



## Physical Conditions of the Formation of Plagioclase Crystals Using Crystal Size Dispersion (CSD) in the Mafic Migmatites of Northeastern Takab

Haleh Ghorbani <sup>1\*</sup> , Robab Hajialioghli <sup>2</sup> , Mohsen Moazzen <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Ph.D., Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>2</sup> Assistant Professor, Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran

<sup>3</sup> Professor, Department of Earth Sciences, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz, Tabriz, Iran; Professor, Department Earth and Environmental Sciences, University of Central Asia, Khorog, Tajikistan

### ARTICLE INFO

#### Article History

Received: 28 December 2022  
 Revised: 28 February 2023  
 Accepted: 28 February 2023

#### Keywords

Crystal size distribution (CSD)  
 leucosome  
 migmatite  
 northeast Takab  
 plagioclase

#### \*Corresponding author

Haleh Ghorbani  
 ✉ [haleh\\_ghorbani@tabrizu.ac.ir](mailto:haleh_ghorbani@tabrizu.ac.ir)

### ABSTRACT

The Zanzan-Takab complex is a metamorphic belt with NW-SE trend that includes gneiss, amphibolite and gneissic amphibolite, old metagranites, pelitic schists with migmatites and metaophiolites. Takab mafic migmatites, based on field evidence and partial melting degree, are divided into two main groups of metatexites with patchy, ophthalmitic, diktyonitic, agmatic, stromatic structures and diatexites with schollen, pygmatic, folded, stictolithic, phlebotic, schliren, nebulitic structures. These migmatites consist of mesosome part with textures of porphyroblastic, xinoblastic, granoblastic and nematoblastic and main minerals plagioclase, hornblende, biotite, melanosome part with nematoblastic, xinoblastic, granoblastic and oriented textures and main minerals hornblende and plagioclase. The leucosome part is composed of granular, symplectic and myrmekitic textures and the main minerals are plagioclase, quartz, k-feldspare, titanite, hornblende and biotite. Investigating the shape of the crystal size scatter diagrams (CSD) shows the physical conditions and petrological processes are effective in the studied rocks. In order to investigate these processes, plagioclase crystals in 4 leucosome samples were quantitatively analyzed with the help of Jmicro vision and CSD Corrections software, and then the results obtained from the analysis of different leucosome samples were compared. The crystal size scatter diagrams of plagioclase crystals show two stages of growth with different speeds in the studied samples, so that the larger crystals (the end part of the curved diagram on the right) belong to a melt that is at greater depths or it cooled in a calmer environment. Nevertheless, the initial part of the diagram on the left side crystallized in more superficial areas and at a higher speed.

### How to cite this article

Ghorbani, H., Hajialioghli, R. and Moazzen, M., 2023. Physical Conditions of the Formation of Plagioclase Crystals Using Crystal Size Dispersion (CSD) in the Mafic Migmatites of Northeastern Takab. *Journal of Economic Geology*, 15(2): 57–81. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.80119.1061>



©2023 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.

## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

The crystallization history of a rock is recorded in the size and distribution of its minerals (Muller et al., 2009). The most common method of quantitative measurement of textures is investigation of crystal size dispersion (CSD) (Higgins, 1998). Crystal size dispersion (CSD) deals with the quantitative measurement of crystals of a specific mineral with a unit volume in size intervals (Cashman, 1993; O'Driscoll et al., 2007). Many researchers, including Cashman and Marsh (1988), Cashman (1993), Zieg and Marsh (2002), Higgins and Roberge (2003), Higgins and Roberge (2007), Kaneko et al., (2005), Cashman and Ferry (1988), Higgins (1996) and O'Driscoll et al., (2007) in their studies of CSD diagrams to determine kinetic indices of crystallization of magmatic systems, cooling history, temperature, magmatic mixing, texture maturity, dominant size of crystals, density Crystals and partial volume of crystals and thermodynamic and kinetic models were used. In addition, researchers such as Kaneko et al., (2005), Cashman and Ferry (1988), Moazzen and Modjarrad (2005) and Muller et al., (2009) studied the crystal size distribution in metamorphic rocks. In this research, an attempt has been made to investigate the plagioclase crystals in the leucosome section in the migmatites of North-Eastern Takab using the crystal size dispersion (CSD) technique, and by examining the resulting diagrams, the petrological processes and the nucleation rate of the crystals plagioclase should be expressed during melting and finally the formation of leucosomal parts.

### Materials and methods

In the study of Ghareh naz migmatites, after taking digital photos of the leucosomal part, they were put together with Adobe Illustrator software for better coverage, and then all the plagioclase crystals were drawn and measured separately. Then the images were transferred to JMicroVision v1.2.7 software and the necessary measurements for all 4 locosome samples (7n, 6p, 6m, mh) including length, width, area, angle, location of the center of crystals (coordinates of X and Y points) in the environment of this software was done. It should be mentioned that considering that the studies are done on thin section images, so to eliminate the errors caused by

this problem, all the software settings were entered based on the Higgins (1998) method. Then the obtained data were transferred to CSD Corrections 1.40 software and according to the information obtained from the frequency and size of plagioclase crystals, a natural semi-logarithmic diagram based on the method provided by Higgins (1998) for 4 leucosome samples of migmatite Ghareh naz was drawn separately. In these diagrams, the population density axis,  $\text{Ln}(n)(\text{mm}^{-4})$  is plotted against the size axis of the largest crystal dimension, (mm) equal to L. The unit of measurement for bulk density is  $\text{mm}^{-4}$  (Marsh, 1988; Higgins, 2006; Bindeman, 2003; Higgins ana Roberge, 2003, Higgins ana Roberge, 2007; Gulda, 2006; Higgins and Chandrasekharam, 2007; Brugger and Hammer, 2010) and for crystal size is mm.

### Result

Studies show that downward concavity in the direction of small crystal sizes indicates coarsening (Higgins ana Roberge, 2007; Vanderzwan et al., 2013) or, in other words, indicates the cessation of nucleation along with successive crystal growth (Lentz and Mcsween, 2000; Higgins ana Roberge, 2007; Vanderzwan et al., 2013). The amount of low concavity in some samples can be considered as an almost linear trend. The almost linear trend on the right side of some graphs indicates the successive growth and nucleation of crystals, the process of subtraction (crystal separation during subtractive crystallization) and crystal accumulation (Higgins, 2009). As can be seen in the diagrams, the very small break created in the crystal size scatter diagram indicates the accumulation or increase of large grains, or in other words, the sedimentation and separation of crystals (Lentz and Mcsween, 2000). In other words, the coarsening process in the studied migmatite locosome occurs when small grains in multiphase mixtures have a higher surface free energy per unit volume than large grains and for this reason, they are less stable (Higgins, 1998, Higgins, 1999).

### Discussion

The scatter diagrams of the crystal size in the studied leucosomal samples show that the larger crystals (the end part of the curved diagram on the right) belong to a melt that cooled at greater depths or in a calmer environment. Nevertheless, the initial part of the

diagram in the left side crystallized in more superficial areas and at a higher speed. Based on the studies conducted on the plagioclase crystals in the migmatite locosome, it was observed that the plagioclase crystals have a non-linear CSD trend, which indicates two stages of growth with different speeds for these crystals. In the initial stages of

crystallization, plagioclase is in the form of coarse crystals with low number of spores, high gradient and high growth rate, and in the next stage, smaller plagioclase with high nucleation rate, low gradient and low growth rate are developed. Plagioclase crystals with their large number and relatively large size indicate their slow cooling and low nucleation.



## بررسی شرایط فیزیکی تشکیل بلورهای پلاژیوکلاز با استفاده از پراکندگی اندازه بلور در میگماتیت‌های مافیک شمال شرق تکاب

هاله قربانی<sup>۱\*</sup>، رباب حاجی علی اوغلی<sup>۲</sup>، محسن مؤذن<sup>۳</sup> 

<sup>۱</sup> دکتری، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۲</sup> دانشیار، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران

<sup>۳</sup> استاد، گروه علوم زمین، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز، تبریز، ایران؛ استاد، گروه علوم زمین و محیطی، دانشگاه آسیای مرکزی، خاروغ، تاجیکستان

### چکیده

مجموعه زنجان- تکاب یک کمر بند دگرگونی با روند NW-SE و شامل گنایس، آمفیبولیت و آمفیبولیت گنایسی، متاگرانیت‌های قدیمی، شیست‌های پلیتی به همراه میگماتیت‌ها و متافیولیت‌هاست. میگماتیت‌های مافیک تکاب بر اساس شواهد صحرایی و درجه ذوب بخشی به دو گروه اصلی متاتکسیت با ساختارهای لکه‌ای یا لخته‌ای، افتالمیتیک، دیکتیونیتیک، آگماتیک، استروماتیک و دیاتکسیت با ساختارهای شولن، پتیگماتیک، چین خورده، استیکتولیتیک، فلیتیک یا رگه‌ای، شلیرن، نبولیتیک یا ابری شکل تقسیم شده‌اند. این میگماتیت‌ها از تناوب بخش مزوسومی با بافت پورفیروبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک و کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت، بخش ملانوسومی با بافت نماتوبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و جهت‌دار و کانی‌های اصلی هورنبلند، پلاژیوکلاز و بخش لوکوسومی با بافت دانه‌ای، سیمپلکتیت و میرمکتیتی و کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم، تیتانیت، هورنبلند و بیوتیت تشکیل شده‌اند. بررسی شکل نمودارهای پراکندگی اندازه بلور بیانگر شرایط فیزیکی و فرایندهای سنگ‌شناختی مؤثر در سنگ‌های مورد بررسی است. برای بررسی این فرایندها، بلورهای پلاژیوکلاز در ۴ نمونه لوکوسومی به کمک نرم‌افزارهای Jmicro vision و CSD Corrections آنالیز کمی شدند و سپس نتایج به دست آمده از آنالیز نمونه‌های مختلف لوکوسومی با هم مقایسه شدند. نمودارهای پراکندگی اندازه بلور، بلورهای پلاژیوکلاز دو مرحله رشد با سرعت‌های متفاوت را در نمونه‌های مورد بررسی نشان می‌دهد؛ به طوری که بلورهای درشت‌تر (بخش انتهایی نمودار خمیده سمت راست) به مذابی تعلق دارند که در اعماق بیشتر و یا در محیطی آرام‌تر سرد شده‌اند؛ ولی بخش ابتدایی نمودار در سمت چپ، در مناطق سطحی‌تر و با سرعت زیادتری متبلور شده است.

