



RESEARCH ARTICLE

doi 10.22067/econg.2026.1165



Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution

Mahdiah Bamorovat ¹ , Sara Dargahi ^{2*} , Mohsen Arvin ³ , Alireza Shaker ⁴ , Jamie J Wilkinson ⁵ , Edgar A Cortes-Calderon ⁶ , Majid Aminzadeh ⁷

¹ Ph.D. Student, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

² Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³ Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁴ Assistant Professor, Department of Geology, Faculty of Sciences, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

⁵ Professor, Department of Earth Science and Engineering, Faculty of Engineering, Imperial College London, London, United Kingdom

⁶ Researcher, Imaging and Analysis Centre, Natural History Museum, London, United Kingdom

⁷ Head of Geology and Drainage Department, Sarcheshmeh copper complex, National Iranian Copper Industries Company, Iran

ARTICLE INFO

Article History

Received: 21 November 2025

Revised: 09 July 2026

Accepted: 14 July 2026

Keywords

Monzonitic intrusive body

Seridune porphyry copper deposit

Crystal size distribution

Nucleation rate

Residence time

Plagioclase

*Corresponding author

Sara Dargahi

✉ s.dargahi@uk.ac.ir

ABSTRACT

The Seridune porphyry copper deposit is located in the central part of the Kerman porphyry copper belt, Iran, three kilometers northeast of the Sarcheshmeh copper mine. This research focuses on reconstructing magmatic crystallization processes through a qualitative and quantitative study of plagioclase crystals in the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit using petrology, mineral chemistry, and crystal size distribution studies. This unit rock, which ranges in composition from monzonite to quartz monzonite, comprises plagioclase, quartz, alkali feldspar, biotite, amphibole, as well as accessory minerals such as magnetite, apatite and zircon. The composition of the plagioclase crystals studied varies from labradorite to albite ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$, $n = 89$). Based on crystal size distribution (CSD) studies, the semi-logarithmic patterns of the studied plagioclase crystals indicate multi-stage crystallization of magma at varying depths. Also, the presence of sieve texture, oscillatory zoning, and CSD data indicate decompression and injection of mafic pulses in a dynamic system. Assuming a constant growth rate and nucleation density (n_0), the nucleation rate of plagioclase crystals was determined to be between $64 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ and $66 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$. Also, based on the 3D crystal size distribution data and using a growth rate ($G = 10^{-10}$), the residence time of plagioclase crystals was calculated to be between 56 and 63 years. The calculated residence time, along with excess aluminum in the plagioclase crystals are consistent with the emplacement of the magma at shallow crustal levels and its high potential for the exsolution of fluids; although the monzonite body is not considered to be the responsible phase for mineralization in the Seridune porphyry copper deposit.

How to cite this article

Bamorovat, M., Dargahi, S., Arvin, M., Shaker, A., Wilkinson, J.J., Cortes-Calderon, E.A. and Aminzadeh, M., 2026. Mineral Chemistry and Crystal Size Distribution of Plagioclases in the Monzonitic Intrusive Body of the Seridune Porphyry Copper Deposit, Iran: Emphasis on Processes Controlling Magma Evolution. Journal of Economic Geology, 18(2): 33–59. (in Persian with English abstract) <https://doi.org/10.22067/econg.2026.1165>



©2026 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 Urumieh–Dokhtar Magmatic Assemblage (UDMA) in the Kerman province contains numerous porphyry copper deposits, known collectively as the Kerman porphyry copper belt (KPCB; Fig. 1A) (Ghorbani, 2013). This belt, the primary source of copper ore in Iran, is primarily composed of folded and faulted early Tertiary volcano-sedimentary rocks (Aghazadeh et al., 2015). The Seridune porphyry copper deposit (SPCD) is located in the central KPCB within the UDMA (Fig. 1A). It is hosted by Eocene volcanic rocks cut by hypabyssal felsic intrusions and all of the rock units have undergone variably intense hydrothermal alteration (Barzgar, 2007). Phyllic, argillic and advanced argillic alterations are widely exposed at the surface, whereas potassic alteration is concentrated at depth and is only accessible through drill core samples. Porphyry copper deposits form under the influence of dynamic processes governing a magma reservoir within the crust. These processes influence the magma's potential for metal enrichment and fluid dynamics (Park et al., 2021). Consequently, examining the physical and chemical evolution of minerals in igneous rocks is crucial for understanding the processes and dynamics of magmatic systems (Blundy and Cashman, 2008; Ellis et al., 2023) that lead to the formation of these deposits. Magmatic processes such as fractional melting, partial melting, fractional crystallization, and magma mixing (Higgins et al., 2015), which directly affect crystal nucleation and growth, are important petrological processes (Deb and Bhattacharyya, 2018). These processes do not change the bulk-rock chemical composition. Then, they cannot be constrained through chemical and isotopic studies of rocks (Higgins and Roberge, 2007). Instead, these processes have to be investigated through textural studies of rocks and crystal-scale mineral chemistry. Crystal size distribution (CSD) is a quantitative petrographic method which can provide important insights into the conditions within magma reservoirs or crystal mushes, including the rates of nucleation and growth, fractionation, coarsening, and mixing processes (Ngonge et al., 2013; Klein et al., 2017). This research aims to constrain the magmatic processes that governed the evolution of the monzonitic

intrusive body in the Seridune porphyry copper deposit. This aim is achieved through the integration of petrographic observations with the determination of three-dimensional crystal shapes, Crystal Size Distribution analysis, and mineral chemistry of plagioclase crystals. This implications of the quantitative textural analyses on the studied samples are that they enable a more comprehensive understanding of the kinetic evolutionary history and the different processes—such as magma mixing and textural coarsening—that contributed to the formation of this intrusive body.

Material and methods

To identify the rock units and structures in the Seridune area, extensive field studies were conducted. For the present study, samples from the monzonite body of the Seridune porphyry copper deposit (Fig. 1B) exhibiting the least alteration were selected for preparation into polished thin sections. These sections were examined using a polarizing microscope to identify plagioclase crystals suitable for chemical microanalysis. Plagioclase compositions were determined using a JEOL 8530 F electron probe microanalyzer (EPMA) equipped with five tunable Wavelength Dispersive Spectrometers (WDS) hosted at the Imaging and Analysis Centre in the Natural History Museum, London. Operating conditions were 15 kV acceleration voltage, 20 nA beam current and a defocused beam of 10 μm diameter. On-peak counting times were set to 20 - 30 s for all elements and the background was acquired before and after the peak position for 10 - 15 s. Sodium, and potassium were analyzed first to reduce alkali migration due to prolonged electron dose. Standards were albite for Si $\text{K}\alpha$ and Na $\text{K}\alpha$, corundum for Al $\text{K}\alpha$, wollastonite for Ca $\text{K}\alpha$, anorthoclase for K $\text{K}\alpha$, fayalite for Fe $\text{K}\alpha$, forsterite for Mg $\text{K}\alpha$, celestine for Sr $\text{K}\alpha$, barite for Ba $\text{K}\alpha$, rutile for Ti $\text{K}\alpha$ and Mn-titanate for Mn $\text{K}\alpha$. An internal secondary standard, plagioclase from the Isle of Rhum, was measured along with the unknowns to test the standardization and assess reproducibility. Oxygen was calculated by cation stoichiometry and included in the matrix correction. (Moy et al., 2023). Matrix correction was performed using the Phi-Rho-Z method, with mass absorption coefficients obtained from the FFAST (NIST version 2.1; Chantler et al., 2005). According to Armstrong (1998), the specific Phi-Rho-Z algorithm employed

was the Armstrong/Brown/Scott-Love model. Quantitative measurements of crystal sizes were conducted on two representative, least-altered samples using a polarizing microscope. Digital images were captured, and image processing was performed using Adobe Photoshop (Adobe Creative Cloud version) to isolate plagioclase crystals in binary images. The long axis, short axis, area, and centroid of the crystals were measured using ImageJ software. The ShapeCalc spreadsheet program was then employed to convert two-dimensional data to three-dimensional data, allowing for the calculation of crystal dimensions based on the ratios of the short (S), intermediate (I), and long (L) axes. Finally, Crystal Size Distribution (CSD) plots were generated for each sample using CSD Correction 1.40 software. The residence time of the crystals for each sample was determined using the slopes from the CSD plots. This calculation was performed using the formula $Tr = (-1/G \times m) / 31536000$, where Tr is the residence time in years, m is the slope of the crystal population trend line, and G refers to the crystal growth rate in mm/s. The selected G value was based on the suggested value for intrusive magma ($G = 10^{-10}$ mm/s, [Cashman, 1993](#)) and 31536000 is the conversion factor from seconds to years.

Results

Sample petrography

The Seridune Monzonite exhibits a porphyritic texture characterized by phenocrysts of plagioclase, alkali feldspar, quartz and biotite set in a microcrystalline groundmass. Secondary minerals resulting from hydrothermal alteration include biotite, alkali feldspar, chlorite, sericite and clay minerals.

Plagioclase is the most abundant mineral in the Seridune Monzonite. It occurs both as subhedral to euhedral phenocrysts and microcrystals in the groundmass. Phenocrysts display polysynthetic and Carlsbad-albite twinning, along with oscillatory zoning. In some occurrences, these phenocrysts have even grown intergrown in a cruciform shape. It has commonly been replaced by sericite ([Fig. 2B](#)). This alteration is focused on the rim of the phenocrysts and the central parts of plagioclase microlites within the groundmass. Furthermore, these phenocrysts are occasionally crosscut by late-stage veinlets

containing quartz, opaque minerals, and anhydrite. This crosscutting phenomenon is definitive evidence that the fluids bearing quartz, opaque minerals, and anhydrite are younger than the time of plagioclase crystallization, and it emphasizes the secondary permeability of the system ([Sillitoe, 2000](#); [Sillitoe, 2010](#)).

Plagioclase composition

The results of 7 plagioclase EPMA analyses from two samples, together with the calculated (Wt.%) of anorthite, albite and orthoclase are presented in [Table 1](#). The studied plagioclase crystals have a compositional range from labradorite to albite ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$) ([Fig. 3A](#)). Some of these crystals show oscillatory zoning.

Crystal size/shape analysis

The crystals shapes were determined by applying Zingg's diagram ([Zingg, 1935](#)). This classification scheme categorizes crystals into four categories: tabular, bladed, prolate (acicular) and spherical (equant), based on the ratios of their short, intermediate, and long axes. In the Seridune monzonite samples, plagioclase crystals are predominantly tabular and bladed in shape ([Fig. 7B](#)).

