ۲ برابر سایر نمونه‌ها برای رشد نیاز بوده است.



شکل ۱۱ - تصویر کلی تهیه شده از مقاطع میکروسکوپی، طرحواره بازترسیمی از گارنت ها، نمودار هیستوگرامی از ابعاد گارنت ها و در آخر هر ردیف الگوی CSD مستخرج برای هر نمونه.

Fig. 11. Total picture is formed from microphotographs, illustrated sketches from garnet crystals, histogram graphs and CSD curves of crystals, extracted for each samples.



شکل ۱۱- ادامه.

Fig. 11. Continued.

زیاد شده سپس تقریباً ثابت مانده و در نهایت کاهش پیدا کرده است (مانند Kretz, 2006). زمانیکه گارنت رشد کرده هسته‌های جدید نیز تولید شده‌اند. برخی از این هسته‌های تازه ممکن است بسیار نزدیک به گارنت‌های از قبل موجود بوده و منجر به بازپخت بلورها و بهم پیوستگی

۶- توزیع تصادفی گارنت در سنگهای مورد مطالعه به تبع توزیع تصادفی واکنشگرهای تولید کننده آن در سنگ با مرزهای تقاطعی سه-تایی بین دانه‌های قابل توجه است. در سنگهای مورد بحث نرخ رشد گارنت خطی ثابت بوده و با افزایش دما نرخ هسته‌بندی ابتدا به آرامی



بوده است. نمودارهای متمایز کننده تکنیکی بیانگر محیط درون صفحه‌ای (شاید اقیانوسی) برای این سنگ‌هاست که با مواد پوسته‌ای آرایش یافته است.

از ترسیم الگوی CSD برای گارنت‌های موجود در آمفیبولیت‌های حال حال و استخراج و بررسی داده‌های آماری گارنت نتایج زیر حاصل شد: گارنت حدود ربع تا نیمی از حجم مودال سنگ‌های مذکور را به خود اختصاص داده که بیانگر مناسب بودن ترکیب شیمیایی سنگ کل جهت رشد این کانی و مساعد بودن همه عوامل دیگر لازم مانند ساز و کار حمل بین دانه‌های مواد، خروج از حالت تعادل کافی در اثر دریافت شارش گرما و تعداد هسته‌های اندک که منجر به رشد قابل ملاحظه کانی شده، می‌باشد. شیب خط وایزشی برای نمونه‌های دانه درشت‌تر ملایم‌تر بوده و عرض از مبدا آن عدد کوچکتری است که نشانه نرخ J/G کمتر و در برابر نرخ رشد بالاتر است. خطی بودن الگوی CSD گارنت‌ها نشانه‌ای از نرخ ثابت دریافت انرژی از سوی سیستم درکنار ثابت ماندن واکنش مسؤوول تولید کننده گارنت‌هاست. در بعضی نمونه‌ها حالت محدب ابتدای الگوها علامت پیوستگی دانه‌های ریز مجاور هم به یکدیگر با هدف کاهش سطح انرژی آزاد سیستم و بازپخت استوالد می‌باشد.

آنها و تشکیل یک پورفایروبلاست شده است. هسته‌بندی اولیه و رشد توسط بازپخت استوالد بعدی و درشت شدگی، دستخوش تغییر شده (Joesten, 1991) و میانگین اندازه بلور را افزوده است.

### نتیجه گیری

منطقه مورد مطالعه در منتهی الیه شمال‌غربی ایران در مرز با ترکیه در شمالی‌ترین بخش استان آذربایجان غربی واقع شده است. در این ناحیه، آمیزه رنگی افیولیتی مزوزوئیک پهنه وسیعی را پوشانده و گارنت آمفیبولیت‌های ارتفاعات حال حال یکی از اجزاء آن در مسیر کلیسا کندی می‌باشد. کانی‌های غالب این سنگ‌ها گارنت آلماندنی - اسپسارتنی، آمفیبول و پلاژیوکلاز بوده و کانی‌های کوارتز، کلریت، بیوتیت، اپک، اپیدوت، کلسیت و میکای سفید (کانی رسی) حضور دارند. بافت اصلی سنگ‌ها پورفایروبلاستی و پوئی‌کیلوبلاستی بوده و آثار دگرشکلی جهت‌دار در آنها مشهود است.