### اطلاعات مقاله

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۰/۰۷

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۲/۰۹

### واژه‌های کلیدی

پراکندگی اندازه بلور  
پلاژیوکلاز  
شمال غرب تکاب  
لوکوسوم  
میگماتیت

### نویسنده مسئول

هاله قربانی

haleh\_ghorbani@tabrizu.ac.ir 

### استناد به این مقاله

قربانی، هاله؛ حاجی علی اوغلی، رباب و مؤذن، محسن، ۱۴۰۲. بررسی شرایط فیزیکی تشکیل بلورهای پلاژیوکلاز با استفاده از پراکندگی اندازه بلور در میگماتیت‌های مافیک شمال شرق تکاب. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۵(۲): ۵۷-۸۱. <https://doi.org/10.22067/ECONG.2023.80119.1061>

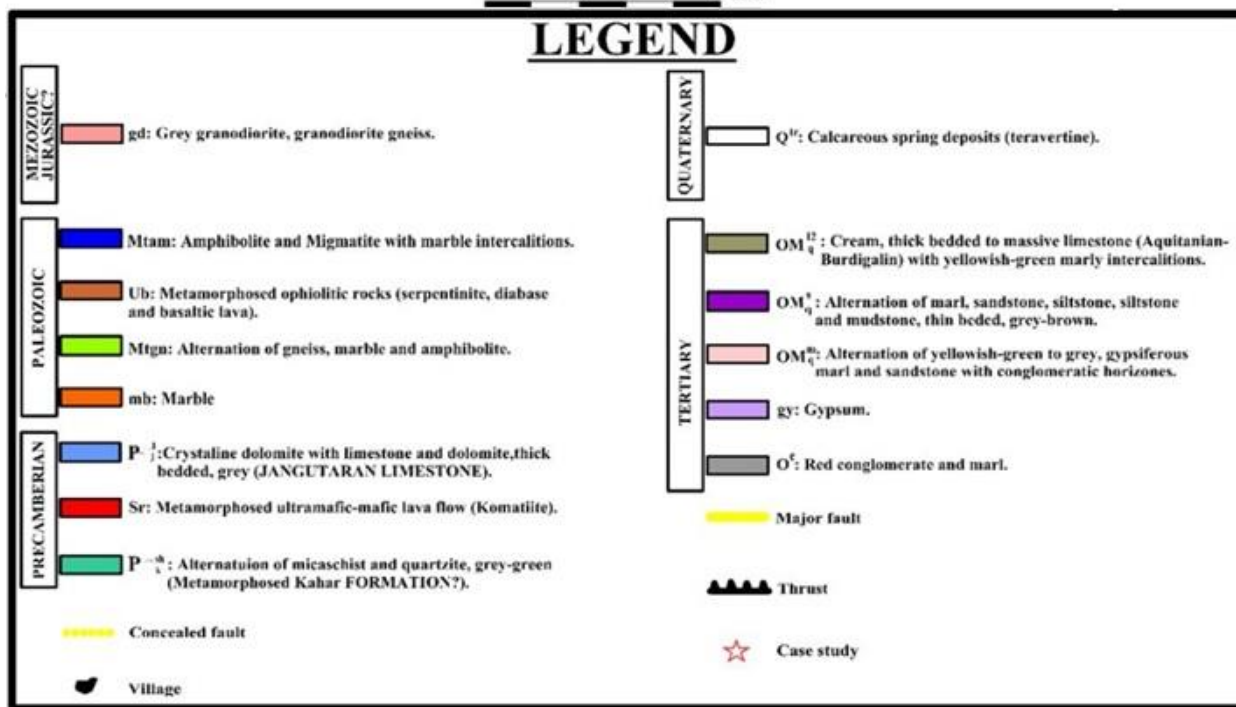
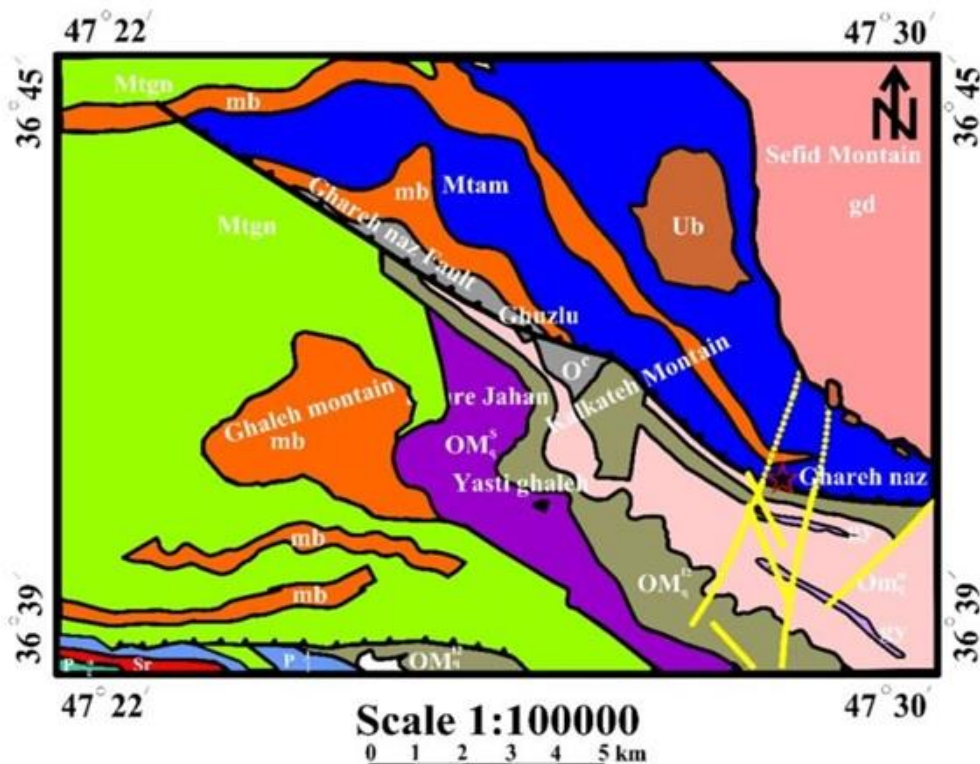
## مقدمه

سرگذشت تبلور یک سنگ در اندازه و پراکندگی کانی‌های آن ثبت می‌شود (Muller et al., 2009). متداول‌ترین روش اندازه‌گیری کمی بافت‌ها، بررسی پراکندگی اندازه بلورهاست (Higgins, 1998). پراکندگی اندازه بلور به اندازه‌گیری کمی بلورهای یک کانی مشخص با حجم واحد در فواصل اندازه‌ای می‌پردازد (Cashman, 1993; O'Driscoll et al., 2007). پژوهشگران زیادی از جمله کشمن و مارش (Cashman and Marsh, 1988)، کشمن (Cashman, 1993)، زیگ و مارش (Zieg and Marsh, 2002)، هیگینز و روبرج (Higgins and Roberge, 2003, Higgins and Roberge, 2007)، کانکو و همکاران (Kaneko et al., 2005)، کشمن و فری (Cashman and Ferry, 1988)، هیگینز (Higgins, 1996)، اودریسکول و همکاران (O'Driscoll et al., 2007) در پژوهش‌های خود از نمودارهای CSD برای تعیین شاخص‌های کینتیکی تبلور سامانه‌های ماگمایی، تاریخچه سرد شدن، دما، اختلاط ماگمایی، بلوغ بافتی، اندازه غالب بلورها، چگالی بلورها و حجم جزئی بلورها و مدل‌های ترمودینامیکی و کینتیکی بهره بردند. علاوه بر این، پژوهشگرانی همچون کانکو و همکاران (Kaneko et al., 2005)، کشمن و فری (Cashman and Ferry, 1988)، مؤذن و مجرد (Moazzen and Modjarrad, 2005)، مولر و همکاران (Muller et al., 2009) به بررسی پراکندگی اندازه بلور در سنگ‌های دگرگونی پرداخته‌اند. به عقیده گری (Gray, 1968) اندازه بلور در سنگ‌های آذرین و دگرگونی، محصول سرعت متفاوت رشد و طول زمان صرف‌شده برای رشد است. بنابراین می‌توان بیان کرد که پراکندگی اندازه بلور در سنگ‌های دگرگونی، اطلاعاتی اساسی در ارتباط با محیط، زمان و میزان رشد، سرعت هسته‌بندی و میزان حرارت ارائه می‌کند (Daniel and Spear, 1998). این اطلاعات بیانگر تأثیر درجه حرارت بر روی سرعت هسته‌بندی و رشد کانی‌ها در دگرگونی است. بنابراین به بیان کانکو و همکاران (Kaneko et al., 2005) ترکیب سنگ

کل در سنگ‌های دگرگونی عاملی مهم در شکل منحنی‌های پراکندگی اندازه بلور است. به طور کلی، میزان رشد یا درشت‌شدگی افزون بر تعداد هسته‌ها تابع حضور یون‌های شیمیایی مورد نیاز برای رشد بلور است و این رشد می‌تواند بر یک هسته منفرد یا چندین هسته نزدیک به هم پیوسته رخ دهد (Daniel and Spear, 1998). زمان رشد وابسته به مدت حاکمیت شرایط دگرگونی مناسب برای تشکیل هسته و نیز رشد بلور است. به عقیده کانکو و همکاران (Kaneko et al., 2005) شارش سیال با حجم بالا باعث سهولت انتشار یون‌های مورد نیاز برای رشد بلور شده و مانعی برای ایجاد هسته‌های بیشتر است که به نوبه خود باعث رشد بیشتر هسته‌های موجود می‌شود. به گفته وی در این میان آب از همه سیال‌ها مهم‌تر است و افزایش فشار بخار آب به افزایش سرعت انتشار یون‌ها و سهولت سازو کار انتقال یون به محل هسته‌بندی منجر شده است و باعث رشد قابل توجه یون‌ها می‌شود. در این پژوهش سعی شده است تا با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور به بررسی بلورهای پلاژیوکلاز موجود در بخش لوکوسومی در میگماتیت‌های شمال‌شرق تکاب پرداخته شود و با بررسی نمودارهای حاصل، فرایندهای سنگ‌شناختی و سرعت هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز در طی ذوب‌بخشی و در نهایت تشکیل بخش‌های لوکوسومی بیان شود.

## زمین‌شناسی منطقه

مجموعه زنجان- تکاب شامل یک کمر بند سنگ‌های دگرگونی با روند NW-SE موازی با کوه‌زایی زاگرس است (Hassanzadeh et al., 2008). این مجموعه بیشتر توالی‌های دگرگونی زنجان- تکاب که شامل توالی‌های گوناگونی از سنگ‌های پارا و ارتوگنایس‌ها، آمفیبولیت‌ها و آمفیبولیت‌های گنایسی، متاگرانیت‌های قدیمی، انواع شیست‌های پلیتی و کالک شیست‌ها به همراه میگماتیت‌ها و متافیولیت‌ها (سرپانتینیت‌ها، متاگابروها ...) هستند و در بخش‌های شمال‌غرب زنجان، شمال‌شرق و شمال‌غرب تکاب رخمون دارند (Hassanzadeh et al., 2008) (شکل ۱).

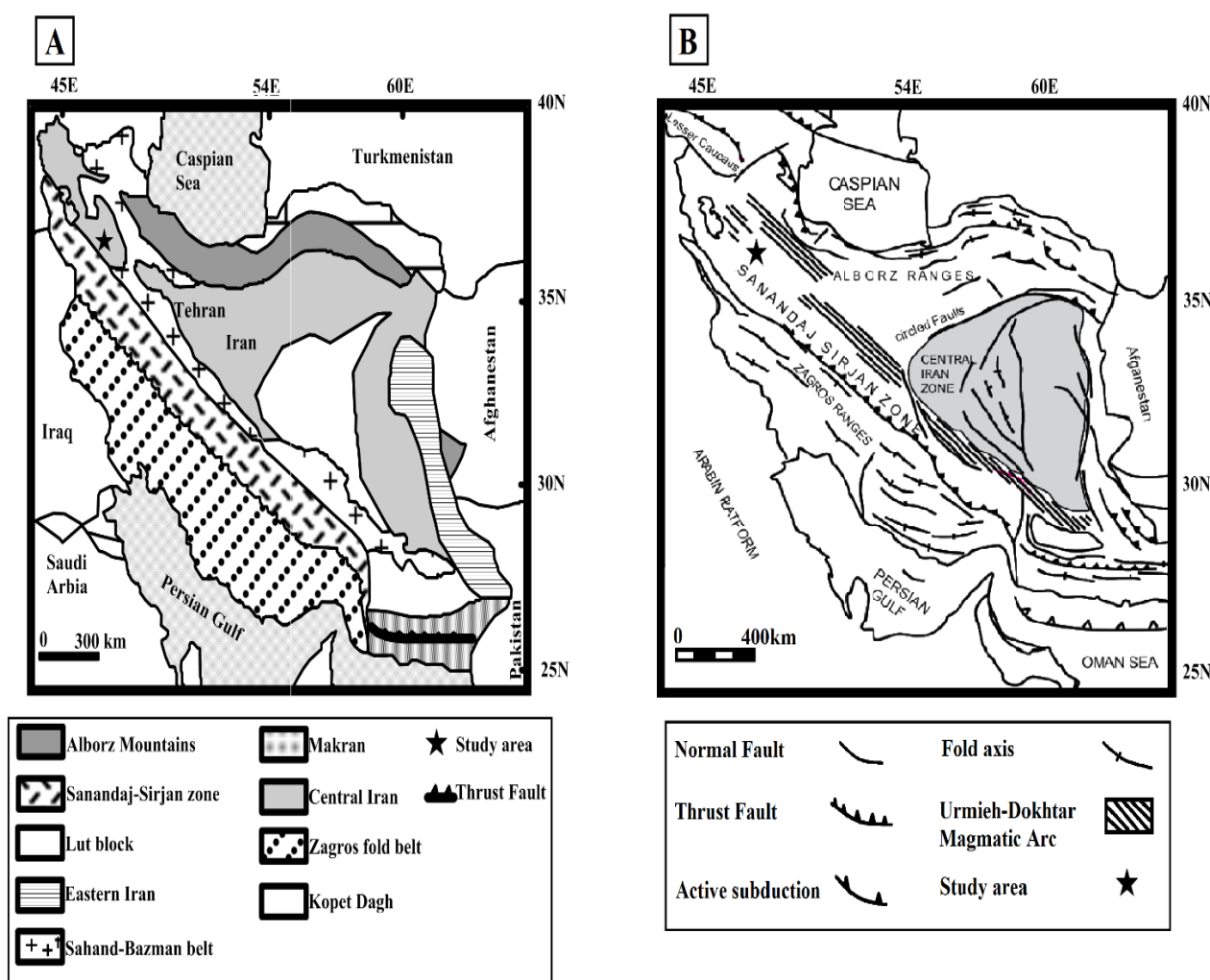


شکل ۱. نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه قره ناز (برگرفته با اندکی تغییرات از نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان ( Babakhani, and Ghalamghash, 2001))

Fig. 1. Simplified geological map of Ghareh naz area (taken with slight changes from the 1:100000 Takht-soleiman geological map (Babakhani, and Ghalamghash, 2001))

2008). منطقه مورد بررسی از نظر رده‌بندی ساختاری در زون‌های مختلف سهندج- سیرجان (Alavi, 2004; Gilg et al., 2006) (شکل ۲-ب)، محل برخورد زون‌های ایران مرکزی، البرز- آذربایجان و سهندج- سیرجان (Babakhani and Berberian and Ghalamghash, 2001) و زون ایران مرکزی (King, 1981) قرار دارد (شکل ۲-ا).