Discussion

Some of these crystals exhibit oscillatory zoning, indicating that fractional crystallization and magma mixing play significant roles in influencing the evolving magmatic composition within the magma chamber ([Kumar and Ashok, 2024](#); [Ou et al., 2024](#)). The plagioclase crystals are tabular and bladed in shape. This morphological variation is likely due to the thermodynamic conditions governing the crystallization process. The deformation of plagioclase crystals in the studied samples resulted from changes in undercooling, chemical potential gradients, and material diffusion. The non-linear trend observed in the CSD plots for plagioclase crystals suggests multi-stage cooling process for the crystals ([Fig. 8](#)). The initial stage is marked by plagioclase phenocrysts with few nuclei, whereas in the following stage, they develop as microcrystalline formed under a high nucleation rate.

The nonlinear CSD trends may show the multi-stage crystallization process of magma, magma mixing, and Ostwald Ripening (textural coarsening) processes, as well as modifications in the crystallization course due to changing environments and magma chambers at different depths. The observation of a porphyritic texture with a microlithic groundmass in the Seridune Monzonite, along with features such as oscillatory zoning and sieve texture, indicates multi-stage crystallization at varying depths. The process textural coarsening take place only when a crystal is kept at a temperature near to its liquidus for a prolonged period. Under such conditions, the nucleation rate approaches, while crystals larger than the critical size exhibit a high growth rate. According to [Yang \(2012\)](#), this does not necessarily imply that the temperature remains constant. The nucleation rate and residence time determined for the studied monzonitic intrusive body indicate a high nucleation rate and short residence time for the samples. Based on the Ca+Na+K versus Si+Al diagram, plagioclase

crystals in the monzonitic body show a trend similar to those observed in the mineralizing magmatic systems and hydrous porphyries ([Williamson et al., 2016](#)). This trend, coupled with the calculated Al* values, reflects magmatic conditions favorable for porphyry-style mineralization; Although, despite these favorable indicators, this body itself is not considered the responsible phase for mineralization in the Seridune deposit.

Acknowledgement

The authors gratefully acknowledge the financial and logistical support provided by the Vice Chancellor for Research at Shahid Bahonar University of Kerman and National Iranian Copper Industries Company (NICICO). Sincere thanks are also extended to the editor and anonymous reviewers of the Journal of Economic Geology for their constructive comments and valuable suggestions, which helped improve this manuscript.



شیمی کانی و توزیع اندازه بلور پلاژیوکلازها در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون، ایران: با تأکید بر فرایندهای کنترل کننده تکامل ماگما

مهديه بامروت^۱، سارا درگاهی^{۲*}، محسن آروین^۳، علیرضا شاکر^۴، جیمی جی ویلکینسون^۵، ادگار ای کورتس-کالدرون^۶، مجید امین‌زاده^۷

^۱ دانشجوی دکتری، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۲ دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۳ استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۴ استادیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران

^۵ استاد، گروه علوم زمین و مهندسی، دانشکده مهندسی، دانشگاه امپریال کالج لندن، لندن، بریتانیا

^۶ پژوهشگر، مرکز تصویربرداری و تحلیل، موزه تاریخ طبیعی، لندن، بریتانیا

^۷ رئیس بخش زمین‌شناسی و زهکشی، مجتمع مس سرچشمه، شرکت صنایع ملی مس ایران

اطلاعات مقاله

چکیده

کانسار مس پورفیری سریدون، در بخش میانی کمربند مس پورفیری کرمان و سه کیلومتری شمال شرقی معدن مس سرچشمه واقع شده است. این پژوهش، با توجه به نقش پلاژیوکلاز در بازسازی فرایندهای تبلور ماگما، بررسی کیفی و کمی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی کانسار مس سریدون با بهره‌گیری از بررسی‌های سنگ‌شناسی، شیمی کانی و پراکندگی اندازه متمرکز است. این واحد سنگی که از نظر ترکیب از مونزونیت تا کوارتز مونزونیت متغیر است، شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز، کوارتز، فلدسپار پتاسیم، بیوتیت، آمفیبول و همچنین کانی‌های فرعی کدر اغلب از نوع مگنتیت، آپاتیت و زیرکن است. ترکیب بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی از لابرادوریت تا آلپیت ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$, $n = 80$) متغیر است. بر اساس بررسی‌های پراکندگی اندازه بلور، الگوهای نیمه لگاریتمی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نشان‌دهنده تبلور چند مرحله‌ای ماگما در اعماق مختلف است. همچنین، وجود بافت غربالی، منطقه‌بندی نوسانی و نتایج پراکندگی اندازه بلور نشان‌دهنده کاهش فشار و تزریق پالس‌های مافیک در یک سامانه پویاست. با فرض نرخ رشد ثابت و چگالی هسته (n_0)، نرخ هسته‌بندی بلورهای پلاژیوکلاز بین $66 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تا $64 \times 10^{-11} \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تعیین شد. همچنین، بر اساس داده‌های توزیع اندازه بلورهای سه‌بعدی و با استفاده از نرخ رشد 10^{-10} ، زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلازها بین ۵۶ تا ۶۳ سال برآورد شد. زمان اقامت محاسبه‌شده و آلومینیم اضافی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی با جای‌گیری ماگما در سطوح کم‌عمق‌تر و پتانسیل بالای آن برای آزادسازی سیالات همخوانی دارد؛ هرچند توده مونزونیتی فاز مسئول کانه‌زایی در کانسار مس پورفیری سریدون محسوب نمی‌شود.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۸/۳۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۴/۱۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۲۳

واژه‌های کلیدی

توده نفوذی مونزونیتی

کانسار مس پورفیری سریدون

پراکندگی اندازه بلور

نرخ هسته‌بندی

زمان اقامت

پلاژیوکلاز

نویسنده مسئول

سارا درگاهی

s.dargahi@uk.ac.ir ✉

استناد به این مقاله

بامروت، مهديه؛ درگاهی، سارا؛ آروین، محسن؛ شاکر، علیرضا؛ ویلکینسون، جیمی جی؛ کورتس-کالدرون، ادگار ای و امین‌زاده، مجید، ۱۴۰۵. شیمی کانی و توزیع اندازه بلور پلاژیوکلازها در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون، ایران: با تأکید بر فرایندهای کنترل کننده تکامل ماگما. زمین‌شناسی اقتصادی، ۱۸(۲): ۳۳-۵۹

https://doi.org/10.22067/econg.2026.1165

مقدمه

بررسی تکامل فیزیکی و شیمیایی بلورها، به ویژه کانی‌هایی مانند پلاژیو کلاز، پیروکسن و آمفیبول، نقشی بسیار مهم در درک فرایندهای حاکم بر آشیانه ماگمایی و دینامیک سامانه‌های ماگمایی ایفا می‌کند (Blundy and Cashman, 2008; Ellis et al., 2023) دارد. بررسی شیمی کانی، اطلاعات ارزشمندی در مورد تغییرات دما، فشار، محتوای آب، ترکیب شیمیایی مذاب و فوگاسیته اکسیژن در طی تکامل ماگما و تشکیل سنگ ارائه می‌دهد. بهره‌گیری از این اطلاعات، امکان درک فرایندهایی همچون جدایش، صعود، انباشتگی و اختلاط ماگمایی را فراهم می‌کند (Housh and Luhr, 1991; Ariskin et al., 1993; Panjasawatwong et al., 1995; Al'meev and Ariskin, 1996; Kamaci and Altunkaynak, 2019). این فرایندها با ایجاد عدم تعادل در محیط تبلور ماگما، بر هسته‌زایی و سرعت رشد بلورها تأثیر می‌گذارند و به ایجاد تنوع بافتی در سنگ‌های آذرین منجر می‌شوند (Slaby and Gotze, 2004; Higgins et al., 2015; Deb and Bhattacharyya, 2018). فرایندهای هسته‌بندی، رشد و درشت‌شدگی بافت، ترکیب شیمیایی کل سنگ را تغییر نمی‌دهند (Marsh, 1988; Marsh, 1998; Higgins, 2006; Higgins and Roberge, 2007)؛ از این رو، شناسایی این تحولات بافتی از طریق تحلیل‌های متداول شیمیایی و ایزوتوپی امکان‌پذیر نیست (Higgins and Roberge, 2007). بررسی بافت سنگ با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور، نقشی مهم بر درک فرایندهای فیزیکی تبلور ماگما مانند هسته‌بندی و رشد، تفریق، تراکم، درشت‌شدگی بافتی، سرد شدن مرحله‌ای و اختلاط ماگما ایفا می‌کند. با این حال، دستیابی به یک تصویر جامع از تکامل ماگما، مستلزم تلفیق نتایج پراکندگی اندازه بلور با تحلیل‌های شیمیایی و ایزوتوپی است (Marsh, 1988; Cashman and Marsh, 1988; Resmini and Marsh, 1995; Higgins, 1996; Higgins, 2000; Higgins and Roberge, 2007; Brugger and Hammer, 2010; Ngonge et al., 2013; Klein et al., 2017; Deb and Bhattacharyya, 2018; Kamaci and Altunkaynak,

2019; Bell et al., 2019). در همین راستا، کانی پلاژیو کلاز، به دلیل پایداری در طیف گسترده‌ای از شرایط ماگمایی و حفظ الگوهای منطقه‌بندی بافتی و ترکیبی (Browne et al., 2006)، یک کانی شاخص در بررسی‌های سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرین است. بررسی کمی و کیفی این کانی، امکان استنباط سینتیک و دینامیک فرایندهای ماگمایی (Lofgren, 1980; Smith and Lofgren, 1983; Tsuchiyama, 1985; Pearce et al., 1987; Nelson and Montana, 1992; Johannes et al., 1994; Singer et al., 1995; Nakamura and Shimakita, 1998; Viccaro et al., 2010)، بازسازی روند تکاملی ماگما و تعیین توالی رویدادهای هم‌زمان با تبلور را فراهم می‌آورد. با توجه به اینکه تحولات بافتی می‌تواند منعکس‌کننده سازوکار انتقال فلزها، خروج فاز سیال و تغییرات فیزیکوشیمیایی در سطوح مختلف پوسته باشد، تلفیق نتایج پراکندگی اندازه بلور و شیمی کانی، نقش مؤثری در شناسایی پویایی سامانه‌های کانه‌زا ایفا می‌کند (Higgins, 1999; Higgins, 2011; Babazadeh et al., 2024).