براساس مطالعات زمین‌شیمیایی این سنگ‌ها از نوع ارتوآمفیبولیت بوده و سنگ مادر آنها بازالت تولیتی می‌باشد. الگوی عناصر نادرخاکی آنها تقعر داشته و همزمان از عناصر سبک و سنگین غنی و ناهنجاری منفی Eu داشته و از Lu و Y فقیر است. احتمالاً عمق زیاد منشاء، کمبود پلاژیوکلاز و پر گارنت بودن سنگ‌ها دلیل پیدایش چنین الگویی

### منابع

- Aghanabati, S.A., 2004. Geology of Iran, Geological Survey of Iran, Tehran, 586 p.
- Ague, J.J., Axler, J.A., 2016. Interface coupled dissolution–reprecipitation in garnet from subducted granulites and ultrahigh-pressure rocks revealed by phosphorous, sodium, and titanium zonation. *American Mineralogist* 101, 1696–1699.
- Alavi, M., Bolourchi, M.H., 1975. 1:250000 geological map of Maku. Geological Survey of Iran, Tehran, Iran
- Bagherzadeh, J., 2017. Petrology of the eastern Maku to Poldasht young extrusive rocks. Unpublished MSc Thesis (in Persian) Urmia University, Urmia.
- Bell, T.H., Rubenach, M.J., Fleming, P.D., 1986. Porphyroblast nucleation, growth and dissolution in regional metamorphic rocks as a function of deformation partitioning during foliation development. *Journal of Metamorphic Geology* 4, 37–67.
- Berberian, M., 1997. Seismic sources of the Transcaucasian historical earthquakes, *Historical and Prehistorical Earthquakes in the Caucasus*. D. Giardini and S. Balassanian (Editors), NATO Asi Series, Environment, Kluwer Academic Press, The Netherlands 28, 233-311.
- Berberian, M., Yeats, R., 1999. Patterns of Historical Earthquake Rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological society of America* 89, 120-139.
- Bruand, E., Gasser, D., Bonnand, P., Stuewe, K., 2011. The petrology and geochemistry of a metabasite belt along the southern margin of Alaska. *Lithos* 127, 282–297.
- Caddick, M.J., Kohn, M.J., 2013. Garnet: Witness to the evolution of destructive plate boundaries. *Elements* 9, 427–432.
- Carmichael, D.M., 1969. On the mechanism of prograde metamorphic reactions in quartz-bearing pelitic rocks. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 20, 244–267.
- Coply, A., Jackson, J., 2006. Active tectonics of the Turkish- Iranian Plateau. *Tectonics*, pp. 25.
- Dragovic, B., Samanta, L.M., Baxter, E.F., Selverstone, J., 2012. Using garnet to constrain the duration and rate of water-releasing metamorphic reactions during subduction: An example from Sifnos, Greece. *Chemical Geology* 314, 9–22.
- Elueze, A.A., 1985. Petrochemical and petrogenetic characteristics of Precambrian amphibolites of the Alawa District, NW Nigeria. *Chemical Geology* 48, 29-41.