سن این کمر بند دگرگونی نئوپروتوزوئیک پسین- کامبرین پیشین پیشنهاد شده است، این نتیجه‌گیری‌ها از روی سن سنجی U-Pb بر روی زیرکن در متاگرانیت‌ها و ارتوگنیس‌ها به دست آمده است (Hassanzadeh et al., 2008). از سوی دیگر، گرانیتهای قدیمی ایران یعنی گرانیتهای دوران به سن اواخر نئوپروتوزوئیک- کامبرین زیرین در پیرامون روستای دوران در جنوب غرب زنجان رخنمون دارند (Hassanzadeh et al., )



شکل ۲. موقعیت منطقه قره‌ناز در تقسیم‌بندی‌های ساختاری مختلف، A: منطقه مورد بررسی بخشی از زون ایران مرکزی است (Berberian and King, 1981) و B: منطقه مورد بررسی در زون سهندج- سیرجان واقع شده است (Gilg et al., 2006; Alavi, 2004).  
**Fig. 2.** Location of Ghareh naz in different structural divisions, A: The study area is part of the central Iran zone (Berberian and King, 1981), and B: The study area is located in the Sanandaj-Sirjan zone (Gilg et al., 2006; Alavi, 2004).

بخش‌های مختلف میگماتیتهی (مزوسوم، ملانوسوم و لوکوسوم)، می‌توان این بخش‌ها را نسبت به هم مجزا کرد. بنابراین با توجه به حجم پایین مذاب و حفظ ساختارهای دگرگونی می‌توان گفت که این میگماتیته‌ها در طی ذوب‌بخشی با حجم کمتر در منطقه تشکیل شده‌اند. میگماتیته‌های متاتکسیتی قره‌ناز دارای ساختارهای متنوعی بوده که در **جدول ۱** آمده است.

**میگماتیته‌های دیاتکسیت:** میگماتیته‌های دیاتکسیت برآمده از ذوب‌بخشی درجه بالا با حجم زیاد بلور و مذاب بوده و این افزایش حجم مذاب در این گروه از میگماتیته‌ها سبب به هم خوردگی ساختارهای دگرگونی اولیه آمفیبولیت‌ها شده است. میگماتیته‌های دیاتکسیت احتمالاً از مذاب، بلورهای تبلور یافته، رسیت یا تفاله تشکیل شده‌اند. به طور کلی، حضور ساختارهای اولیه به هم ریخته (مانند شولن و شلیرن) و ساختارهای غالب آذرین (مانند ساختار پگماتوئیدی و ابری) از ساختارهای مهم در میگماتیته‌های دیاتکسیت قره‌ناز هستند. گاهی به علت بالای بودن درصد ذوب‌بخشی در میگماتیته‌های دیاتکسیت منطقه مورد بررسی، لوکوسوم‌ها دارای حجم قابل ملاحظه‌ای از کانی‌های مافیک هستند. میگماتیته‌های دیاتکسیت در منطقه قره‌ناز دارای ساختارهای متنوعی هستند (**جدول ۲**).

### سنگ‌نگاری میگماتیته‌های قره‌ناز

#### ویژگی‌های میکروسکوپی پالئوسوم (مزوسوم)

بخش مزوسومی در میگماتیته‌های مورد بررسی دارای مجموعه کانی‌های پلاژیوکلاز، هورنبلند، بیوتیت و مقادیر فرعی کوارتز، فلدسپار پتاسیم، تیتانیت، زیرکن، اپیدوت و کانی ثانویه کلریت است (**شکل ۳-D**). بافت غالب مزوسوم پورفیروبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک است. بلورهای هورنبلند دارای جهت یافتگی بوده و در تناوب با لایه‌های غنی از پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم، برگ‌وارگی نشان می‌دهند. اندازه بلورها در مزوسوم دانه ریزتر از دو قسمت دیگر لوکوسوم و ملانوسوم است و تبلور از حالت جامد را نشان می‌دهد (**شکل ۳-۳**).

با وجود روند NW-SE ساختارهای دگرگون در زون سنندج-سیرجان و نیز موقعیت منطقه مورد بررسی در این زون، این مجموعه دگرگونی از نظر ویژگی‌های سنگ‌شناسی (این مجموعه دارای تشکیل دهنده‌هایی از سنگ‌های دگرگون شامل گنیس، شیست‌های رسی، آمفیبولیت، میگماتیت، گرانولیت‌های سیلیکات آهکی و مرمر است) ویژگی‌های زمین‌شیمیایی و ایزوتوپی بسیار مشابه با زون ایران مرکزی دارد (Hajjaliloghli et al., 2007; Shafaii Moghadam et al., 2013). میگماتیته‌های مافیک مورد بررسی در روستای قره‌ناز در شمال شرق شهرستان تکاب قرار دارد (**شکل ۱**). میگماتیته‌های روستای قره‌ناز از ذوب‌بخشی آمفیبولیت‌ها به وجود می‌آیند. بر اساس حجم لوکوسوم، میگماتیته‌های روستای قره‌ناز به دو نوع متاتکسیت و دیاتکسیت طبقه‌بندی می‌شوند. آمفیبول و پلاژیوکلاز با نسبت‌های مودال متفاوت، کانی‌های اصلی تشکیل دهنده سنگ‌های مورد بررسی هستند.

### ساختارهای ماکروسکوپی میگماتیته‌های قره‌ناز

بر اساس شواهد صحرایی و درجه ذوب‌بخشی در میگماتیته‌های مورد بررسی، می‌توان میگماتیته‌های مورد بررسی را به دو گروه اصلی متاتکسیت و دیاتکسیت تقسیم کرد که در ادامه به شرح هر گروه پرداخته شده است. باید توجه داشت که در بررسی ساختارهای ماکروسکوپی میگماتیته‌ها، برخی از ساختارها بسته به حجم ذوب‌بخشی در هر دو گروه متاتکسیت و دیاتکسیت جای می‌گیرند (مانند ساختارهای فلیتیک، چین خورده و ...).

**میگماتیته‌های متاتکسیت:** مذاب حاصل از ذوب‌بخشی در میگماتیته‌های متاتکسیت، به صورت لایه‌ای و موازی با برگ‌وارگی آمفیبولیت‌های اولیه قرار می‌گیرد. در این حالت ساختارهای دگرگونی بیشتر حفظ شده‌اند. در برخی ساختارهای میگماتیتهی منطقه که در گروه متاتکسیت قرار می‌گیرند، تفکیک پالئوسوم و نئوسوم (ملانوسوم و لوکوسوم) بسیار مشکل بوده؛ به گونه‌ای که در برخی از نمونه‌ها با توجه به تراکم کانی‌ها در



کوارتز نیز هستند. در مزوسومها بلورهای تیتانیت ثانویه نیز دیده می‌شود که در امتداد رخ‌ها و حاشیه بلورهای آمفیبول تشکیل شده‌اند. تشکیل تیتانیت ثانویه در آمفیبول‌ها به دلیل کاهش دما و آزاد شدن تیتانیم از ساختار آمفیبول‌ها در امتداد رخ‌ها و کشیدگی‌های بلورهای آمفیبول است. کانی‌های زیرکن با برجستگی بالا و حاشیه پلئوکروئیک در مقادیر فرعی در این بخش دیده شده که بیشتر به صورت ادخال در پلاژیوکلاز و آمفیبول دیده می‌شوند.

(D). فلدسپارهای موجود در میگماتیت‌ها شامل پلاژیوکلاز و فلدسپار پتاسیم است. پلاژیوکلاز در تمام بخش‌های میگماتیت‌ها دیده می‌شود و مقدار آن در لوکوسوم فراوان‌تر است. کوارتزهای موجود در بخش مزوسوم دارای مقادیر حجمی کم با اندازه‌ای ریز تا متوسط و به صورت بی‌شکل هستند. بیوتیت‌های موجود در بخش مزوسوم دارای اندازه ریزبلور تا متوسط بلور هستند. برخی بلورهای بیوتیت‌ها در تعادل بافتی با بلورهای آمفیبول و پلاژیوکلاز قرار دارند. بیوتیت‌های موجود در این بخش گاه دارای میان‌بارهای

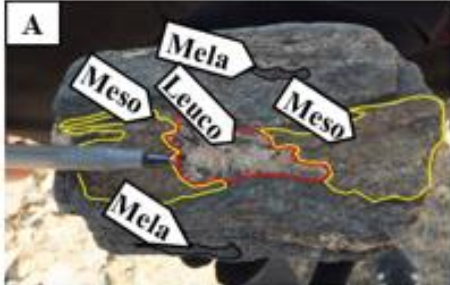
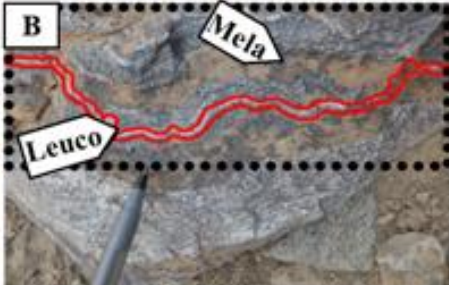
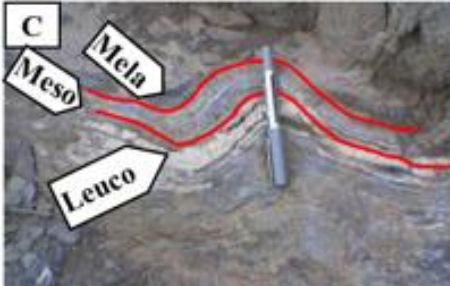



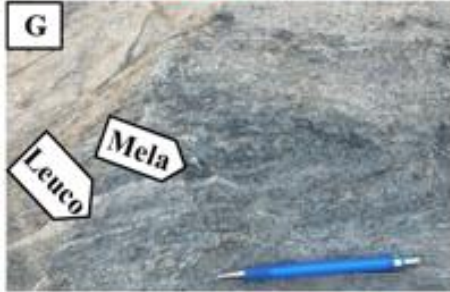
جدول ۱. طبقه‌بندی ساختارهای متاکستی در میگماتیت‌های منطقه قره‌ناز

Table 1. Classification of metatexite structures in migmatites of Ghareh naz area

Figure of structures	Types of structures
	<p>A: Patchy;                  B: Ophthalmitic;                  C: Diktyonitic;                  D: Agmatic;                  E: Stromatic</p> <p style="text-align: center;"><b>Metatexite</b></p>