کانسار مس سریدون در بخش میانی کمربند مس پورفیری کرمان و در جنوب شرقی مجموعه ماگمایی ارومیه- دختر واقع شده است. این کانسار، به دلیل نزدیکی (حدود ۳ کیلومتری شمال شرقی) به کانسار سرچشمه، از اهمیت اکتشافی و اقتصادی ویژه‌ای برخوردار بوده و طی سال‌های اخیر مورد توجه پژوهشگران بسیاری قرار گرفته است. با وجود آنکه پژوهش‌های زمین‌شناسی ناحیه‌ای، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی، دگرسانی و سنجش از دور در مورد این کانسار انجام شده است (Barzegar, 2007; Kazemi Mehrnia et al., 2010; Shahriari et al., 2014; Abedi et al., 2013; Abedi et al., 2017; Bamorovat et al., 2024)، برای درک عمیق‌تر عوامل مؤثر بر تشکیل کانسار لازم است تا بر تلفیق فرایندهای زمین‌شیمیایی و سنگ‌شناختی تمرکز شود. توده مونزونیتی سریدون در بخش محدودی از منطقه دارای برونزد سطحی است. مشاهدات میدانی و بررسی‌های سنگ‌شناسی بیانگر دگرسانی گسترده این رخنمون‌هاست. از این رو، با هدف بازسازی

در جدول ۱ ارائه شده است. در پردازش داده‌ها از نرم‌افزارهای GCDkit, Igpet و CorelDRAW (نسخه ۲۰۱۷) استفاده شد. برای بررسی پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز، دو مقطع نازک با کمترین میزان دگرسانی از توده نفوذی مونزونیتی سریدون انتخاب شد. پردازش تصاویر در محیط نرم‌افزار Adobe Photoshop انجام شد. سپس، با استفاده از نرم‌افزار ImageJ، مؤلفه‌های هندسی بلورهای پلاژیوکلاز اندازه‌گیری و با استفاده از نرم‌افزار ShapeCalc (Mangler et al., 2022)، ابعاد بلورها محاسبه و شکل آنها با نمودار زینگ (Zingg, 1935) مشخص شد. در نهایت، نمودار نیمه لگاریتمی طبیعی چگالی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون توسط نرم افزار CSD Correction (نسخه ۱/۴) رسم شد.

زمین‌شناسی منطقه

کمرند ماگمایی ارومیه- دختر در استان کرمان حاوی ذخایر مس پورفیری متعددی است که در مجموع به عنوان کمرند مس پورفیری کرمان شناخته می‌شوند (Ghorbani, 2013). این کمرند با روند شمال شرقی- جنوب غربی، بخش جنوب شرقی کمان ماگمایی ارومیه- دختر را تشکیل می‌دهد. این کمرند حاصل فرایندهای تکتونوماگمایی پیچیده‌ای است که در دوران ترشیری رخ داده است. بررسی‌ها نشان داده‌اند که کانی‌زایی مس پورفیری در این کمرند، اغلب مرتبط با توده‌های نفوذی جوان از نوع کوه‌پنج است (McInnes et al., 2003). کانسار مس پورفیری سریدون در بخش مرکزی کمرند مس پورفیری کرمان از لحاظ ژنتیکی و کانی‌شناسی شبیه سایر کانسارهای مرتبط با توده‌های نفوذی نوع کوه‌پنج است (Hassanzadeh, 1993; Aghazadeh et al., 2015; Bamorovat et al., 2024). در این منطقه قدیمی‌ترین واحدهای سنگ‌شناسی شامل سنگ‌های آتشفشانی و سنگ‌های آذر آواری ائوسن می‌باشند. این واحدهای آتشفشانی توسط توده‌های نفوذی گرانودیوریتی و دایک‌های پورفیری قطع شده‌اند.

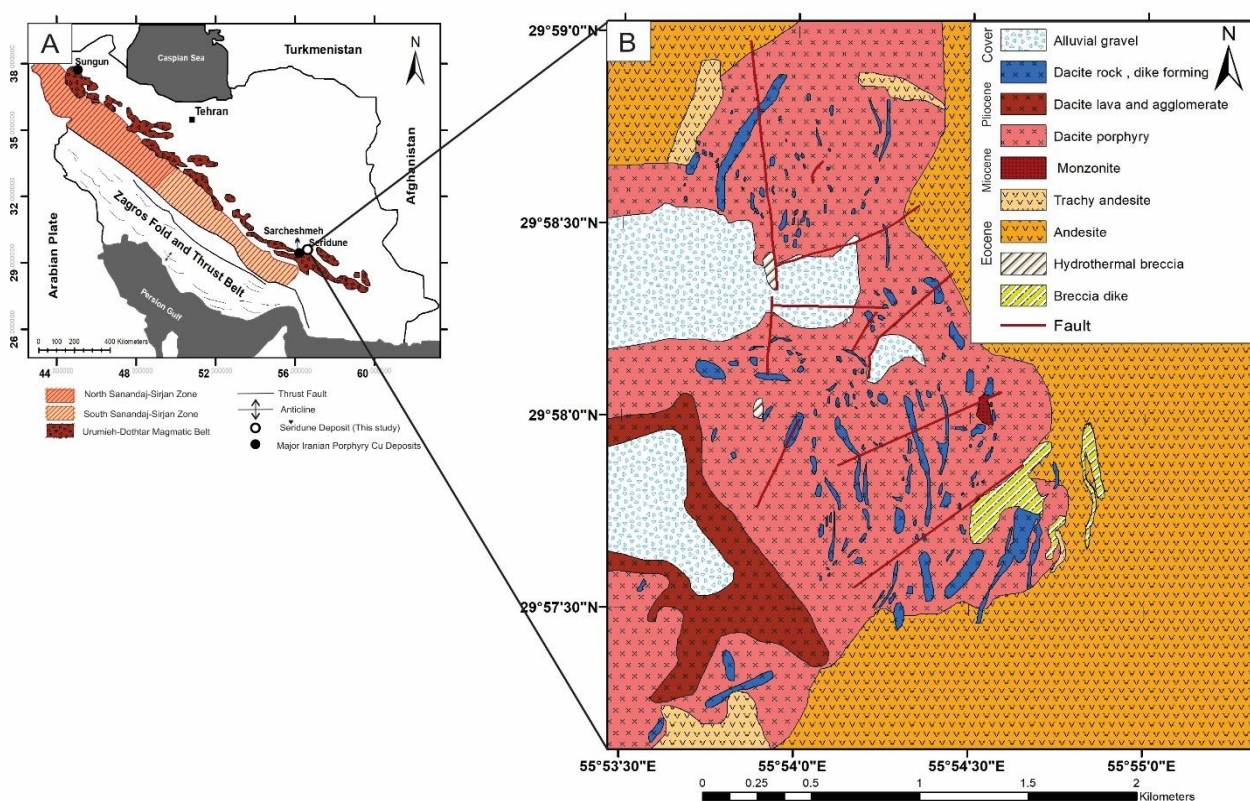
تاریخچه سنگ، بررسی‌هایی بر نمونه‌های کم‌دگرسان حاصل از مغزه‌های حفاری صورت گرفت. در این پژوهش، نرخ هسته‌زایی، نرخ رشد و زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلاز با استفاده از روش پراکندگی اندازه بلور برآورد شد، تا با تلفیق این نتایج و داده‌های شیمی کانی، درک جامع‌تری از تاریخچه تکامل ماگما و فرایندهای تشکیل‌دهنده توده مونزونیتی کانسار سریدون حاصل شود.

روش مطالعه

بررسی‌های میدانی گسترده‌ای به منظور شناسایی واحدهای سنگی و ساختارهای حاکم بر منطقه سریدون انجام شد. نمونه‌هایی از توده مونزونیتی سریدون، با کمترین میزان دگرسانی برای تهیه مقاطع نازک- صیقلی انتخاب شدند. سپس، مقاطع توسط میکروسکوپ پلاریزان بررسی شدند تا بلورهای پلاژیوکلاز مناسب برای ریز آنالیز شیمیایی مشخص شود. ترکیب شیمیایی پلاژیوکلازها با استفاده از دستگاه ریز کاو الکترونی پرتو JEOL 8530 F مجهز به پنج طیف‌سنج انتشار طول موج در مرکز تصویربرداری و آنالیز موزه تاریخ طبیعی لندن در کشور انگلیس تعیین شد. آنالیزهای EPMA با ولتاژ شتاب ۱۵ کیلوولت، جریان پرتو ۲۰ نانو آمپر و پرتوی فوکوس‌نشده با قطر ۱۰ میکرومتر انجام شد. برای کمینه‌سازی اثر قلیایی، عناصر Na و K در اولویت سنجش قرار گرفتند. زمان شمارش برای پیک‌ها و پس‌زمینه به ترتیب ۲۰ تا ۳۰ و ۱۰ تا ۱۵ ثانیه تنظیم شد و درستی داده‌ها با استانداردهای کانی مرجع و داخلی اعتبارسنجی شد. تصحیح ماتریس بر اساس روش Phi-Rho-Z (الگوریتم Armstrong/Brown/Scott-Love) و با بهره‌گیری از ضرایب جذب جرمی FFAST Chantler انجام شد (Chantler et al., 1988; Armstrong, 2005). در نهایت، اکسیژن از طریق استوکیومتری کاتیونی محاسبه و در تصحیح ماتریس لحاظ شد (Armstrong, 1988; Moy et al., 2023). نتایج به دست آمده از تجزیه ۸۰ نقطه پلاژیوکلاز در نمونه‌های مورد بررسی برحسب درصد وزنی و مقادیر محاسبه‌شده آنورتیت، آلکیت و ارتوز بر حسب درصد مولی

۱- A و B). هواز دگی و عملکرد سیالات گرمابی ناشی از فعالیت‌های ماگمایی، دگرسانی‌های گسترده‌ای همچون پتاسیک، فلیک و آرژیلیک را ایجاد کرده است. دگرسانی‌های فلیک و آرژیلیک تا آرژیلیک پیشرفته به صورت گسترده در سطح رخنمون دارند. در حالی که، دگرسانی پتاسیک در اعماق متمرکز شده و تنها از طریق حفاری‌های انجام شده در منطقه قابل دسترسی است.

علاوه بر این، گدازه‌های داسیتی پلیوسن نیز بخش‌هایی از توالی‌های سنگی قدیمی‌تر را پوشانده‌اند. ساختارهای زمین‌ساختی به ویژه گسل‌ها و دایک‌های متعدد با روند شمال-جنوب مشاهده شده در منطقه بر شکل‌گیری و کنترل کانه‌زایی در منطقه مؤثر بوده است. در شکل ۱، موقعیت جغرافیایی و توالی سنگ‌شناسی کانسار مس پورفیری سریدون در نقشه تهیه شده توسط برزگر (Barzegar, 2007) و شرکت کان ایران (Kan Iran exploration co, 2007) ارائه شده است (شکل ۱).