- England, P.C., Thompson, A.B., 1984. Pressure–temperature–time paths of regional metamorphism I. Heat transfer during the evolution of regions of thickened continental crust. *Journal of Petrology* 25, 894–928.
- Fisher, G.W., Lasaga, A.C., 1981. Irreversible thermodynamics in petrology. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 8, 171–207.
- Gaidies, F., Pattison, D.R.M., de Capitani, C., 2011. Toward a quantitative model of metamorphic nucleation and growth. *Contribution to Mineralogy and Petrology* 162, 974–993.
- George, F.R., Gaidies, F., 2017. Characterization of a garnet population from the Sikkim Himalaya: insights into the rates and mechanisms of porphyroblast crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 172, 57.
- Graham, C.M., 1976. Petrochemistry and tectonic significance of Daldriam metabasaltic rocks of the SW Scottish Highlands. *Journal of Geological Society of London* 132, 61-84.
- Hayashi, K.I., Fujisawa, H., Holland, H.D., Ohmoto, H., 1997. Geochemistry of ~1.9 Ga sedimentary rocks from northeastern Labrador, Canada. *Geochimical Cosmochimical Acta* 61, 4115-4137.
- Higgins, M. D., 2006. Quantitative textural measurement in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press, 265p.
- Honkamo, M., 1987. Geochemistry and tectonic setting of early Proterozoic volcanic rocks in Northern Oshuthotria Finland. In: Pharaoh, T.C., Beckingsale, R.D., Richard, D. (Eds.) *Geochemistry and mineralisation of Proterozoic volcanic suites*. Geological Society Special Publication 38, pp. 231.
- Joesten, R.L., 1991. Kinetics of coarsening and diffusion-controlled mineral growth. In D.M. Kerrick Ed., *Contact Metamorphism*, 26, 507-582. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.
- Kamzolkin, V.A., Konilov, A.N., Kulakova, E.P., Latyshev, A.V., Smulskaya, A.I., Ivanov, S.D., 2019. Sulfides in Metamorphic Rocks of the Fore Range Zone (Greater Caucasus). A New Type of Mineral Container for Peak Metamorphism Mineral Assemblages. *Minerals* 9, 701.
- Kerrick, D.M., Lasaga, A.C., Raeburn, S.P., 1991. Kinetics of heterogeneous reactions. In D.M. Kerrick Ed., *Contact Metamorphism*, 26, 583-672. Mineralogical Society of America, Washington, D. C.
- Kretz, R., 1983. Symbols for rock-forming minerals. *American Mineralogist* 68, 277-279.
- Kretz, R., 2006. Shape, size, spatial distribution and composition of garnet crystals in highly deformed gneiss of the Otter Lake area, Quebec, and a model for garnet crystallization. *Journal of Metamorphic Geology* 24, 431-449.
- Lanari, P., Engi, M., 2017. Local Bulk Composition Effects on Metamorphic Mineral Assemblages. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* 83, 55-102.
- Lasaga, A.C., 1986. Metamorphic reaction rate laws and development of isograds. *Mineralogy Magazine* 50, 359–373.
- Leake, B.E., Singh, D., 1986. The Delaney Dome formation, Connemara, W. Ireland and the geochemical distribution of ortho- and para-quartzofeldspathic rocks. *Mineralogical Magazine* 50, 205-215.
- Manzotti, P., Ballèvre, M., 2013. Multistage garnet in high-pressure metasediments: Alpine overgrowths on Variscan detrital grains. *Geology* 4, 1151–1154.
- Marsh, B.D., 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization I. Theory. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 99, 277–291.
- McDonough, W.F., Sun, S.S., Ringwood, A.E., Jagoutz, E., Hofmann, A.W., 1992. Potassium, rubidium, cesium in the Earth and Moon and the evolution of the Earth's mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 56, 1001–1012.
- Meshram, T.M., Shukla, D., Behera, K.K., Mahapatro, S.N., Reddy, V.A., Rao, K.C., 2017. Petrography and geochemistry of the Amphibolites from southeastern part of Yerapalli schist belt, Eastern Dharwar Craton, India. *Journal of Indian Geophysic Union* 21, 391-400.
- Misra, S. N., 1971. Chemical distinction of high-grade ortho-and para-metabasites. *Norsk Geologisk Tidsskrift* 51, 311–316.
- Miyazaki, K., 2015. Diffusion-controlled growth and degree of disequilibrium of garnet porphyroblasts: is diffusion-controlled growth of porphyroblasts common?. *Earth and Planetary Science Letters* 2, 25.
- Moazzen, M., Modjarrad, M., 2005. Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran. *Geological Journal* 40, 499-517.
- Modjarrad, M., 2015. Crystal size distribution of amphiboles from Bezow dacites, Urmia, Iran. *Neues Jahrbuch Fur Geologie Und Palaontologie- Abhandlungen* 276, 101-110.