جدول ۲. طبقه‌بندی ساختارهای دیاتکستی در میگماتیت‌های منطقه قره‌ناز

Table 2. Classification of diatexite structures in migmatites of Ghareh naz area

Figure of structures	Types of structures
 	<p><b>Diatexite</b></p> <p>A: Schollen;                  B: Ptygmatic;                  C: Folded;                  D: Stictolithic;                  E: Phlebetic;                  F: Schliren;                  G: Nebulitic</p>
 	
 	
	

هورنبلند، پلاژیوکلاز و در مقادیر کمتر تیتانیت، زیرکن و کانی کدر است. این بخش دارای بافت‌های نماتوبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و جهت‌دار است. اندازه بلورهای هورنبلند در ملانوسوم از ریزبلور تا درشت‌بلور متغیر است (به طور

ویژگی‌های میکروسکوپی نئوسوم (ملانوسوم و لوکوسوم) ملانوسوم بخش تیره نئوسوم بوده و دارای کانی‌هایی شامل

متوسط دارای اندازه‌ای در حدود  $\geq 5\text{mm}$  هستند) (شکل ۳-۲) همچنین اندازه بلورها در این بخش درشت‌تر از بلورهای موجود در مزوسوم است. ملانوسوم به صورت لایه‌های تیره‌رنگ غنی از هورنبلند در اطراف لوکوسوم و در داخل مزوسوم است. ملانوسوم همچنین به صورت لکه‌ای داخل لوکوسوم مشاهده می‌شود. برخی بلورهای هورنبلند دارای بافت پوئی کیلوبلاستیک با ادخال‌های متفاوت شامل کوارتز و زیرکن هستند. پلاژیو کلازهای موجود در این بخش در مقادیر کم و با ماکل پلی‌سننتیک اغلب به صورت نیمه‌شکل‌دار و در اندازه ریزبلور تا متوسط بلور هستند. در ملانوسوم، زیرکن به صورت میان‌بارهای بسیار کوچکی درون هورنبلند مشاهده می‌شود (شکل ۳-۳). نبود کوارتز و فلدسپار و غنی‌شدگی از هورنبلند در بخش ملانوسومی میگماتیت‌های مورد بررسی شاهدی بر وجود ذوب‌بخشی در این بخش است (شکل ۳-۳).

### لوکوسوم

لوکوسوم‌های مورد بررسی دارای مجموعه کانی‌های پلاژیو کلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم، تیتانیت، هورنبلند، بیوتیت و نیز در مقادیر فرعی زیرکن، کلریت حاصل از تجزیه هورنبلند و مسکویت است (شکل ۳-۳ و C و D) این بخش دارای بافت‌های دانه‌ای (شکل ۳-۲) و میرمکتیتی است. گاهی برگ‌وارگی در نمونه‌های لوکوسومی توسعه یافته است که حاصل تناوب بخش‌های غنی از پلاژیو کلاز و کوارتز و بخش‌های غنی از آمفیبول است و در نتیجه تأثیر برش وارد بر آنها تشکیل شده است. در پلاژیو کلازها، ادخال‌هایی از بیوتیت، کوارتز، زیرکن و در برخی از بلورهای کوارتز ادخال‌هایی از پلاژیو کلاز دیده می‌شوند (شکل ۳-۲). فراوانی ادخال در کانی‌های اصلی لوکوسوم نشان‌دهنده آن است که آنها در دمای پایین‌تری تشکیل شده و غنی از ادخال‌ها هستند. علاوه بر این، در برخی نمونه‌ها بلورهای کوچک پلاژیو کلاز در داخل بلورهای آمفیبول و تا حدودی بیوتیت مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده تشکیل این کانی‌ها در مراحل ابتدایی شکل‌گیری مذاب است

(شکل ۳-۱).

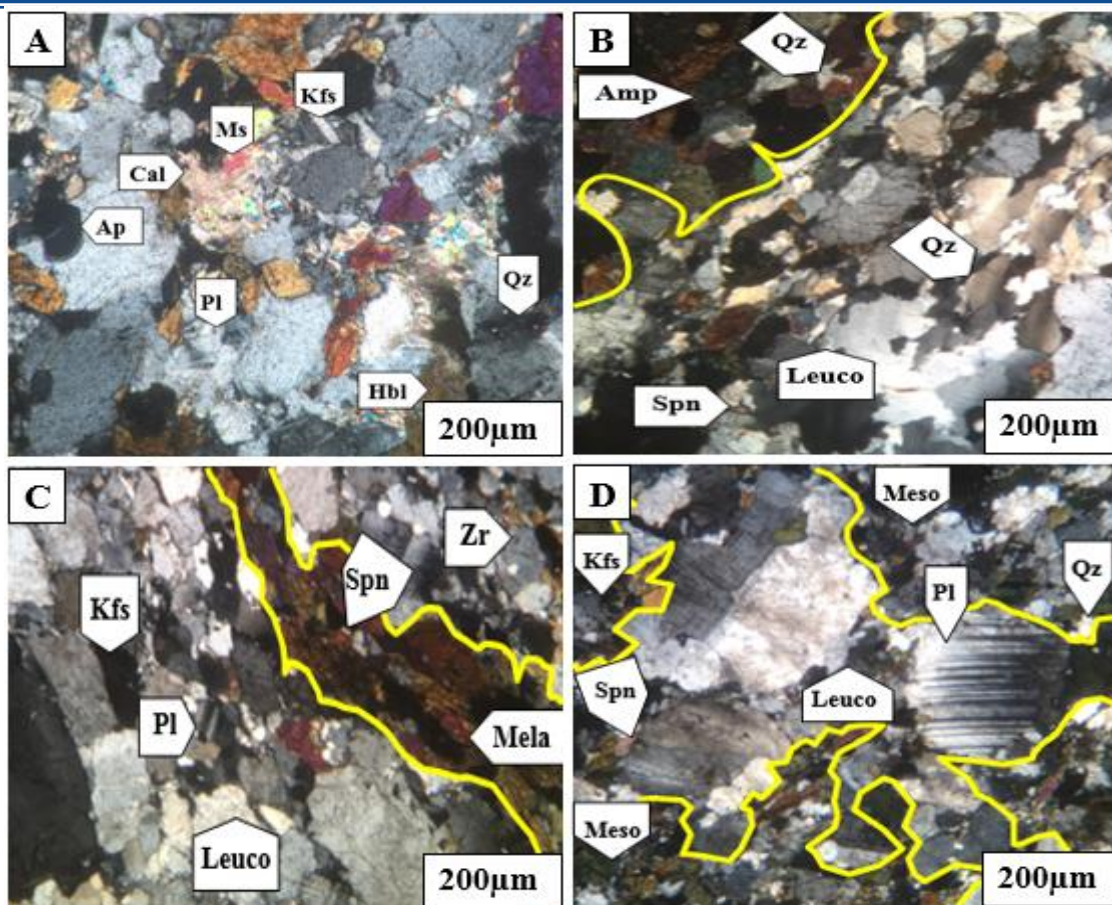
کوارتزهای بی‌شکل با خاموشی موجی، تبلور آنها را از مذاب طی مراحل نهایی تبلور نشان می‌دهد. علاوه بر این، پلاژیو کلازها ماکل پلی‌سننتیک (شکل ۳-۱) و بافت بین دانه‌ای همراه با کوارتز را نشان می‌دهد. علاوه بر این، کوارتزهای بی‌شکل و به شکل حوضچه، مذاب فضای بین دانه‌های پلاژیو کلاز و فلدسپار پتاسیم را اشغال کرده است (شکل ۳-۲ و C). در برخی از نمونه‌ها لوکوسوم‌ها جهت‌دار شده و به موازات ملانوسوم‌ها و مزوسوم‌ها قرار دارند. فلدسپار پتاسیم در مقادیر کم و به صورت بی‌شکل تا نیمه‌شکل‌دار در لوکوسوم حضور دارد. زیرکن نیز در بخش لوکوسومی میگماتیت‌ها به صورت فرعی دیده می‌شود. بلورهای زیرکن به صورت نسبتاً کشیده و دانه‌ریز در داخل کانی‌های پلاژیو کلاز و هورنبلند مشاهده می‌شوند. به طور کلی، لوکوسوم‌ها بر مبنای محل جای‌گیری به سه دسته تقسیم شده‌اند:

نوع اول، لوکوسوم‌های برجا در محل وقوع ذوب‌بخشی هستند که محصول تبلور یک مذاب آناتکسی بوده که پس از وقوع ذوب‌بخشی در محل ذوب باقی مانده‌اند. این لوکوسوم‌ها با ملانوسوم نسبتاً ضخیمی همراه هستند (شکل ۳-۲).

نوع دوم، محصول تبلور یک مذاب آناتکسی بوده که پس از ذوب‌بخشی از محل وقوع ذوب‌بخشی مهاجرت کرده‌اند؛ اما هنوز در محدوده مزوسوم یا محل اولیه قرار دارند. این لوکوسوم‌ها ممکن است ملانوسوم داشته باشند و یا نداشته باشند.

نوع سوم، رگه‌های لوکوکرات هستند که محصول تبلور یک مذاب آناتکسی بوده که از محل اولیه آن مهاجرت کرده و به بخش دیگری از میگماتیت که ممکن است در نزدیکی یا دورتر از آن باشد، نفوذ کرده‌اند.

با توجه به حضور ملانوسوم قابل ملاحظه به همراه لوکوسوم در میگماتیت‌های منطقه قره‌ناز به نظر می‌رسد لوکوسوم، میگماتیت‌های قره‌ناز در دسته اول قرار گرفته و نسبت به سنگ منشأ خود برجا بوده است.



**شکل ۳.** سنگ‌نگاری میگماتیت‌های مافیک منطقه قره‌ناز. A: تشکیل بافت دانه‌ای در بین بلورهای کوارتز، پلاژیوکلاز، فلدسپار پتاسیم و همچنین وجود بلورهای آپاتیت در مقادیر جزئی در نمونه لوکوسوم، وجود منطقه‌بندی در بلورهای پلاژیوکلاز که بیانگر ذوب‌بخشی است (Ashworth and Mclellan, 1985)، B: وجود کوارتزهای بی‌شکل پرکننده فضاهای خالی در بخش لوکوسوم که بیانگر تشکیل در مراحل انتهایی تبلور مذاب است. وجود هورنبلندهای شکل‌دار و جهت‌یافته در ملانوسوم که در حاشیه لوکوسوم قرار گرفته و بیانگر تشکیل مذاب به صورت درجا در میگماتیت‌های قره‌ناز است، C: نمایش بافت نماتوبلاستیک در بخش ملانوسوم در نتیجه جهت‌یافتگی بلورهای آمفیبول و بافت دانه‌ای در بخش لوکوسومی، D: مشاهده اندازه‌های بلوری متفاوت در بخش‌های لوکوسومی و مزوسومی که خود گویای ذوب‌بخشی در میگماتیت‌های مورد بررسی است، XPL. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Leuco: لوکوسوم، Mela: ملانوسوم، Meso: مزوسوم، Ap: آپاتیت، Cal: کلسیت، Ms: مسکویت، Kfs: فلدسپار پتاسیم، Pl: پلاژیوکلاز، Hbl: هورنبلند، Qz: کوارتز، Spn: اسفن، Zr: زیرکن، Amp: آمفیبول).

**Fig. 3.** Petrography of mafic migmatites of Ghareh naz area. A: The formation of granular texture between quartz, plagioclase, k-feldspar crystals and also the presence of apatite crystals in small amounts in the leucosome sample, the presence of zoning in plagioclase crystals which indicates partial melting (Ashworth and Mclellan, 1985), XPL., B: The presence of amorphous quartzes filling the empty spaces in the leucosome, which indicates the formation of melt in the final stages of crystallization, the presence of shaped and oriented hornblende in the melanosome, which is located at the edge of the leucosome, indicates the formation of melt in situ in Ghareh naz migmatite, XPL, C: Representation of nematoblastic texture in the melanosome part as a result of the orientation of amphibole crystals and granular texture in the leucosome part, XPL, and D: Observation of different crystal sizes in the leucosome and mesosome parts, which is indicative of partial melting in the studied migmatites, XPL. Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Leuco: Leucosome, Mela: Melanosome, Meso: Mesosome, Ap: Apatite, Cal: Calcite, Ms: Muscovite, Kfs: K-feldspar, Pl: Plagioclase, Hbl: Hornblende, Qz: Quartz, Spn: Sphene, Zr: Zircon, Amp: Amphibole).