شکل ۱. A: موقعیت جغرافیایی کانسار مس پورفیری سریدون همراه با کانسارهای مس پورفیری معروف در ایران و B: نقشه زمین‌شناسی ساده کانسار مس پورفیری سریدون (بعد از برزگر (Barzegar, 2007) و شرکت کان ایران (Kan Iran exploration co, 2007))

Fig 1. A: The geographical location of the Seridune porphyry copper deposit, along with well-known porphyry copper deposits in Iran, and B: A simplified geological map of the Seridune porphyry copper deposit (After Barzegar, 2007 and Kan Iran exploration co, 2007)

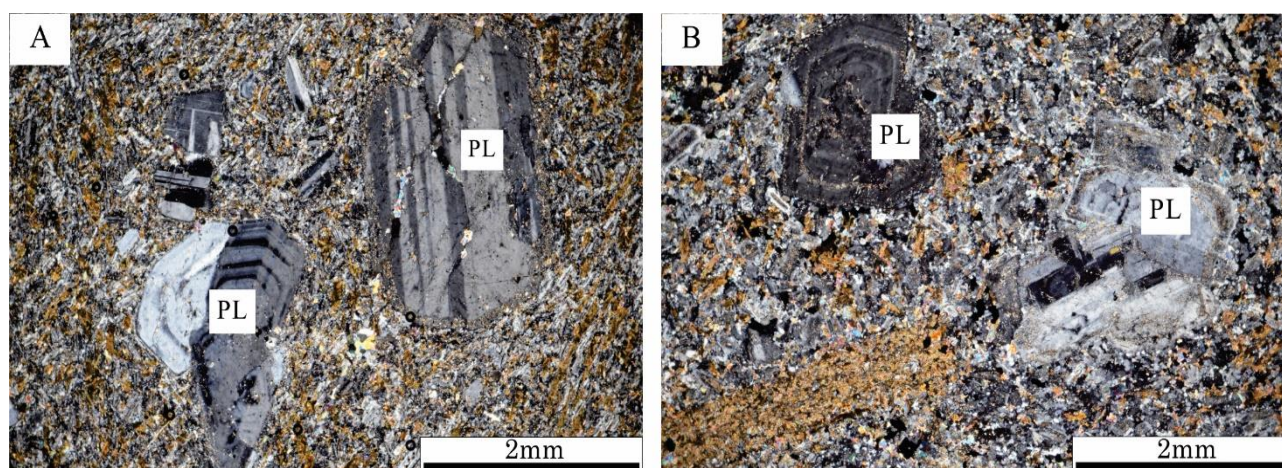
سنگ‌شناسی

پورفیری سریدون دارای تنوع ترکیبی مونزونیت تا کوارتز مونزونیت پورفیری است. در این سنگ‌ها بافت پورفیریتیک با

بر اساس بررسی‌های میکروسکوپی توده مونزونیتی، کانسار مس

تغییرات از دگرسانی جزئی و تبدیل به فلدسپار قلیایی و سریسیت تا جایگزینی کامل توسط کانی‌های رسی و سریسیت متغیر است. سریسیتی شدن بلورهای پلاژیوکلاز، به ویژه در حاشیه و امتداد صفحه‌ها، نشان‌دهنده شدت‌های متفاوتی از دگرسانی فیلیک و تغییر در شرایط فیزیکوشیمیایی سیالات گرمابی است که این مسئله همراه با حضور بیوتیت ثانویه می‌تواند به خوبی بیانگر رخداد دگرسانی پتاسیک-فیلیک باشد (شکل ۲-۲B). فلدسپار قلیایی در این سنگ‌ها اغلب به صورت ریزبلور در زمینه و یا با منشأ ثانویه مشاهده می‌شود. بیوتیت به عنوان یکی از کانی‌های شاخص در این سنگ‌ها، در دو نسل اولیه و ثانویه مشاهده می‌شوند. بیوتیت‌های اولیه اغلب به صورت بلورهای درشت هستند. با این حال، بسیاری از بیوتیت‌های اولیه تحت تأثیر فرایندهای گرمابی قرار گرفته است. این کانی‌ها توسط کانی‌های بیوتیت ثانویه، کلریت و یا کانی‌های کدر، مانند مگنتیت، پیریت و کالکوپریت جایگزین شده‌اند.

زمینه میکروولیتی به خوبی توسعه یافته است. این توده به طور کلی شامل کانی‌های اصلی پلاژیوکلاز (۳۵ تا ۴۰ درصد)، آلکالی فلدسپار (۳۰ تا ۳۵ درصد)، کوارتز (۳ تا ۱۰ درصد)، بیوتیت و آمفیبول (۱۰ تا ۱۵ درصد) همراه با کانی‌های فرعی کدر از جمله پیریت، کالکوپریت و مگنتیت، آپاتیت و زیرکن (۵ تا ۱۰ درصد) است. بلورهای پلاژیوکلاز در این سنگ‌ها به صورت بلورهای درشت و میکروولیتی در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. این کانی‌ها اغلب دارای ماکل‌های چندگانه‌ای نظیر کارلسباد آلپیتی و پلی سنتتیک هستند. ساختارهای منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی که در این کانی‌ها مشاهده می‌شود، بیانگر تغییرات در ترکیب شیمیایی مذاب و شرایط آشیانه ماگمایی طی فرایند تبلور است (Perugini et al., 2005; Yousefi et al., 2024) (شکل ۲-۲A). بلورهای پلاژیوکلاز در نمونه‌های مورد بررسی، طی فرایند دگرسانی گرمابی، تغییرات قابل توجهی را متحمل شده‌اند. این



شکل ۲. تصاویرهای میکروسکوپی از توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون در نور (XPL)، A: وجود منطقه‌بندی نوسانی در بلورهای پلاژیوکلاز همراه با بیوتیت ثانویه که بیانگر دگرسانی پتاسیک است B: دگرسانی پتاسیک-فیلیک معمولاً به صورت تبدیل بخش‌هایی از بلور پلاژیوکلاز به سریسیت هم‌زمان با حضور بیوتیت ثانویه مشاهده می‌شود. این پدیده در کانسارهای پورفیری، نشان‌دهنده فعالیت سیالات گرمابی پس از تبلور اولیه ماگماست (XPL). علامت اختصاری از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (PL: پلاژیوکلاز).

Fig. 2. microphotographs of the monzonitic intrusive body of the Saridun porphyry copper deposit. A: Oscillatory zoning in plagioclase crystals associated with secondary biotite, indicating potassic alteration. (XPL), and B: Potassic-phylic alteration is typically observed as the partial replacement of plagioclase crystals by sericite, along with the presence of secondary biotite. This phenomenon, in porphyry deposits, indicates the activity of hydrothermal fluids following the initial crystallization of the magma. (XPL). Abbreviation after Whitney and Evans (2010) (PL: Plagioclase).

نقاط تجزیه و تحلیل شده بلورهای پلاژیوکلاز در توده نفوذی مونزونیتی سریدون و پروفیل‌های EMPA اندازه‌گیری شده برای بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی در شکل ۴-A و B ارائه شده است. تغییرات ترکیبی از هسته تا حاشیه بلورها، بیانگر وجود منطقه‌بندی نوسانی است که می‌تواند بیانگر نقش فرایندهای تبلور تفریقی و اختلاط ماگمایی در تکامل ترکیب ماگما درون محفظه ماگمایی باشد (Kumar and Ashok, 2024; Ou et al., 2024). برای ارزیابی پتانسیل باروری و کانه‌زایی توده مورد بررسی، رفتار زمین‌شیمیایی بلورهای پلاژیوکلاز بر مبنای شاخص آلومینیم مورد بررسی قرار گرفت (Williamson et al., 2016). چنان‌که در شکل ۳-B مشاهده می‌شود، بلورهای پلاژیوکلاز توزیع متنوعی را نشان می‌دهند؛ به طوری که غالب نمونه‌ها از محتوی $Al^* \leq 1$ و تعداد اندکی از محتوی $Al^* > 1$ برخوردارند.

پراکندگی اندازه بلور

درک سازوکارهای کنترل‌کننده فرایند انجماد ماگما، یکی از چالش‌های اساسی در سنگ‌شناسی سنگ‌های آذرین محسوب می‌شود (Yang, 2012). روش کمی پراکندگی اندازه بلور، نقش مهمی در درک فرایندهای هسته‌زایی و رشد بلورها طی تکامل ماگما دارد. برای این منظور، تصویرها با وضوح بالا از مقاطع نازک توسط اسکنر لام تهیه و پردازش تصویرها در نرم‌افزار فتوشاپ انجام شد (شکل ۵-A و B). تصویرهای پردازش شده، برای استخراج محورهای بلند، کوتاه و مساحت بیش از ۳۰۰۰ بلور به محیط نرم‌افزار ImageJ منتقل شدند. با توجه به ضرورت تبدیل داده‌های دوبعدی به حجمی، از برنامه ShapeCalc (Mangler et al., 2022) برای تعیین نسبت منظر (S:I:L) بلورها استفاده شد (شکل ۷-A). انتخاب این برنامه به دلیل برتری عملیاتی آن نسبت به مدل‌های پیشین نظیر 5 CSDslice صورت گرفت. ShapeCalc با بهره‌گیری از پایگاه داده گسترده‌تر شامل ۲۶۱۸ توزیع مدل و استفاده از معیار آماری دقیق تر $Rc2$ ، تطابق بهتری میان توزیع‌های نمونه و مدل ایجاد می‌کند. در محیط این

بیوتیت‌های ثانویه، فراوان‌ترین کانی ثانویه در این سنگ‌ها هستند که به صورت پولک‌های ریز در زمینه سنگ مشاهده می‌شوند. حضور گسترده بیوتیت ثانویه به همراه فلدسپار قلیایی ثانویه، نشان‌دهنده رخداد دگرسانی پتاسیک در این کانسار است. تمامی نسل‌های بیوتیت با شدت متفاوت به کلریت تبدیل شده‌اند که بیانگر سیر تکاملی حرارتی سامانه از شرایط پایداری پتاسیک به فازهای دما پایین‌تر است. همچنین، در این سنگ‌ها، بلورهای آمفیبول نیز توسط بیوتیت ثانویه جایگزین شده‌اند. این فرایند به تشکیل شکل‌های دروغین آمفیبول منجر شده است. حضور این شکل‌های دروغین، شاهی بر وجود این کانی در هم‌یافت اولیه سنگ است. علاوه بر آن، قطع‌شدگی درشت‌بلورهای پلاژیوکلاز توسط رگچه‌های متأخر کوارتز-انیدریت-کانی کدر، می‌تواند شاهی بر تأخر زمانی عملکرد سیالات نسبت به تبلور پلاژیوکلاز و نقش نفوذپذیری ثانویه در سامانه باشد (Sillitoe, 2000; Sillitoe, 2010).