- Modjarrad, M., 2019. Crystal size distribution studies on the leucite, pyroxene and olivine at the eastern Urmia Lake volcanic rocks- magma mixing possibility and residence time at the chamber. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 27, 55-68.
- Modjarrad, M., 2020. Effect of whole rock chemistry on the crystal size distribution of garnet in metapelites, comparison of Shahindezh schist with Dorbeh hornfelses. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 28, 297-310.
- Modjarrad, M., Sheykhbaglou, S., 2016a. Crystal size distribution of amphibole and plagioclase from Zanbil adakitic dacites, Urmia-Iran: Evidence for magma mixing and textural coarsening. *Acta Geodynamic Geomaterials* 181, 89-101.
- Modjarrad, M., Sheykhbaglou, S., 2016b. Crystal Size Distribution of kyanite and staurolite from Hamza Qassim and Khazai Bala Metapelites-southeast Shahin-Dezh; confirmation to regional metamorphism conditions at the area. *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 24, 99-108.
- Molaiy Gaznagh, F., 2018. Garnet Mineralogy and Geochemistry of Iran Northwest. Unpublished Ms.C thesis (in Persian) Urmia University, Urmia.
- Morneau, Y.E., Gaidies, F., Ryan, J.J., Zagorevski, A., 2017. Estimates of garnet crystallization and retes of metamorphism for metapelites of the Snowcap assemblage, Yukon-Tanana terrane, Yukon. *Geological Survey of Canada* pp. 21.
- Mryashiro, A., 1974. Volcanic rock series in island arcs and active continental margins. *American Journal of Sciences* 274, 321-355.
- Pattison, D.R.M., de Capitani, C., Gaidies, F., 2011. Petrological consequences of variations in metamorphic reaction. *Journal of Metamorphic Geology* 29, 953-977.
- Pearce, J., 1982. Trace Element Characteristics of Lavas from Destructive Plate Boundaries. In book: *Andesites: Orogenic Andesites and Related Rocks*, Publisher: John Wiley and Sons, Editors: R.S. Thorpe, 525-548.
- Roustae, M., Zamani, B., Navabpour, P., Moayyed, M., 2015. Investigation of the mechanism and neotectonics of the Siah Cheshmeh-Khoy fault zone. *Geosciences (in Persian)* 96, 221-234.
- Shervais, J.W., 1982. Ti-V plots and petrogenesis of modern and ophiolitic lavas. *Earth and Planetary Sciences Letters* 23, 319-351.
- 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.
- Spear, F.S., Daniel, C.G., 1998. Three-dimensional imaging of garnet porphyroblast sizes and chemical zoning: Nucleation and growth history in the garnet zone. *Geological Materials Research* 1, 1-44.
- Spear, F.S., Daniel, C.G., 2001. Diffusion control of garnet growth, Harpswell Neck, Maine, USA. *Journal of Metamorphic Geology* 19, 179-195.
- Storkey, A.C., Hermann, J., Hand, M., Buick, I.S., 2005. Using in situ trace-element determinations to monitor partial-melting processes in metabasites. *Journal of Petrology* 46, 1286-1308.
- Tajbakhsh, G., Moosavizadeh, S. M., 2020. Geochemistry of Rare Earth Element in garnet group minerals in some regional metamorphic complexes - Central Iran Micro-Continent (CIMC). *Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy (in Persian)* 28, 383-400.
- Teng, H.H., 2013. How ions and molecules organize to form crystals? *Elements* 9(3), 189-194.
- Vance, D., Mahar, E. 1998. Pressure-temperature paths from PT pseudosections and zoned garnets: potential, limitations and examples from the Zaskar Himalaya, NW India. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 132, 225-245.
- Vermeesch P., 2006. Tectonic discrimination diagrams revisited. *Geochemistry, Geophysics and Geosystems* 7, 1-55.
- Vernn, R.H., 1989. Porphyroblast-matrix microstructural relationships: recent approaches and problems. *Geological Society of London, Special Publications* 43, 83-102.
- Walker, K.R., Joplin, G.A., Lovering, J.F., Green, R., 1960. Metamorphic and metasomatic convergence of basic igneous rocks and lime-magnesia sediments of the Pre-Cambrian of northwestern Qeenland". *Journal of Geological Society of Australia* 6, 147-178.
- Waters, D.J., Lovegrove, D.P., 2002. Assessing the extent of disequilibrium and overstepping of prograde metamorphic reactions in metapelites from the Bushveld Complex aureole, South Africa. *Journal of Metamorphic Geology* 20, 135-149.
- White, W.M., 2013. *Geochemistry*. Wiley-Blackwell publications.
- Williams, M.L. 1994. Sigmoidal inclusion trails, punctuated fabric development, and interactions between metamorphism and deformation. *Journal of Metamorphic Geology* 12, 1-21.

Winchester, J.A., Floyd, P.A., 1977. Geochemical discrimination of different magma series and differentiation products using immobile elements. *Chemical Geology* 20, 325- 342.