## کانی‌شناسی مودال در لوکوسوم

ویژگی‌ها و مقادیر نسبی کانی‌ها در انواع مختلف لوکوسوم با ترکیب گرانودیوریتی و تونالیتی به شرح زیر هستند:

### لوکوسوم نوع گرانودیوریتی

این نوع لوکوسوم در میگماتیت‌های منطقه مورد بررسی دارای بافت‌های سیمپلکتیت و میرمکتیتی بوده و کانی‌ها دارای مقادیر کوارتز ۱۵ تا ۲۰ درصد، پلاژیوکلاز ۵۰ تا ۵۵ درصد، فلدسپار پتاسیم ۱۰ تا ۱۵ درصد، بیوتیت ۵ تا ۱۰ درصد و مسکویت کمتر از ۵ درصد است. در این لوکوسوم‌ها بلورهای پلاژیوکلاز شکل دار تا نیمه‌شکل دار، کوارتزهای بی‌شکل، بیوتیت‌های نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل و بلورهای نیمه‌شکل دار تا بی‌شکل فلدسپار پتاسیم هستند.

### لوکوسوم نوع تونالیتی

ترکیب کانی‌شناسی لوکوسوم‌های با ترکیب تونالیتی در منطقه قره‌ناز دارای بافت غالب دانه‌ای و مشابه سنگ‌های آذرین بوده و دارای مجموعه کانی‌های پلاژیوکلاز در حدود ۵۰ تا ۵۵ درصد، کوارتز در حدود ۲۰ تا ۲۵ درصد، فلدسپار پتاسیم در حدود ۱۰ تا ۱۵ درصد، آمفیبول در حدود ۵ تا ۱۵ درصد، بیوتیت در حدود ۰ تا ۳ درصد حجمی و یا کمی بیشتر و مسکویت ۰ تا ۲ درصد است.

### بحث و نتایج

با بررسی سنگ‌های حاصل از سنگ‌های آذرین و دگرگونی که دارای ویژگی‌های بافتی و شیمیایی متنوعی هستند، می‌توان روند پیچیده تبلور مواد مذاب را به دست آورد؛ در حالی که بررسی فرایندهایی مانند هسته‌بندی، رشد بلورها و ... از طریق ترکیب شیمیایی بسیار سخت است. بنابراین برای دستیابی به اطلاعات مرتبط با فرایندهای تبلور، سردشدگی و ... لازم است که به بررسی کمی بافت سنگ‌ها پرداخته شود. در سال‌های اخیر تعیین کمیت بافت سنگ مترادف با ریز ساخت است؛ زیرا فرایندهای

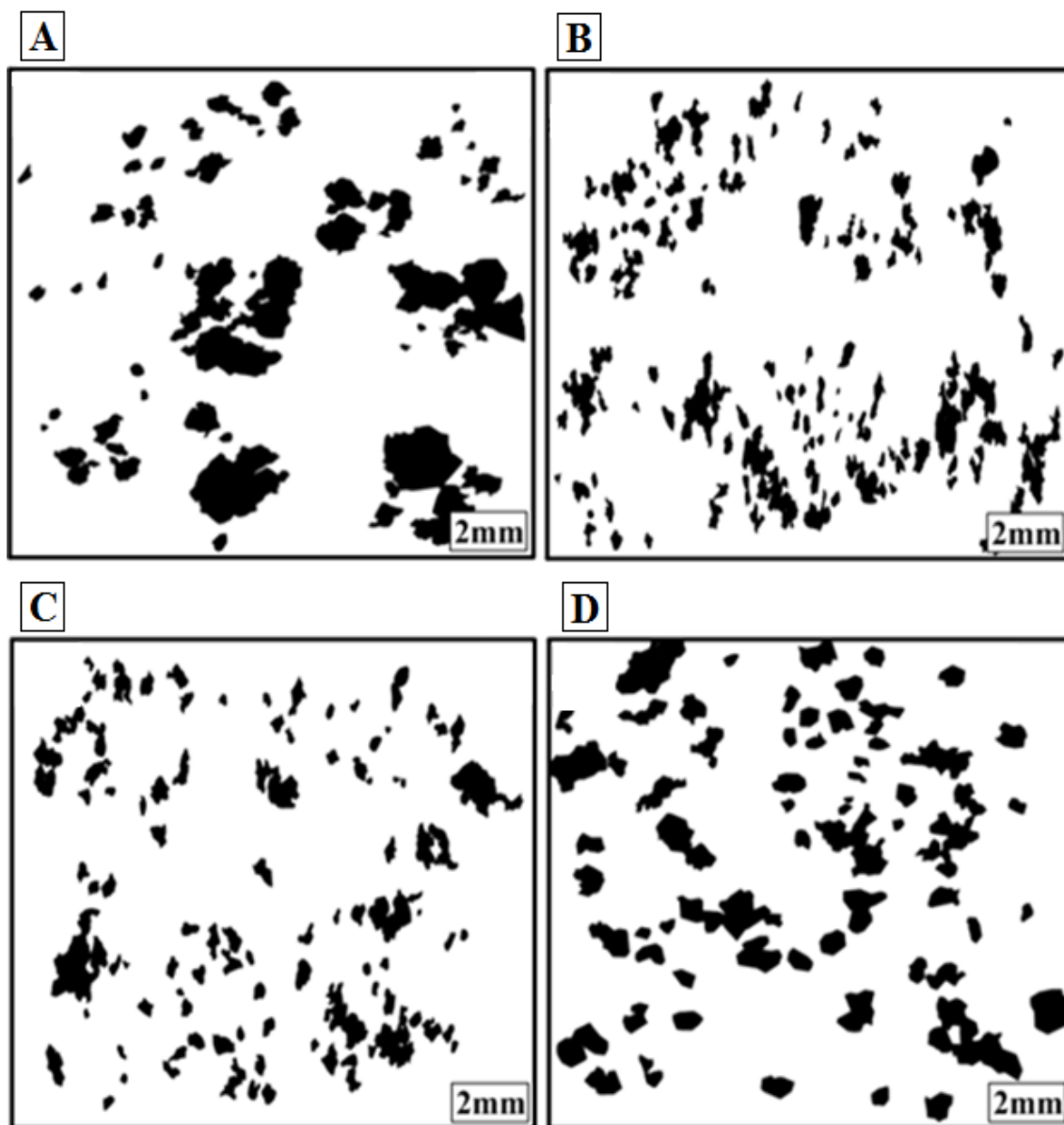
سنگ‌شناختی نظیر هسته‌بندی، رشد و درشت‌شدگی، ترکیب شیمیایی سنگ را تغییر نمی‌دهند (Marsh, 1988; Higgins, 1996). باید توجه داشت که در تفسیر نمودارهای پراکندگی اندازه بلور، باید بررسی‌های دیگری مانند سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی سنگ‌ها و شیمی کانی‌ها را در نظر گرفت. بنابراین می‌توان بیان کرد که تفسیر و توجیه صحیح پراکندگی اندازه بلورها از تلفیق کلیه بررسی‌ها در سنگ‌های مورد نظر به دست می‌آید. به عقیده هیگینز (Higgins, 1998)، این نمودارها بیان‌کننده آخرین مرحله تکامل بافت و تا حدودی بافت ابتدایی سنگ نیز هست. پراکندگی اندازه بلور به بررسی روابط بین اندازه بلور و چگالی تراکمی بلور پرداخته و از طریق نمودارهای به دست آمده، تغییرات در فراوانی و اندازه بلور در ارتباط با یک تابعی از زمان، جریان در سامانه را نشان می‌دهند (Marsh, 1988). این نمودارها تحت تأثیر عواملی مانند اختلاط، درشت‌شدگی، تغییر سرعت تبلور و ... به صورت خطوط شکسته یا خطوط با شیب‌های متفاوت ظاهر می‌شوند.

### پراکندگی اندازه بلور در میگماتیت‌های قره‌ناز

پردازش و تحلیل پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در چهار نمونه لوکوسوم میگماتیت‌های مورد بررسی که بلورهای قابل تشخیص و متمایزی دارند، صورت گرفت. دلیل انتخاب بلورهای پلاژیوکلاز به دلیل فراوانی مدال بالا و سرعت تبلور نسبتاً پایین آنهاست و این اجازه را به آنها می‌دهد که تاریخچه فرایندهای مؤثر در شکل‌گیری را در خود ثبت کنند (Higgins, 1998; Higgins and Roberge, 2003) بنابراین این بلورها توانایی آشکارسازی تاریخچه فرایندهای پیچیده مواد مذاب را مهیا می‌کنند. کیفیت نمودارهای پراکندگی اندازه بلور به طور اساسی به تعداد کل بلورها (اندازه نمونه) بستگی دارد (Gulda, 2006). در بررسی میگماتیت‌های قره‌ناز بعد از تهیه عکس‌های دیجیتالی از بخش لوکوسومی، برای پوشش بهتر، با نرم‌افزار Adobe Illustrator کنار هم چیده شدند و سپس تمام بلورهای پلاژیوکلاز به صورت مجزا رسم و اندازه‌گیری شدند. بعد از آن،

(مختصات نقاط X و Y) در محیط این نرم افزار انجام شد (شکل ۴-A، B، C و D).

تصویرها به نرم افزار JMicroVision v1.2.7 منتقل و اندازه گیری های لازم برای هر ۴ نمونه لوکوسوم (6p، 6m، mh و 7n) شامل طول، عرض، مساحت، زاویه، مکان مرکز بلورها



شکل ۴. تصویری از حاشیه یابی بلورهای پلاژیوکلاز در لوکوسوم منطقه قره ناز با استفاده از نرم افزار Adobe Illustrator و تهیه تصویرهای باینری (سیاه و سفید) جهت فراخوانی آن در نرم افزار Image j برای پردازش تصویر (A: نمونه 7n، B: نمونه 6p، C: نمونه 6m، و D: نمونه mh).

**Fig. 4.** An image of the marginalization of plagioclase crystals in the leucosome of Ghareh naz area using Adobe Illustrator software and preparing binary images (black and white) to be called in Image j software for image processing (A: sample 7n, B: sample 6p, C: sample 6m, and D: sample mh).

(1988)؛ ولی این فرایندها، علاوه بر تغییر در انحناهای نمودارهای پراکندگی، اندازه بلور تغییرات شیمیایی از جمله ناهنجاری منفی Eu و Sr را نیز به وجود می‌آورند (Higgins, 2009). ممکن است یکی از عوامل انحنا و تقعر رو به بالای نمودارهای پراکندگی اندازه بلور در بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی، افت فشار در حین صعود مذاب تفسیر شود (Higgins, 2009). تبلور پلی‌باریک یا تبلور در فشارهای مختلف به عنوان سازوکاری که موجب تغییر در اندازه و تعداد بلورها می‌شود، به وسیله پژوهشگران دیگر (Armienti et al., 1994) نیز معرفی شده است. افت سریع فشار در حین صعود ماگما را نیز می‌توان با شواهد بافت‌های غیرتعادلی نیز تأیید کرد.

چنان‌که در شکل ۵-A و B، جدول ۳ و جدول ۴ تقعر به سمت پایین در جهت اندازه‌های کوچک بلورها نشان‌دهنده درشت‌شدگی (Higgins and Roberge, 2007)؛ و یا به عبارتی بیانگر توقف هسته‌بندی همراه با رشد متوالی بلور است (Lentz and Mcsween, 2000; Higgins and Roberge, 2007; Vanderzwan et al., 2013) (شکل ۵-A مربوط به نمونه 7n و شکل ۵-B مربوط به نمونه 6p است)، میزان تقعر کم در دو نمونه در شکل ۵-A و B را می‌توان به صورت روند تقریباً خطی در نظر گرفت. روند تقریباً خطی در سمت راست هر دو نمودار در شکل ۵-A و B بیانگر رشد و هسته‌بندی متوالی بلورها، فرایند تفریق (جدایش بلور در طول تبلور تفریقی) و انباشت بلور است (Higgins, 2009). چنان‌که در شکل ۵-A و B مشاهده می‌شود، شکستگی بسیار کم ایجاد شده در نمودار پراکندگی اندازه بلور، بیانگر تجمع یا افزایش دانه‌های بزرگ یا به عبارتی ته‌نشینی و جدایش بلورهاست (Lentz and Mcsween, 2000). به عبارت دیگر، فرایند درشت‌شدگی در لوکوسوم میگماتیت‌های مورد بررسی زمانی به وقوع می‌پیوندد که دانه‌های کوچک در مخلوط‌های چند فازی، انرژی آزاد سطحی در واحد حجم بالاتری نسبت به دانه‌های بزرگ دارند و به همین دلیل پایداری کمتری دارند (Higgins, 1998, Higgins, 1998).