شیمی کانی

شیمی کانی پلاژیوکلاز

پلاژیوکلاز، به عنوان یکی از کانی‌های شاخص در سنگ‌های آذرین، اطلاعات ارزشمندی را در مورد شرایط فیزیکی‌شیمیایی حاکم بر تبلور ماگما ارائه می‌دهد. تغییرات در ترکیب شیمیایی پلاژیوکلاز، به ویژه نسبت آنورتیت به آل بیت و غلظت عناصر کمیاب مانند آهن، منیزیم و تیتانیوم، امکان بازسازی تبلور ماگما و تعیین دمای تبلور کانی‌ها را فراهم می‌آورد (Pietraniket al., 2006). داده‌های ریز کاو الکترونی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی به صورت گزینشی و با اختصار در جدول ۱ ارائه شده‌اند. گزینش داده‌های جدول بر مبنای پوشش کامل دامنه تغییرات ترکیبی بلورهای پلاژیوکلاز صورت گرفته است. بر اساس بررسی‌های انجام‌شده، ترکیب بلورهای پلاژیوکلاز از لابرادوریت تا آل بیت ($An_{3.0-55.0}Ab_{44.1-94.5}Or_{0.0-17.7}$) متغیر است (شکل ۳-A). تصویرهای ریز پردازش الکترونی به همراه

۲). با توجه به نقش مهم زمان در کنترل بافت سنگ‌های آذرین (Zieg and Marsh, 2002)، زمان اقامت بلورهای پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون با استفاده از شیب منحنی توزیع اندازه بلورها (M) و با استفاده از فرمول $Tr = (-1 / (G \times m))$ 31536000 محاسبه شد. نتایج به دست آمده از این محاسبات در جدول ۲ ارائه شده است.

برنامه، شکل نهایی بلورها نیز در نمودار زینگ مشخص شد (شکل B-۶). در نهایت، نسبت ابعاد بلورها با هدف محاسبه مؤلفه‌های سینتیکی تبلور و رسم نمودارهای نیمه لگاریتمی چگالی تجمع به نرم افزار 1.4 CSD Corrections منتقل شد (شکل ۸). سرعت هسته‌بندی (J) با فرض نرخ رشد 10^{-11} mm/s، با استفاده از فرمول $J = n0 \times G$ محاسبه شد. محل تقاطع نمودار CSD با محور تراکم جمعیت، بیانگر چگالی هسته‌بندی n0 است (جدول

جدول ۱. نتایج داده‌های منتخب ریزکاو الکترونی پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون؛ مقادیر اکسیدها بر حسب درصد وزنی (wt.%) و اعضای انتهایی بر حسب درصد مولی (mol%) ارائه شده است (b.d = کمتر از حد تشخیص).

Table 1. Results of representative EMPA analyses of plagioclase in the Seridune Monzonite intrusive body; Oxide concentrations are in wt.% and end-member components are in mol% (b.d= below detection limit).

Sample		SiO ₂	TiO ₃	Al ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	BaO
SE-31		60.04	0.02	24.17	0.01	b.d	6.09	7.89	0.39	0.04
SE-31		58.5	b.d	24.96	0.01	b.d	6.99	7.42	0.35	b.d
SE-31		59.7	b.d	24.73	0.01	b.d	6.66	7.55	0.37	0.06
SE-31	Rim	51.67	0.03	27.15	0.01	0.06	12.47	5.17	0.14	b.d
SE-31	To	56.8	0.03	26.27	0.01	0.05	8.51	6.17	0.4	b.d
SE-31	Core	53.86	0.02	27.85	0.01	0.04	10.41	5.44	0.21	0.02
SE-31	Rim	59.56	0.01	24.19	0.01	b.d	6.14	7.95	0.36	0.01
SE-31	To	58.93	0.01	24.99	b.d	b.d	6.97	7.38	0.41	0.02
SE-31	Core	60.47	b.d	23.72	0.01	b.d	5.43	8.39	0.34	0.02
SE-31	Rim	59.49	b.d	24.22	b.d	b.d	6.28	7.82	0.33	0.01
SE-31	To	60.98	0.01	23.25	b.d	b.d	4.94	8.43	0.49	0.02
SE-31	Core	61.22	0.01	23.92	b.d	b.d	5.64	8.06	0.34	b.d
SE-25	Core	59.22	b.d	23.94	b.d	b.d	6.01	7.89	0.5	0.06
SE-25	To	61.27	b.d	25.3	b.d	b.d	6.44	8.31	0.47	0.03
SE-25	Rim	58.79	0.01	24.65	b.d	0.01	6.83	7.6	0.44	0.03
SE-25	Core	59.08	b.d	23.83	b.d	0.2	4.15	7.2	2.41	0.06
SE-25	To	58.23	b.d	23.82	0.01	0.01	6.48	7.73	0.37	0.07
SE-25	Rim	59.42	b.d	23.7	0.01	b.d	5.75	8.3	0.34	0.04
SE-25	Core	58.13	0.02	25.47	b.d	0.01	7.42	7.29	0.31	0.02
SE-25	To	55.87	0.02	27.09	b.d	b.d	9.05	6.3	0.2	0.02
SE-25	Rim	62.82	0.02	22.09	b.d	0.01	3.26	9.64	0.49	0.08

ادامه جدول ۱. نتایج داده‌های منتخب ریزکاو الکترونی پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی سریدون؛ مقادیر اکسیدها بر حسب درصد وزنی (wt.%) و اعضای انتهایی بر حسب درصد مولی (mol%) ارائه شده است (b.d = کمتر از حد تشخیص).

Table 1 (Continued). Results of representative EMPA analyses of plagioclase in the Seridune Monzonite intrusive body; Oxide concentrations are in wt.% and end-member components are in mol% (b.d= below detection limit).

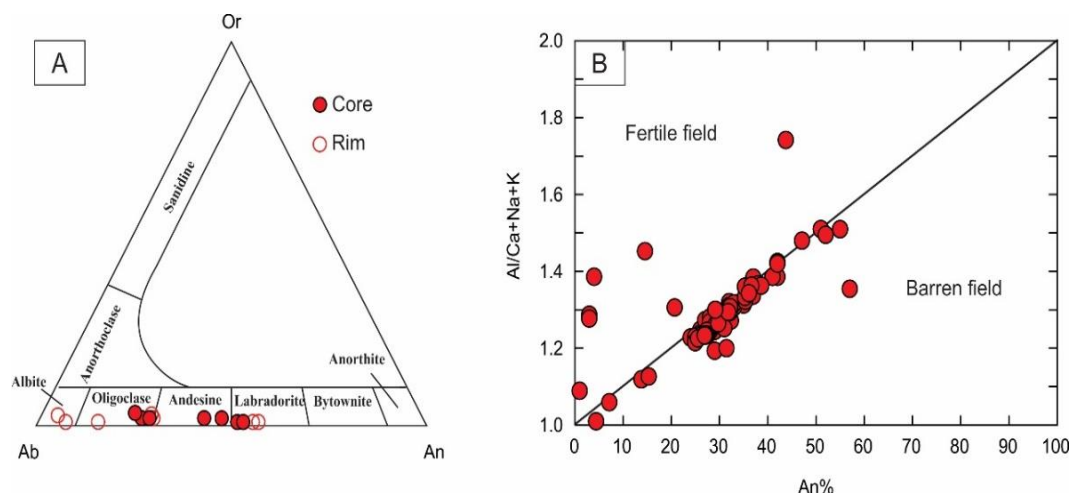
Sample		SrO	Fe ₂ O ₃	FeO	Total	Si	An	Ab	Or
SE-31		0.21	0.17	b.d	99.04	2.7	29	69	2
SE-31		0.21	0.23	b.d	98.67	2.65	34	64	2
SE-31		0.19	0.09	0.12	99.46	2.68	32	66	2
SE-31	Rim	0.4	0.17	b.d	97.27	2.4	57	43	1
SE-31	to	0.26	b.d	0.22	98.72	2.59	42	55	2
SE-31	Core	0.34	0.37	b.d	98.57	2.47	51	48	1
SE-31	Rim	0.19	0.11	b.d	98.52	2.69	29	69	2
SE-31	to	0.17	0.17	b.d	99.05	2.66	33	64	2
SE-31	Core	0.2	0.08	b.d	98.65	2.72	26	72	2
SE-31	Rim	0.22	0.13	b.d	98.5	2.69	3	68	2
SE-31	to	0.16	0.1	b.d	98.38	2.75	24	73	3
SE-31	core	0.17	b.d	0.17	99.47	2.74	27	71	2
SE-25	Core	0.22	b.d	0.16	98	2.69	29	68	3
SE-25	to	0.23	0.17	0.17	102.22	2.67	29	68	3
SE-25	Rim	0.19	0.17	0.17	98.73	2.66	32	65	2
SE-25	Core	0.16	0.49	0.49	97.58	2.7	21	65	3
SE-25	to	0.18	0.16	0.16	97.06	2.67	31	67	2
SE-25	Rim	0.19	0.18	0.18	97.92	2.7	27	71	1
SE-25	Core	0.38	0.22	0.22	99.25	2.62	35	63	2
SE-25	to	0.46	0.26	0.26	99.27	55.87	44	55	2
SE-25	Rim	0.23	0.07	0.07	98.72	2.81	15	82	1

بحث

شیمی کانی پلاژیوکلاز

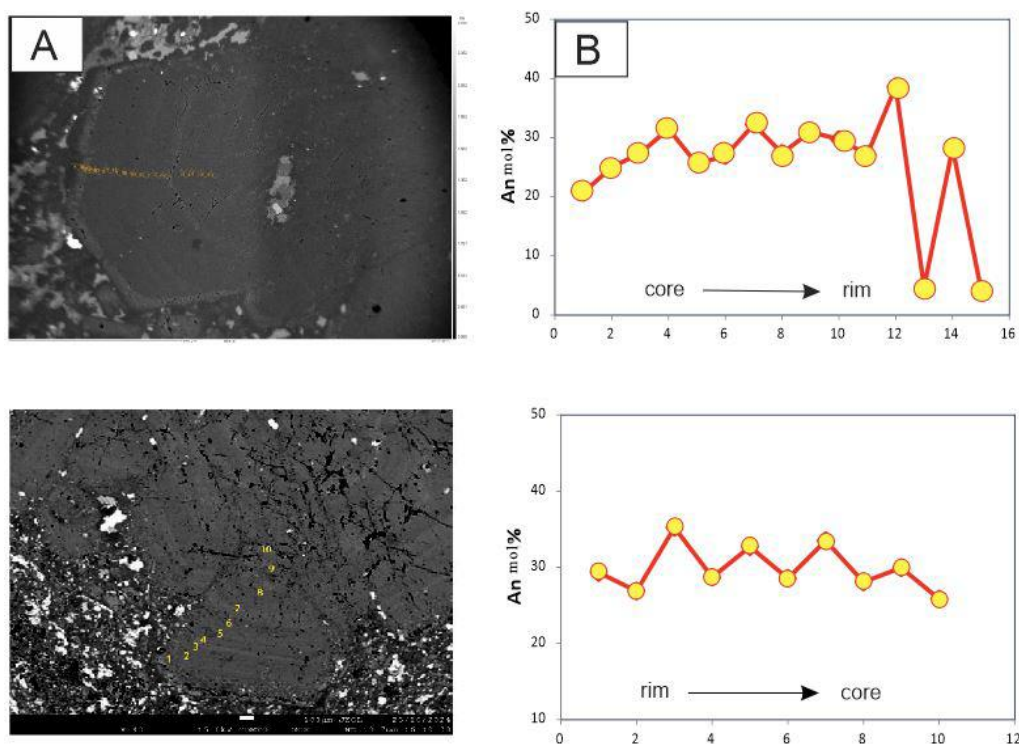
از ۱ را نشان می‌دهند (شکل ۳-B). از آنجا که مقدار $Al^* = 1$ به عنوان مرز جداکننده سامانه‌های بارور ($Al^* > 1$) از سامانه‌های نابارور ($Al^* < 1$) معرفی شده است (Williamson et al., 2016)، تمرکز بخش قابل توجهی از داده‌ها در مجاورت این مرز نشان می‌دهد که ترکیب پلاژیوکلازها به شرایط تشکیل آلومینیم اضافی نزدیک شده است.

آلومینیم اضافی در بلورهای پلاژیوکلاز به عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی برای شناسایی توده‌های بارور در نظر گرفته می‌شود (Williamson et al., 2016). در توده مونزونیتی مورد مطالعه، بررسی شاخص Al^* نشان می‌دهد که داده‌ها اغلب در محدوده ۰/۹ تا ۱ متمرکز شده‌اند و تعداد محدودی مقادیر بالاتر



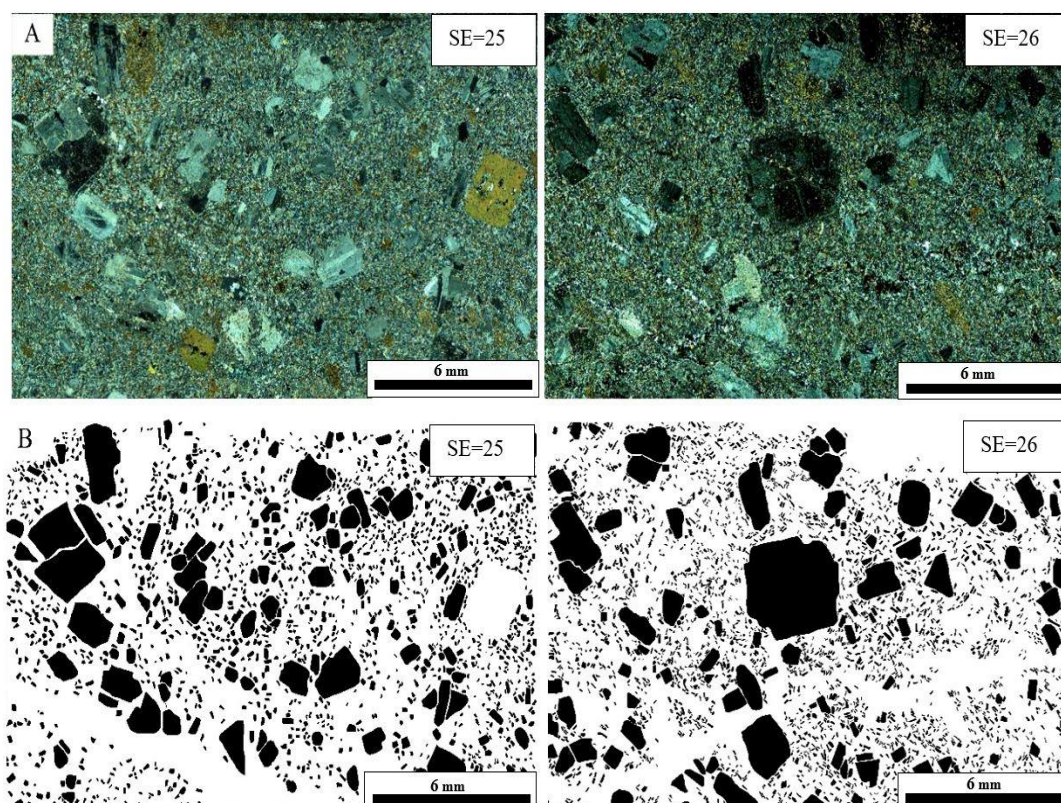
شکل ۳. A: ترکیب شیمیایی بلورهای پلاژیوکلز در نمودار سه تایی Ab-An-Or (Deer et al., 2013) و B: تعیین وضعیت باروری توده مونزونیتی سریدون بر اساس شاخص Al^*

Fig. 3. A: The chemical composition of plagioclase crystals within Ab-An-Or ternary diagram (Deer et al., 2013), and B: Determining the fertility status of the monzonitic body of the Seridune based on the Al^* index



شکل ۴. A: تصاویرهای ریزپردازش الکترونی و نقاط تجزیه شده بلورهای پلاژیوکلز در توده نفوذی مونزونیتی سریدون و B: پروفیل های EMPA اندازه گیری شده در بلورهای پلاژیوکلز

Fig. 4. A: Backscattered electron (BSE) images and analyzed points in plagioclase in the Seridune monzonitic intrusive body, and B: Electron microprobe analysis (EMPA) profiles obtained from the plagioclase crystals



شکل ۵. A: تصویرهای میکروسکوپی از توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان مجهز به سامانه اسکن لام و B: تصویرهای پردازش شده بلورهای پلاژیوکلاز در توده نفوذی مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون با استفاده از نرم افزار Adobe Photoshop

Fig. 5. A: Microscopic images of the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit, captured using a polarized light microscope equipped with a scanning system, and B: Processed images of plagioclase crystals within the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit, edited using Adobe Photoshop software

جدول ۲. نتایج بررسی‌های کمی پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون

Table 2. Results of quantitative studies of the size distribution of plagioclase crystals in monzonite intrusive body in the Seridune porphyry copper deposit

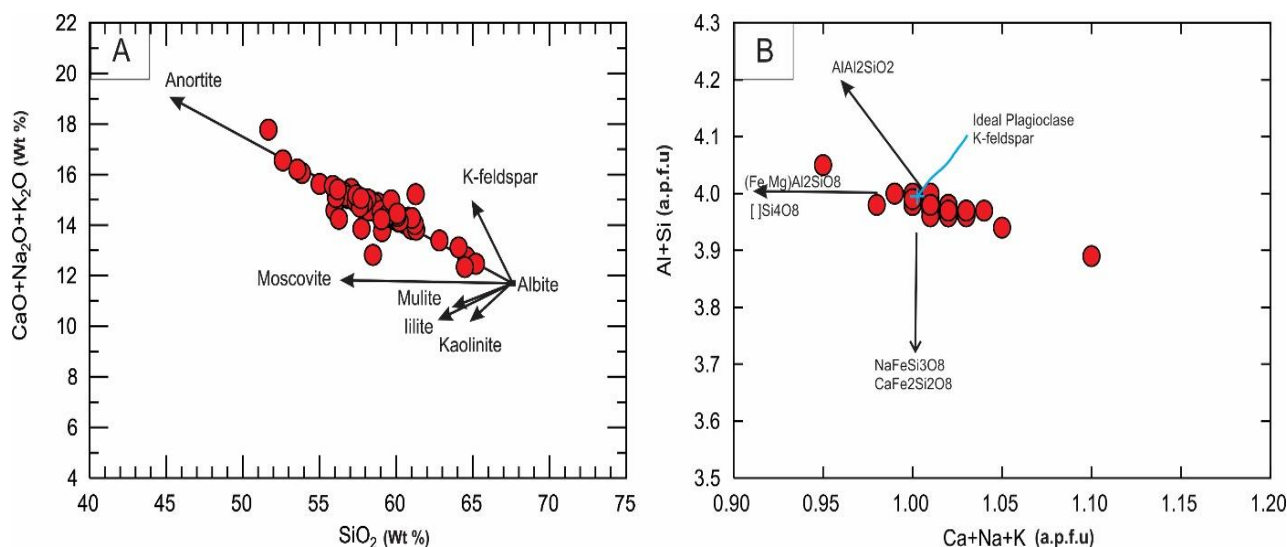
Sample	Slope	n0	Tr	G	J	S : I : L
SE-25	-5.03	6.44	63	10^{-10}	64×10^{-11}	1 : 1.75 : 2.50
SE-26	-5.59	6.67	56	10^{-10}	66×10^{-11}	1 : 2.80 : 4.60

حاکم بر تشکیل توده مونزونیتی، نیازمند اطمینان از حفظ ترکیب اولیه بلورهای پلاژیوکلاز و عدم تأثیر فرایندهای ثانویه است. برای

این یافته با حضور مقادیر $Al^* > 1$ در تعدادی از داده‌ها تأیید می‌شود. با این حال، بررسی منشأ آلومینیم اضافی و درک شرایط

تکامل را مشخص می‌سازد؛ به‌طوری‌که کاهش کلسیم در نواحی مجاور هسته‌های غنی از آنورتیت (An)، بیانگر تبلور در یک سامانه پویا با فشار و دمای متغیر است. در مقابل، حضور حاشیه‌های غنی از An در برخی از بلورها می‌تواند نشان‌دهنده تغییرات ناگهانی نظیر تزریق ماگمای مافیک جدید یا نوسان‌های حرارتی در مخزن باشد (Brown et al., 2024). این تغییرات در ویژگی‌های بافتی بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی نیز منعکس شده است. بافت‌های غربالی در این نمونه‌ها را می‌توان محصول اختلاط ماگمایی یا کاهش فشار طی صعود ماگما دانست (Guo and Chen, 2025). در فرایند اختلاط، تشکیل حاشیه‌های کلسیک (An بالا) در حاشیه هسته‌ها، شاهدهی بر تزریق مجدد ماگما و ورود فازهای مافیک به مخزن است که به تبلور مجدد در محیطی غنی از کلسیم منجر شده است. در مقابل، فراوانی درشت‌بلورهایی که در آنها هسته‌ها توسط حاشیه‌های سدیک (An پایین) احاطه شده‌اند، بر رخداد کاهش فشار هم‌دما دلالت دارد (Nelson and Montana, 1992; Brown et al., 2024). در این مرحله، گاززدایی نهایی و کاهش حلالیت مواد فرار در حین صعود به سطوح کم‌عمق‌تر، پایداری آنورتیت را کاهش داده و به تبلور حاشیه‌های غنی از سدیم در تعادل با مذاب منجر شده است. علاوه بر آن، منطقه‌بندی نوسانی در این درشت‌بلورها که در پروفیل‌های ترکیبی مشخص است، توالی پیچیده‌ای از تحولات ماگمایی را تأیید می‌کند (شکل ۴-B). نوسان‌های شدید مقدار An (بین ۱۰ تا ۳۰ درصد) در مرزهای ترکیبی تیز، ناشی از اختلاط ماگمایی است؛ در حالی که نوسان‌های تدریجی و محدودتر (کمتر از ۱۰ درصد)، از شرایط عدم تعادل موضعی نشأت گرفته است (Guo and Chen, 2025). از این‌رو، توده مونزونیتی سریدون، توالی پیچیده‌ای از جای‌گیری در آشیانه‌های عمیق و صعود نهایی به اعماق کمتر را تجربه کرده است؛ به‌طوری‌که تشکیل بلورهای بدون منطقه‌بندی در مراحل پایانی، نشان‌دهنده رسیدن سامانه به یک ثبات نسبی در مذاب‌های تکامل یافته است.