با توجه به اینکه بررسی‌ها بر روی تصویرهای مقطع نازک انجام می‌شود، برای مرتفع کردن خطاهای ناشی از این مسئله، کلیه تنظیم‌های نرم‌افزار بر اساس روش هیگینز (Higgins, 1998) وارد شد. سپس داده‌های به دست آمده به نرم‌افزار CSD Corrections 1.40 منتقل شد و با توجه به اطلاعات به دست آمده از فراوانی و اندازه بلورهای پلاژیوکلاز، نمودار نیمه لگاریتمی طبیعی بر اساس روش ارائه‌شده هیگینز (Higgins, 1998) برای ۴ نمونه لوکوسوم از میگماتیت‌های قره‌ناز به طور جداگانه رسم شد (شکل ۵). در این نمودارها، محور چگالی تجمعی،  $\ln(n)(\text{mm}^{-4})$  در مقابل محور اندازه بزرگ‌ترین بعد بلور،  $L(\text{mm})$  برابر ترسیم می‌شود. واحد اندازه‌گیری برای چگالی تجمعی  $\text{mm}^{-4}$  (Marsh, 1988; Higgins, 2006; Bindeman, 2003; Higgins and Roberge, 2003, Higgins and Roberge, 2007; Gulda, 2006; Higgins and Chandrasekharam, 2007; Brugger and Hammer, 2010) و برای اندازه بلورها mm است.

برخی از عوامل مانند درشت‌شدگی بافتی و تغییرات هسته‌بندی و رشد بلورها را تنها با بررسی بافتی سنگ‌ها می‌توان تشخیص داد (Higgins and Roberge, 2007). تنها برخی از این عوامل موجب انحنا و تقعر رو به بالا در نمودارهای پراکندگی اندازه بلور می‌شوند. دقت اندازه‌گیری در روش ترسیمی مورد استفاده به این معنی است که با روش‌های رایج فعلی نمی‌توان بلورهای خیلی ریز را ترسیم کرد. بلورهای ریز تا حد ۰/۰۲ میلی‌متر نیز پردازش شده‌اند؛ ولی با توجه به این که بررسی میکروسکوپی مقاطع با عدسی‌های بزرگ‌تر از ۲/۵ نشان می‌دهد که بلورهای ریزتر از این حد نیز در سنگ‌ها وجود دارند، این فروافتادگی در نمودارهای پراکندگی اندازه بلور را به عدم توانایی در ترسیم بلورهای خیلی ریز نسبت می‌دهیم. تقعر رو به بالا و چندبخشی بودن نمودار حاصل فرایندهای سنگ‌شناختی است که در ادامه به آنها اشاره می‌شود. انباشت و تفریق بلورهای پلاژیوکلاز در لوکوسوم موجب ملایم‌تر شدن شیب نمودار پراکندگی اندازه بلور می‌شود؛ چون بلورهای بزرگ‌تر با سرعت بیشتری ته‌نشین می‌شوند (Marsh, 2010).

**جدول ۳.** داده‌های مربوط به پراکندگی اندازه بلورها در پلاژیوکلاز لوکوسوم منطقه قره‌ناز. داده‌ها برحسب میلی‌متر هستند.

**Table 3.** Data related to crystal size distribution in plagioclase Leucosome of Ghareh naz area. The data are in millimeters.

No.Leuco	Area	Length	Width	No.Leuco	Area	Length	Width
1	83075	463.002	325.512	36	18700	185.648	127.456
2	138300	619.282	388.79	37	8600	123.467	92.865
3	240625	960.619	485.794	38	32625	273.139	164.102
4	190175	636.435	412.9	39	789875	1295.836	887.956
5	257550	637.801	546.055	40	19600	223.347	128.886
6	14375	222.967	89.437	41	141475	483.37	464.919
7	29375	283.590	163.37	42	349850	944.819	642.849
8	29375	257.720	171.291	43	8325	170.079	84.709
9	50725	330.219	268.146	44	37800	295.575	245.132
10	32225	247.074	185.067	45	26600	277.853	170.941
11	19575	226.815	139.358	46	284950	678.509	615.802
12	9775	135.505	116.546	47	438025	1093.378	664.854
13	12250	148.064	133.195	48	8575	144.218	81.948
14	80250	384.406	326.482	49	8075	128.478	89.323
15	9975	131.234	117.662	50	501800	1203.574	734.342
16	146250	630.350	374.573	51	7050	105.417	82.873
17	50275	334.020	247.997	52	28200	194.652	169.875
18	166700	586.135	485.392	53	18475	165.925	148.274
19	127050	535.022	353.608	54	47625	1153.721	626.354
20	174125	764.929	369.621	55	19750	218.572	139.58
21	194850	543.291	529.486	56	397625	129.678	639.161
22	645600	1075.468	877.228	57	230750	674.832	52.693
23	30950	246.122	175.379	58	71500	380.282	291.942
24	82200	502.097	314.859	59	7175	121.272	77.426
25	21325	216.392	183.567	60	80350	363.082	327.134
26	19700	234.094	106.021	61	103350	779.475	254.137
27	20525	246.220	136.491	62	67750	433.678	286.635
28	14650	184.459	113.588	63	28225	225.764	170.437
29	30675	221.934	172.81	64	50125	316.447	235.979
30	12100	143.193	104.817	65	120650	633.954	348.293
31	24750	200.683	157.367	66	61575	344.582	273.553
32	84450	415.233	314.878	67	22875	243.018	136.974
33	34150	307.36	759.00	68	50425	331.283	247.319
34	82675	482.296	271.874	69	29375	257.437	155.737
35	146000	576.015	449.562	70	170150	665.877	514.207



**جدول ۴.** داده‌های مربوط به پراکندگی اندازه بلورها در پلاژیوکلاز لوکوسوم منطقه قره‌ناز. داده‌ها برحسب میلی‌متر هستند.

**Table 4.** Data related to crystal size distribution in plagioclase leucosome of Ghareh naz area. The data are in millimeters.

No.Leuco 6p	Area	Length	Width	No.Leuco 6p	Area	Length	Width
1	4775	86.362	75.234	36	1902	204.02	161.48
2	11250	144.982	113.13	37	1230	148.64	108.87
3	88275	442.41	428.63	38	7207	395.74	312.50
4	19725	196.224	152.34	39	3677	295.74	197.05
5	41475	316.299	254.06	40	3932	317.67	216.82
6	90250	530.375	373.02	41	8490	418.07	358.01
7	22675	267.266	138.82	42	2395	203.57	198.01
8	6600	99.874	88.228	43	2372	241.22	191.41
9	8400	118.828	99.691	44	1116	441.08	437.85
10	19150	202.827	138.81	45	1872	203.95	145.1
11	11542	512.13	479.19	46	1730	245.66	97.674
12	11525	157.234	79.443	47	1750	237.04	445.77
13	12225	162.28	104.34	48	3162	243.27	213.33
14	78900	424.947	315.92	49	1277	207.40	112.00
15	12675	130.192	119.98	50	1307	162.77	98.076
16	17125	187.352	181.61	51	2215	262.01	124.55
17	15700	155.526	129.70	52	1437	179.67	110.21
18	35550	97.111	44.91	53	2752	297.05	129.65
19	14425	166.818	124.67	54	9825	146.02	114.01
20	24500	218.441	144.54	55	8875	110.46	102.88
21	21820	817.903	558.09	56	1785	177.04	158.83
22	22350	265.559	134.08	57	4600	99.16	65.878
23	17450	165.035	152.51	58	1530	175.56	127.14
24	6025	116.457	73.553	59	2805	313.35	174.98
25	49150	334.277	238.5	60	1100	489.49	391.15
26	12400	205.441	91.589	61	4720	318.57	238.20
27	13152	540.24	501.99	62	1845	206.99	144.72
28	17625	194.907	158.04	63	6650	124.38	66.541
29	11700	151.617	113.63	64	1116	663.36	298.64
30	17675	216.259	138.84	65	1467	195.17	134.25
31	18500	158.841	148.80	66	7425	145.34	75.717
32	4825	96.312	71.825	67	8650	143.03	87.037
33	7675	128.147	77.337	68	2082	215.16	139.96
34	5925	101.863	90.958	69	7200	103.68	89.053
35	30000	259.34	185.74	70	9300	173.56	68.218

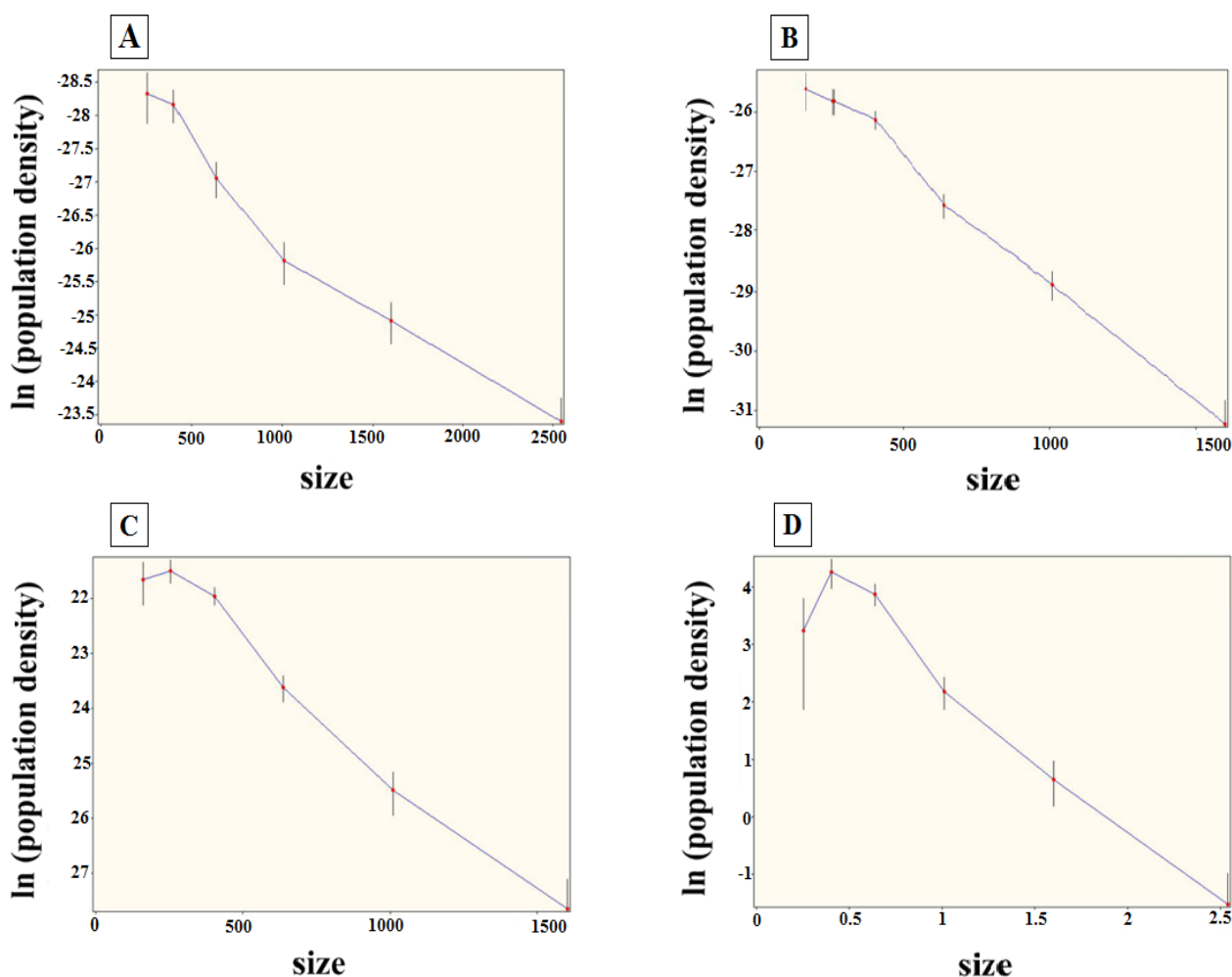
ادامه جدول ۴. داده‌های مربوط به پراکندگی اندازه بلورها در پلاژیوکلاز لوکوسوم منطقه قره‌ناز. داده‌ها برحسب میلی‌متر هستند.