ارزیابی نقش فرایندهای ثانویه از جمله دگرسانی، شاخص شیمیایی دگرسانی (CIA) برای شیمی سنگ کل محاسبه شد (Nesbitt and Young, 1982). مقادیر CIA محاسبه‌شده در بازه ۴۶ تا ۴۷ و در محدوده سنگ‌های آذرین بدون دگرسانی (۳۲ تا ۵۰) است که نشان می‌دهد ترکیب کلی نمونه‌ها بدون دگرسانی است. علاوه بر این، چنان‌که در شکل ۶-A مشاهده می‌شود، نمونه‌ها اغلب در امتداد خط اتصال آلیت و آنورتیت قرار گرفته‌اند. از این‌رو، آلومینیم اضافی در بیشتر بلورهای مورد بررسی، یک ویژگی اولیه ماگمایی بوده و ناشی از فرایندهای ثانویه همچون دگرسانی نیست. این کانی‌ها روند کاهشی منظمی با افزایش Si+Al نشان می‌دهند (شکل ۶-B) که بیانگر جانشینی Al به جای Ca و Na است (Williamson et al., 2016). فرایندهای ماگمایی ثبت‌شده توسط بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون با تغییرات در محتوای آنورتیت در حد فاصل هسته تا حاشیه مشخص می‌شوند. این کانی‌ها اغلب دارای بافت غربالی و منطقه‌بندی هستند. با توجه به اینکه محتوای آنورتیت (An) در پلاژیوکلاز تحت تأثیر دمای تبلور، فشار، ترکیب مذاب و محتوای H₂O است (Sisson and Grove, 1993; Panjasawatwong et al., 1995; Ustunisik et al., 2014; Brown et al., 2024)، تغییرات محتوای آنورتیت در بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی می‌تواند بیانگر اطلاعات ارزشمندی از تاریخچه مخزن ماگمای سازنده باشد. افت ناگهانی محتوای An در حد فاصل هسته و حاشیه که در برخی از نمونه‌ها مشاهده می‌شود، با روند معمول تبلور تفریقی همخوانی ندارد و نشان‌دهنده تغییر ناگهانی در شرایط تبلور است (Namur et al., 2020; Brown et al., 2024). حاشیه‌های دارای An پایین‌تر در برخی نمونه‌ها می‌تواند نشان‌دهنده نقش تبلور از یک مذاب تکامل یافته با نسبت CaO/Na₂O کمتر، دمای پایین‌تر و یا محتوای پایین H₂O ناشی از خروج H₂O از این مذاب در حین صعود به سمت سطح و یا تأثیر هم‌زمان هر دو فرایند باشد (Brown et al., 2024). با این حال، تحلیل جامع داده‌های شیمی کانی‌ها، ابعاد گسترده‌تری از این



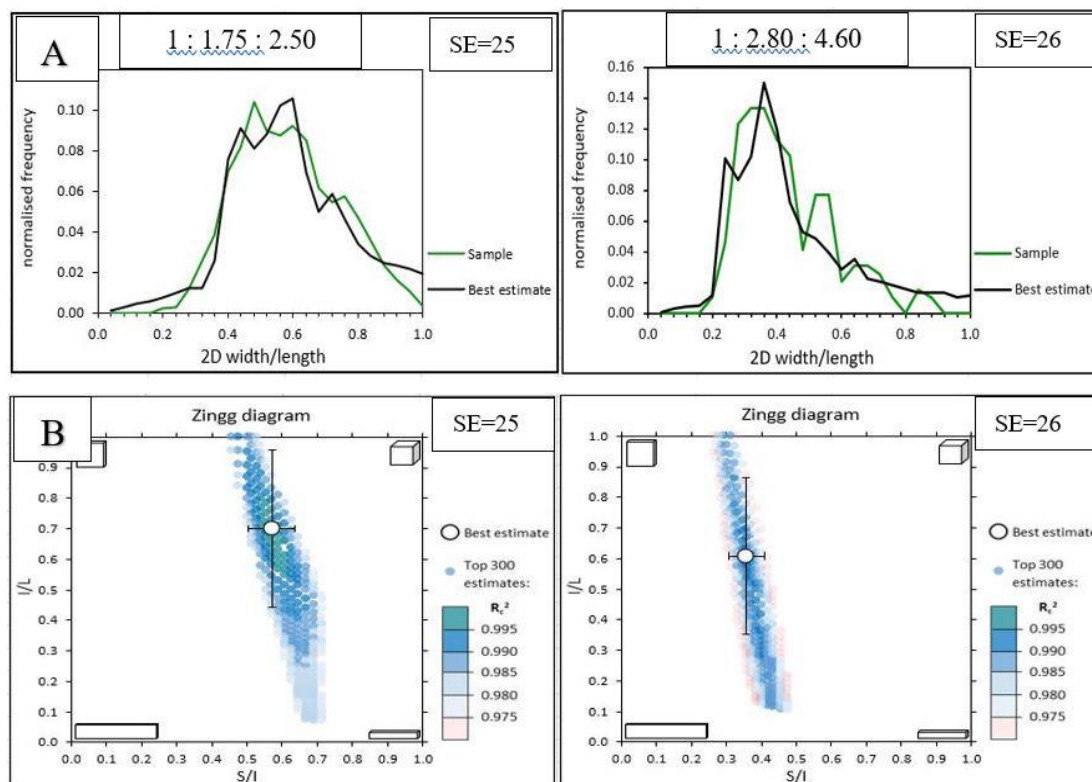
شکل ۶. A: تعیین شدت دگرسانی بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ در مقابل SiO_2 و B: تعیین ساختار بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار $\text{Al}+\text{Si}$ در مقابل $\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$

Fig. 6. A: Determining the intensity of alteration of plagioclase crystals of the Seridune monzonite intrusive body in the $\text{CaO}+\text{Na}_2\text{O}+\text{K}_2\text{O}$ versus SiO_2 diagram, and B: Determining the structure of plagioclase crystals of the Seridune monzonite intrusive massif in the $\text{Al}+\text{Si}$ versus $\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ diagram

شکل بلور

تخته‌ای هستند (شکل ۷-B). این تنوع در شکل بلورهای پلاژیوکلاز نشان‌دهنده تغییر شرایط ترمودینامیکی محیط تبلور است. بلورهای تخته‌ای در فروچالیدگی بالا و نرخ رشد بیشتر لبه‌های صفحه‌ای نسبت به سطوح جانبی بلور شکل گرفته‌اند (Higgins, 2006). افزایش فروچالیدگی با تغییر شدید پتانسیل شیمیایی محیط تبلور به کاهش نرخ انتشار مواد اولیه به سمت بلور منجر می‌شود. از این رو، وجه بلورشناسی (۰۱۰) پلاژیوکلاز، نسبت به سایر وجوه، واکنش‌پذیری کمتری نسبت به تغییرات پتانسیل شیمیایی سطحی داشته و به تشکیل بلورهای تخته‌ای منجر می‌شود (Higgins, 2006). در مقابل، کاهش فروچالیدگی ناشی از آزاد شدن گرمای نهان تبلور به کاهش گرادیان شیمیایی و افزایش سرعت انتشار مواد اولیه منجر می‌شود. از این رو، کاهش نرخ رشد ترجیحی لبه‌ها به تشکیل بلورهای کشیده از جمله تیغه‌ای منجر شده است.

شکل بلورها، توسط شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تبلور ماگما کنترل می‌شود. بر این اساس، بررسی دقیق شکل بلور می‌تواند اطلاعات ارزشمندی از شرایط حاکم بر محیط تبلور ارائه دهد. نمودار زینگ بر اساس نسبت ابعاد بلورها نقش مهمی در تعیین شکل بلورها دارد. در این نمودار، بلورها به دسته‌های هم‌بعد، منشوری، تخته‌ای و تیغه‌ای تقسیم می‌شوند. شکل‌های پیچیده‌ای مانند اسفرولیت‌ها، دندریت‌ها و بلورهای دم‌چلچله‌ای به دلیل ساختار پیچیده و عدم امکان اندازه‌گیری دقیق، در این طبقه‌بندی قرار نمی‌گیرند. به طور معمول، شکل بلورها متناسب با محیط رشد و اندازه بلورها تغییر می‌کند (Kostov and Kostov, 1999). شکل بلورهای پلاژیوکلاز در سنگ‌های پلوتونیک مانند آنورتوزیت، گابرو، دیوریت و گرانودیوریت، تابعی از ترکیب مذاب و شرایط تبلور است (Higgins, 1991). بلورهای پلاژیوکلاز در توده مونزونیتی مورد بررسی به شکل‌های تیغه‌ای و



شکل ۷. A. هیستوگرام‌های فراوانی در برابر نسبت 2D Width/Length نمونه‌های اندازه‌گیری شده از توده مونزونیتی سریدون (خط سبز)، به همراه بهترین برازش که توسط نرم‌افزار Shapecalc رسم شده (خط سیاه) و همچنین نسبت‌های ابعادی پیشنهادی، ارائه شده‌اند، B: شکل بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی سریدون در نمودار زینگ با استفاده از برنامه Shapecalc ارائه شده توسط منگلر و همکاران (Mangler et al., 2022)