**Table 4 (Continued).** Data related to crystal size distribution in plagioclase leucosome of Ghareh naz area. The data are in millimeters.

No.Leuco 6p	Area	Length	Width	No.Leuco 6p	Area	Length	Width
94	155375	680.356	499.084	71	36825	406.724	179.573
95	10075	128.994	102.288	72	2500	70.501	49.825
96	42500	299.201	229.935	73	475	90.354	57.147
97	29200	261.579	171.722	74	4650	84.041	71.6
98	9450	148.385	95.531	75	5400	128.867	47.506
99	43425	335.165	231.297	76	54400	457.75	193.391
100	12950	162.085	111.643	77	20525	204.076	143.045
101	5900	92.122	89.87	78	13075	156.997	139.283
102	44025	283.657	260.817	79	96975	660.75	462.421
103	14775	172.48	157.261	80	81675	482.137	283.335
104	2600	80.904	42.634	81	12950	184.228	97.701
105	24900	283.295	177.027	82	11075	162.057	94.807
106	6225	125.355	77.53	83	33975	349.649	200.464
107	96450	425.1755	324.752	84	65200	425.301	239.339
108	14525	171.331	126.369	85	99475	557.394	321.808
109	27800	319.821	147.385	86	35625	275.32	223.849
110	15825	176.328	131.873	87	25875	236.046	197.828
111	16775	213.628	123.47	88	20100	180.303	162.504
112	10450	182.02	85.431	89	16525	209.925	129.447
113	61025	417.48	241.192	90	33950	332.079	168.792
114	8200	118.714	95.742	91	64675	543.692	192.577
115	16050	239.7	90.513	92	77725	397.648	281.042
116	21850	242.677	135.761	93	35300	247.986	210.816
117	28350	262.5	169.133				
118	16775	187.317	123.976				
119	6000	103.641	70.058				
120	50200	331.362	258.04				
121	4450	92.265	69.515				
122	2975	77.636	42.498				
123	33600	286.306	165.372				
124	75275	473.627	381.144				

لیکوئیدوس آن فاز قرار گرفته و در این حالت سرعت هسته‌بندی پایین؛ اما سرعت رشد برای بلورهای بزرگ‌تر از شعاع بحرانی بالاست (Higgins, 1998, Higgins, 1999). چنان‌که در شکل ۵-C و D، جدول ۵ و جدول ۶ مشاهده می‌شود، تقعری به سمت پایین در سمت چپ نمودار (در جهت اندازه‌های کوچک بلور) وجود دارد.

در این حالت برای به حداقل رسیدن انرژی در سامانه، اندازه میانگین دانه‌ها افزایش پیدا کرده و بلورهای کوچک‌تر از اندازه معینی (شعاع بحرانی) دچار انحلال شده و مواد حاصل شده برای رشد بلورهای بزرگ‌تر استفاده می‌شود و بنابراین بلورهای بزرگ‌تر به خرج بلورهای کوچک‌تر رشد می‌کنند (Higgins, 1998, Higgins, 1999). در واقع فرایند درشت‌شدگی هنگامی صورت می‌گیرد که بلورهای یک فاز برای مدتی نزدیک به



شکل ۵. A, B, C, D. نمودارهای لگاریتمی چگالی تجمعی در برابر اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در لوکوسوم منطقه قره‌ناز، بر حسب میلی‌متر (شکل ۵-A مربوط به نمونه 7n، شکل ۵-B مربوط به نمونه 6p، شکل ۵-C مربوط به نمونه 6m، شکل ۵-D مربوط به نمونه mh است).

Fig. 5. A, B, C, D. Logarithmic diagrams of the cumulative density against the size of plagioclase crystals in the leucosome of Ghareh naz area, in millimeters (Fig. 5.A for sample 7n, Fig. 5.B It corresponds to the sample 6p, Fig. 5.C corresponds to the sample 6m, Fig. 5.D corresponds to the sample mh).

**جدول ۵.** داده‌های مربوط به پراکندگی اندازه بلورها (CSD) در پلاژیوکلاز لوکوسوم منطقه قره‌ناز. داده‌ها برحسب میلی‌متر هستند.

**Table 5.** Data related to crystal size distribution (CSD) in plagioclase Leucosome of Ghareh naz area. The data are in millimeters.

No.Leuco 6m	Area	Length	Width	No.Leuco 6m	Area	Length	Width	No.Leuco 6m	Area	Length	Width
1	2400	7	53.069	3	16950	226.58	131.90	69	3370	267.76	171.80
2	2882	3	145.451	3	6625	90.816	88.890	70	1497	172.23	127.44
3	1450	2	126.768	3	12625	194.15	87.230	71	2445	276.15	212.68
4	2700	2	168.503	3	8775	184.02	66.554	72	4700	111.52	79.831
5	2305	2	149.546	3	122975	516.13	426.22	73	1502	162.77	130.38
6	5197	4	219.153	4	17900	174.50	170.34	74	2630	299.52	149.86
7	6925	1	77.144	4	7275	124.05	89.014	75	1477	219.16	99.819
8	1930	1	170.557	4	12025	166.43	105.20	76	6375	109.65	92.424
9	7350	1	70.020	4	28350	245.64	199.10	77	6775	138.27	63.959
10	4992	4	223.500	4	9350	118.68	102.89	78	1080	154.76	96.041
11	9175	1	90.127	4	8625	106.75	96.321	79	4460	393.84	174.42
12	7800	1	85.669	4	7575	119.14	72.316	80	1735	179.15	524.55
13	3127	3	180.334	4	13000	170.60	102.74	81	1675	165.58	153.99
14	9125	1	97.268	4	49575	395.26	192.24	82	1607	215.18	100.46
15	6775	9	88.913	4	70900	466.95	296.17	83	1622	182.89	122.73
16	1615	1	134.814	5	7950	148.42	109.50	84	1317	165.24	131.46
17	1129	5	317.141	5	21875	231.88	130.01	85	1125	157.44	101.57
18	3075	7	47.690	5	33300	315.15	204.90	86	2065	203.30	123.52
19	1232	1	120.023	5	27325	253.42	179.97	87	2466	881.55	553.28
20	9050	1	109.575	5	126475	606.86	379.02	88	3900	85.211	58.998
21	1624	8	371.021	5	7050	117.26	75.210	89	1370	194.74	93.039
22	2990	3	163.493	5	19500	185.28	148.20	90	3575	70.076	59.288
23	1317	1	125.453	5	14975	184.49	124.96	91	2225	210.76	155.22
24	1462	1	135.404	5	14700	156.27	126.26	92	3170	229.37	209.52
25	2242	2	150.891	5	15700	177.43	130.07	93	9700	174.41	79.715
26	2117	2	128.734	6	41875	367.06	233.62	94	4535	322.33	209.77
27	6700	1	93.950	6	8300	127.44	85.712	95	3492	328.42	198..59
28	3050	8	65.531	6	31050	268.93	175.82	96	7000	120.61	80.227
29	3650	9	52.277	6	20525	214.70	152.05	97	3165	328.55	157.33
30	4400	8	66.418	6	14275	218.22	98.873	98	1070	145.25	128.02
31	2325	2	149.680	6	7425	142.12	85..23	99	4315	258.68	238.02
32	1337	1	116.959	6	6850	142.57	62.046				
33	5102	4	21.173	6	25250	267.98	142.80				
34	5367	3	235.721	6	15900	213.19	131.55				

**جدول ۶.** داده‌های مربوط به پراکندگی اندازه بلورها (CSD) در پلاژیوکلاز لوکوسوم منطقه قره‌ناز. داده‌ها برحسب میلی‌متر هستند.

**Table 6.** Data related to crystal size distribution (CSD) in plagioclase leucosome of Ghareh naz area. The data are in millimeters.

No.Leuco mh	Area	Length	Width	No.Leuco mh	Area	Length	Width
1	0.017	0.198	0.148	38	0.026	0.264	0.142
2	0.017	0.177	0.133	39	0.040	0.330	0.214
3	0.088	0.485	0.311	40	0.133	0.492	0.352
4	0.285	1.136	0.527	41	0.080	0.579	0.242
5	0.106	0.439	0.326	42	0.046	0.300	0.243
6	0.057	0.307	0.294	43	0.063	0.315	0.293
7	0.094	0.476	0.362	44	0.051	0.281	0.263
8	0.117	0.768	0.269	45	0.061	0.523	0.201
9	0.127	0.647	0.373	46	0.039	0.342	0.157
10	0.049	0.282	0.248	47	0.032	0.274	0.158
11	0.032	0.221	0.179	48	0.166	0.561	0.372
12	0.077	0.366	0.283	49	0.221	0.918	0.483
13	0.015	0.159	0.124	50	0.136	0.717	0.376
14	0.232	0.825	0.438	51	0.101	0.132	0.114
15	0.032	0.240	0.182	52	0.036	0.275	0.225
16	0.021	0.194	0.119	53	0.048	0.281	0.259
17	0.049	0.347	0.219	54	0.019	0.210	0.137
18	0.028	0.281	0.134	55	0.005	0.109	0.059
19	0.142	0.463	0.451	56	0.011	0.176	0.085
20	0.035	0.277	0.182	57	0.025	0.222	0.171
21	0.059	0.381	0.241	58	0.227	0.791	0.602
22	0.044	0.287	0.248	59	0.013	0.200	0.870
23	0.056	0.321	0.298	60	0.016	0.179	0.114
24	0.029	0.232	0.177	61	0.074	0.456	0.361
25	0.054	0.342	0.227	62	0.045	0.312	0.264
26	0.015	0.177	0.149	63	0.022	0.216	0.156
27	0.021	0.197	0.183	64	0.032	0.277	0.158
28	0.068	0.371	0.289	65	0.034	0.257	0.207
29	0.103	0.472	0.353	66	0.022	0.194	0.140
30	0.111	0.473	0.425	67	0.014	0.151	0.137
31	0.053	0.305	0.231	68	0.054	0.341	0.206
32	0.038	0.274	0.160	69	0.152	0.670	0.312
33	0.247	1.037	0.493	70	0.062	0.412	0.297
34	0.011	0.451	0.369				
35	0.050	0.302	0.209				
36	0.013	0.191	0.123				
37	0.042	0.286	0.217				

### نتیجه گیری

میگماتیت‌های روستای قره‌ناز در نتیجه ذوب بخشی آمفیبولیت‌ها به وجود می‌آیند. بر اساس جمع‌بندی اطلاعات به دست آمده از بررسی‌های صحرایی، سنگ‌نگاری و نتایج بررسی‌های پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز در میگماتیت‌های مافیک نتایج زیر به دست آمده‌اند:

۱) سهم حجمی متفاوت بلورهای کوارتز و مافیک سبب شده است تا ترکیب بخش‌های لوکوسومی در میگماتیت‌های مورد بررسی از گرانودیوریت تا توئالیت تغییر کند.

۲) حجم متفاوت مذاب در میگماتیت‌های مافیک مورد بررسی سبب تشکیل ساختارهای متنوع میگماتیتهای در دو گروه اصلی متاکستی و دیاتکستی شده است.

۳) بافت غالب در بخش‌های مزوسومی شامل پورفیروبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و نماتوبلاستیک بوده و ملانوسومی شامل نماتوبلاستیک، زینوبلاستیک، گرانوبلاستیک و جهت‌دار و بخش لوکوسومی دارای بافت دانه‌ای، سیمپلکتیت و میرمکتی است.

۴) حضور ملانوسوم به همراه لوکوسوم در میگماتیت‌های منطقه قره‌ناز بیانگر برج بودن این میگماتیت‌ها نسبت به سنگ منشأ است. ۵) نمودارهای پراکندگی اندازه بلور برای پلاژیوکلازهای سنگ‌های مورد بررسی نشان می‌دهد که:

- روند تقریباً خطی در سمت راست برخی از نمودارها نشان‌دهنده آن است که رشد و هسته‌بندی متوالی بلورها در برخی نمونه‌ها نتیجه فرایند تفریق (جدایش بلور در طول تبلور تفریقی) و انباشت بلور است.

- تقعر به سمت پایین در جهت اندازه‌های کوچک بلورها ناشی از دو علت است: الف) توقف هسته‌بندی و تداوم رشد بلور که در این صورت، بلورهای کوچک‌تر در جهت بازه‌های حاوی بلورهای بزرگ‌تر حرکت می‌کنند. ب) جذب بلورهای کوچک برای متعادل کردن رشد بلورهای بزرگ موجود. به عبارت دیگر فرایند درشت‌شدگی هنگامی صورت می‌گیرد که بلورهای یک فاز برای

این حالت در نمودارهای CSD نشان‌دهنده درشت‌شدگی بلور است (Lentz and Mcsween, 2000) (شکل ۵-C) مربوط به نمونه 6m و شکل ۵-D مربوط به نمونه mh است. لنتز و مکویین (Lentz and Mcsween, 2000)، تقعر به سمت پایین در نمودارهای CSD را ناشی از دو علت می‌دانند: الف) توقف هسته‌بندی و تداوم رشد بلور که در این صورت، بلورهای کوچک‌تر در جهت بازه‌های حاوی بلورهای بزرگ‌تر حرکت می‌کنند و ب) جذب بلورهای کوچک برای متعادل کردن رشد بلورهای بزرگ موجود. درشت‌شدگی بافتی بلورها تغییراتی در شیب نمودار پراکندگی اندازه بلور در نمودار CSD ایجاد می‌کند و به طور معمول موجب فروافتادگی و خمیدگی بخش چپ نمودارها می‌شود که این فروافتادگی در اثر کم‌شدن بلورهای کوچک ایجاد شده است (شکل ۵) و بخش سمت راست نمودار به طور معمول خطی و مستقیم می‌ماند (Higgins, 1998). با پیشرفت فرایند درشت‌شدگی، شیب سمت راست نمودار کاهش خواهد داشت (شکل ۵) (Higgins, 1998).

نمودارهای پراکندگی اندازه بلور در نمونه‌های لوکوسومی مورد بررسی نشان می‌دهد که بلورهای درشت‌تر (بخش انتهایی نمودار خمیده سمت راست) به مذابی تعلق دارد که در اعماق بیشتر و یا در محیطی آرام‌تر سرد شده است؛ ولی بخش ابتدایی نمودار در سمت چپ در مناطق سطحی‌تر و با سرعت زیادتری متبلور شده است. بر پایه بررسی‌های انجام شده بر روی بلورهای پلاژیوکلاز موجود در لوکوسوم میگماتیت‌ها مشاهده شد که بلورهای پلاژیوکلاز دارای یک روند CSD غیرخطی هستند که بیانگر دو مرحله رشد با سرعت‌های متفاوت برای این بلورهاست. مراحل ابتدایی تبلور، پلاژیوکلازها به صورت درشت‌بلور با تعداد نطفه‌های کم، شیب زیاد و سرعت رشد بالا بوده (شکل ۵-C و D) و در مرحله بعد، پلاژیوکلازها کوچک‌تر با نرخ نطفه‌بندی زیاد، شیب کم و سرعت رشد پایین (شکل ۵-A و B) توسعه یافته‌اند. بلورهای پلاژیوکلاز با تعداد فراوان و اندازه نسبتاً درشت آنها بیانگر سرد شدن کند و نطفه‌بندی کم آنهاست.

### تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافی توسط نویسندگان بیان نشده است.

مدتی نزدیک به لیکوئیدوس آن فاز قرار گرفته است و در این حالت سرعت هسته‌بندی پایین؛ اما سرعت رشد برای بلورهای بزرگ تر از شعاع بحرانی بالاست.

1. CSD
2. Population density
3. polybsric crystallization

## References

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1-20.  
<https://doi.org/10.2475/ajs.304.1.1>
- Armienti, P., Pareschi, M.T., Innocenti, F. and Pompilio, M., 1994. Effects of magma storage and ascent on the kinetics of crystal growth. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 115(1): 402-414.  
<https://doi.org/10.1007/BF00320974>
- Ashworth, J.R. and McLellan, E.L., 1985. *Textures, Migmatites*. Springer, Boston, pp. 180-203.  
[https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2347-1\\_5](https://doi.org/10.1007/978-1-4613-2347-1_5)
- Babakhani, A. and Ghalamghash, J., 2001. Geological map of Takht Soleiman, Scale 1:100000. Geological Survey of Iran.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards the Paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210-265.  
<https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Bindeman, I.N., 2003. Crystal sizes in evolving silicic magma chambers. *Geology*, 31(4): 367-370.  
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2003\)031<0367:CSIESM>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2003)031<0367:CSIESM>2.0.CO;2)
- Brugger, C.R. and Hammer, J.E., 2010. Crystal size distribution analysis of plagioclase in experimentally decompressed hydrous rhyodacite magma. *Earth and Planetary Science Letters*, 300(3-4): 246-254.  
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2010.09.046>
- Cashman, K.V., 1993. Relationship between crystallization and cooling rate - insight from textural studies of dikes. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 126-142.  
<https://doi.org/10.1007/BF00320836>
- Cashman, K.Y. and Ferry, J.M., 1988. Crystal size distributions (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization: III. Metamorphic crystallization. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(1): 401-415.  
<https://doi.org/10.1007/BF00371933>
- Cashman, K.V. and Marsh, B.D., 1988. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallisation II. Makaopuhi lava lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(1): 292-305.  
<https://doi.org/10.1007/BF00375363>
- Daniel, C.G. and Spear, F., 1998. Three - Dimensional patterns of garnet nucleation and growth. *Geology*, 26(6): 503-506.  
[https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1998\)026<0503:TDPOGN>2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1998)026<0503:TDPOGN>2.3.CO;2)
- Gilg, H.A., Boni, M., Balassone, G., Allen, C.R., Banks, D. and Moore, F., 2006. Marble-hosted sulfide ores in the Anguran Zn-(Pb-Ag) deposit, NW Iran: interaction of sedimentary brines with a metamorphic core complex. *Mineralium Deposita*, 41(1): 1-16.  
<https://doi.org/10.1007/s00126-005-0035-5>
- Gray, N.C., 1968. Pure shear and simple shear deformation of inhomogeneous viscous fluids, *Tectonophysics*, 5(4): 295-302.  
[https://doi.org/10.1016/0040-1951\(68\)90033-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(68)90033-4)
- Gulda, G.A.R., 2006. Crystal size Distribution Derived from 3D Dataset: Sample size Uncertainties, *Journal of petrology*, 47(6): 1245-1254.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egl010>
- Hajialioghli, R., Moazzen, M., Droop, G.T.R., Oberhansli, R., Bousquet, R., Jahangiri, A. and Ziemann, M., 2007. Serpentine polymorphs and P-T evolution of metaperidotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran. *Mineralogical Magazine*, 71(2): 203-222.  
<https://doi.org/10.1180/minmag.2007.071.2.203>
- Hassanzadeh, J., Stockli, D.F., Horton, B.K., Axen, G.J., Stockli, L.D., Grove, M., Schmitt, A.K. and Walker J.D., 2008. U-Pb zircon geochronology of late Neoproterozoic-Early Cambrian granitoids in Iran: implications for paleogeography, magmatism, and exhumation history of Iranian basement". *Tectonophysics*, 451(1-4): 71-96.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.062>
- Higgins, M.D., 1996. Magma dynamics beneath Kameni volcano, Greece, as revealed by crystal size and shape measurements. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 70(1-2): 37-48.  
[https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00045-3](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00045-3)
- Higgins, M.D., 1998. Origin of anorthosite by textural coarsening: quantitative measurements of a natural sequence of textural development. *Journal of Petrology*, 39(7): 1307-1325.  
<https://doi.org/10.1093/petroj/39.7.1307>
- Higgins, M.D., 1999. Origin of megacrysts in granitoids by textural coarsening: A Crystal Size Distribution (CSD) Study of Microcline in the Cathedral Peak Granodiorite, Sierra Nevada,



- California. In: A. Castro, C. Fernández and J. Louis Vigneresse (Editors), *Understanding Granites: Integrating Modern and Classical Techniques*. Geological Society, London, Special Publication, pp. 207–219.  
<https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1999.168.01.14>
- Higgins, M.D., 2006. *Quantitative Textural Measurements in Igneous and Metamorphic Petrology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK. pp. 276.  
<https://doi.org/10.1017/CBO9780511535574>
- Higgins, M.D., 2009. The Cascadia megathrust earthquake of 1700 may have rejuvenated an isolated basalt volcano in western Canada: Age and petrographic evidence. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 179(1–2): 149–156.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2008.10.016>
- Higgins, M.D. and Chandrasekharam, D., 2007. Nature of sub-volcanic magma chamber, deccan province, India: Evidence from quantitative textural analysis of plagioclase megacrysts in the Giant plagioclase basalts. *Journal of Petrology*, 48(5): 885–900.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egm005>
- Higgins, M.D. and Roberge, J., 2003. Crystal size distribution (CSD) of plagioclase and amphibole from Soufriere Hills volcano, Montserrat: Evidence for dynamic crystallization / textural coarsening cycles. *Journal of Petrology*, 44(8): 1401–1411.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/44.8.1401>
- Higgins, M.D. and Roberge, J., 2007. Three magmatic components in the 1973 eruption of Eldfell volcano, Iceland: Evidence from plagioclase crystal size distribution (CSD) and geochemistry. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 161(3): 247–260.  
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2006.12.002>
- Kaneko, Y., Tsunogae, T. and Miaro, T., 2005. Crystal-size distributions of garnets in metapelites from the northeastern Bushveld contact aureole, South Africa. *American Mineralogist*, 90(8–9): 1422–1433.  
<https://doi.org/10.2138/am.2005.1666>
- Lentz, R.C.F. and Mcsween, Y.H., 2000. Crystallization of the basaltic Shergottites: Insights from crystal size distribution (CSD) analysis of pyroxenes. *Meteoritics and Planetary science* 35(5): 919–927.  
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2000.tb01481.x>
- 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(1): 277–291.  
<https://doi.org/10.1007/BF00375362>
- Moazzen, M. and Modjarrad M., 2005. Contact metamorphism and crystal size distribution studies in the Shivar aureole, NW Iran. *Geological Journal*, 40(5): 499–517.  
<https://doi.org/10.1002/gj.1025>
- Muller, T., Baumgartner, L.P.C.T. and Bowman, J.R., 2009. Crystal Size Distribution of Periclase in Contact Metamorphic Dolomite Marbles from the Southern Adamello Massif, Italy. *Journal of Petrology*, 50(3): 451–465.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egp007>
- O'Driscoll, B., Donaldson, C.H., Troll, V.R., Jerram, D.A. and Emeleus, C.H., 2007. An Origin for Harrisitic and Granular Olivine in the Rum Layered Suite, NW Scotland: a Crystal Size Distribution Study. in *Journal of Petrology*, 48(2): 253–270.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/egl059>
- Shafaii Moghadam, H., Ghorbani, G., Zaki Khedr, M., Fazlnia, N., Chiaradia, M., Eyuboglu, Y., Santosh, M., Galindo Francisco, C., Lopez Martinez, M., Gourgaud, A. and Arai, M., 2013. Late Miocene K-rich volcanism in the Eslamieh Peninsula (Saray), NW Iran: Implications for geodynamic evolution of the Turkish–Iranian High Plateau. *Gondwana Research*, 26(3–4): 1028–1050.  
<http://dx.doi.org/10.1016/j.gr.2013.09.015>
- Vanderzwan, F.M., Chadwick, P.C. and Troll, V.R., 2013. Textural history of recent basaltic-andesites and plutonic inclusion from merapi volcano. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 166(1): 43–63.  
<https://doi.org/10.1007/s00410-013-0864-7>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviation for names of rock – forming. *Minerals. American Mineralogist*, 95(1): 185–187.  
<http://dx.doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Zieg, M.J. and Marsh, B.D., 2002. Crystal size distributions and scaling laws in the quantification of the igneous textures. *Journal of Petrology*, 43(1): 85–101.  
<https://doi.org/10.1093/petrology/43.1.85>