Fig. 7. A: Frequency versus 2D Width/Length histograms of the measured samples from the Seridune Monzonite (green line) are presented, along with the best-fit shape drawn by the Shapecalc software (black line) and the proposed aspect ratios, B: Shape of plagioclase crystals in the Seridune Monzonite, represented in the Zingg diagram using the Shapecalc program as provided by Mangler et al. (2022)

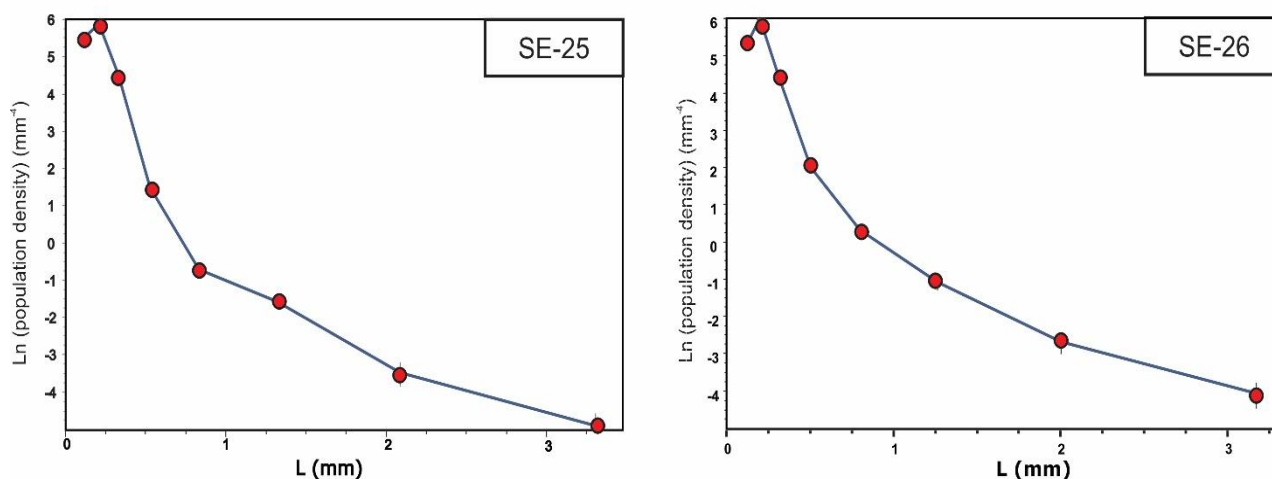
پراکندگی اندازه بلور

(et al., 2021). نمودارهای نیمه لگاریتمی توزیع اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون (شکل ۸)، از روندی غیر خطی برخوردارند که بیانگر تبلور چند مرحله‌ای ماگمای سازنده است. بافت پورفیریتهیک با زمینه میکروولیتی و شواهد بافتی دیگر از جمله منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی تبلور چندمرحله‌ای ماگما را تأیید می‌کند. بلورهای درشت پلاژیوکلاز در مراحل اولیه تبلور در اعماق زیاد تشکیل شده‌اند و بیانگر تبلور اولیه ماگما در محفظه ماگمایی عمیق هستند. در مقابل، زمینه میکروولیتی مشاهده شده می‌تواند ناشی از تبلور طی

نمودارهای پراکندگی اندازه بلور، بیانگر حقایقی از فرایندهای سینتیکی تبلور هستند؛ به طوری که، روند خطی این نمودارها بیانگر تبلور پیوسته و پایدار سامانه ماگمایی است (Higgins and Roberge, 2007). در این شرایط، تشکیل سنگ طی یک فرایند تبلور ماگمایی ساده همراه با کاهش تدریجی دمای مذاب رخ می‌دهد (Higgins, 2016). انحنای شکستگی در نمودارهای CSD، بیانگر عملکرد فرایندهای ماگمایی متنوع و پیچیدگی روند تبلور است (Kamaci and Altunkaynak, 2019; Boraiaha)

(سمت راست نمودار)، تقعری رو به پایین نشان می دهند. این الگو در سامانه‌های ماگمایی نزدیک به تعادل مانند توده‌های ماگمای سیلیسی حجیم متداول است و بر فرایند درشت‌شدگی بافتی دلالت دارد (Bindeman, 2003; Inanli and Huff, 2009; Yang, 2012). این فرایند زمانی رخ می‌دهد که بلورها برای مدت طولانی در دمای نزدیک به دمای لیکوئیدوس قرار گیرند. در این شرایط، نرخ هسته‌زایی صفر است؛ اما نرخ رشد برای بلورهای بزرگ‌تر از اندازه بحرانی بالاست. این الزاماً به معنای ثابت بودن دما نیست، بلکه بیانگر فروچائیدگی پایین و دمای بالاتر از دمای انجماد است. درشت‌شدگی بافتی بدون هرگونه تغییر در ترکیب کلی سنگ بر توزیع اندازه بلورها مؤثر است. بنابراین فقط با تحلیل‌های دقیق بافت‌شناسی قابل شناسایی است (Yang, 2011; Higgins, 2012).

صعود و افزایش فروچائیدگی بلورها بر اثر کاهش فشار یا خروج سیالات باشد (Renjith, 2014; Hamzah et al., 2018). نمودارهای رسم‌شده در بلورهای درشت (سمت چپ نمودار)، تقعری رو به بالا نشان می‌دهند که بیانگر عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی است (Higgins, 1996; Brugger and Hammer, 2010). منطقه‌بندی نوسانی، بافت‌های پوئی‌کلپتیک و غربالی (Tsuchiyama, 1985; Renjith, 2014) مشاهده شده در نمونه‌های مورد بررسی عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی و تغییرات فیزیکوشیمیایی طی تبلور ماگما را تأیید می‌کند. تزریق ماگمای جدید و اختلاط ماگما باعث تبلور تدریجی و طولانی مدت بلورها در مخزن عمیق شده است (Gualda et al., 2004; Pamukcu et al., 2012; Higgins, 2016; Seitz et al., 2024). شرایط پایدار و نرخ سردشدن آهسته در این مخزن، فرصت کافی را برای رشد بلورها فراهم کرده است. نمودارها، در بلورهای کوچک‌تر



شکل ۸. نمودار نیمه لگاریتمی چگالی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون

Fig. 8. Semi-Logarithmic diagrams of the population density of plagioclase crystals in the monzonitic intrusive body of the Seridune porphyry copper deposit

قرار می‌دهد. از این‌رو، در منطقه مورد بررسی، تزریق ماگمای جدید یا وقوع اختلاط ماگمایی باعث افزایش نرخ هسته‌زایی و افزایش چگالی جمعیتی (تعداد بلور در واحد حجم) شده است. در

اندازه و فراوانی بلورها وابسته به سرعت هسته‌زایی و نرخ رشد در محیط ماگمایی است (Kretz, 1974; Hartmeier et al., 2024). هر تغییر در آنها، الگوی توزیع اندازه بلورها را تحت‌تأثیر

آورده است (Annen et al., 2005; Chiaradia and Caricchi, 2017). پایداری این شرایط، ضمن تسهیل رشد بلورهای درشت (درشت‌شدگی)، بستری مناسب برای فعالیت گرمایی و آزادسازی حجم گسترده‌ای از آب و مس به سطوح بالایی پوسته ایجاد کرده است (Chelle-Michou et al., 2017; Chiaradia and Caricchi, 2017; Park et al., 2021). حضور کانی‌های سولفیدی مس مانند پیریت، کالکوپیریت در کنار فراوانی انیدریت - که شاخصی برای شرایط اکسیدان و محتوی بالای گوگرد در ماگماست - نشان‌دهنده پتانسیل این سامانه در تمرکز مواد معدنی است (Pallister et al., 1996; Kress, 1997).

ویژگی‌های سنگ‌شناسی نمونه‌ها نظیر وجود بافت غربالی و منطقه‌بندی نوسانی همراه با نتایج حاصل از پراکندگی اندازه بلور و شیمی کانی در بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی، تکامل سنگ‌ها در یک سامانه ماگمایی باز و تحت تأثیر عملکرد فرایندهای تفریق بلوری و تزریق‌های مکرر ماگمای مافیک را تأیید می‌کند (Cao et al., 2022). مذاب‌های فلسیک حلالیت کمی برای گوگرد داشته و محتوای فلزها در آنها محدود است، بنابراین تزریق ماگمای مافیک می‌تواند نقش حیاتی در تأمین مواد معدنی ایفا کند. مذاب مافیک به دلیل حلالیت بالای گوگرد، ظرفیت زیادی برای انتقال گوگرد و فلزها از گوشته به مخزن ماگمایی دارد و تزریق حتی مقدار نسبتاً کمی از آن می‌تواند برای توجیه ذخیره گوگرد و فلز یک کانسار عظیم کافی باشد (Hattori et al., 2001).

بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی مورد بررسی در نمودار $\text{Ca}+\text{Na}+\text{K}$ در مقابل $\text{Si}+\text{Al}$ ، روندی بینابین بردارهای $\text{AlAl}_3\text{SiO}_8$ و $[\text{Si}_4\text{O}_8]$ نشان می‌دهند (شکل ۶-B) که این روند، مشابه با روند پلاژیوکلازهای مرتبط با سامانه‌های ماگمایی کانه‌زا و مذاب‌های پورفیری آبدار است (Williamson et al., 2016). همچنین شاخص Al^* ، بلورهای پلاژیوکلاز مورد بررسی، اغلب برابر با یک و یا اندکی کمتر از آن است و فقط تعداد

مقابل، در مراحل پایانی انجماد، کاهش نرخ هسته‌زایی با افت قابل توجه چگالی جمعیتی همراه بوده که بیانگر کاهش فعالیت تبلور و نزدیک‌شدن سامانه به تعادل حرارتی است. داده‌های تجربی نشان می‌دهند که در سامانه‌های ماگمایی، سرعت سردشدن به طور مستقیم با نرخ رشد بلورهای پلاژیوکلاز مرتبط است. سرعت رشد 10^{-9} mm/s تا 10^{-11} mm/s متناسب با بازه‌های زمانی مختلف سردشدن ماگما در توده‌های نفوذی است (Cashman, 1993). نرخ رشد 10^{-10} mm/s برای توده‌های آذرین نفوذی کم‌عمق تأیید شده است (Garrido et al., 2001; Cheng and Zeng, 2013). از این رو، با احتساب نرخ رشد 10^{-10} در محاسبه‌ها (Cashman, 1993)، زمان اقامت کمتر از ۱۰۰۰ سال برای بلورهای پلاژیوکلاز توده نفوذی مونزونیتی مورد بررسی به دست آمد که این مسئله می‌تواند بیانگر صعود نسبتاً سریع ماگما و استقرار آن در سطوح کم‌عمق‌تر باشد که از ویژگی‌های بارز سامانه‌های پورفیری کانه‌زاست.

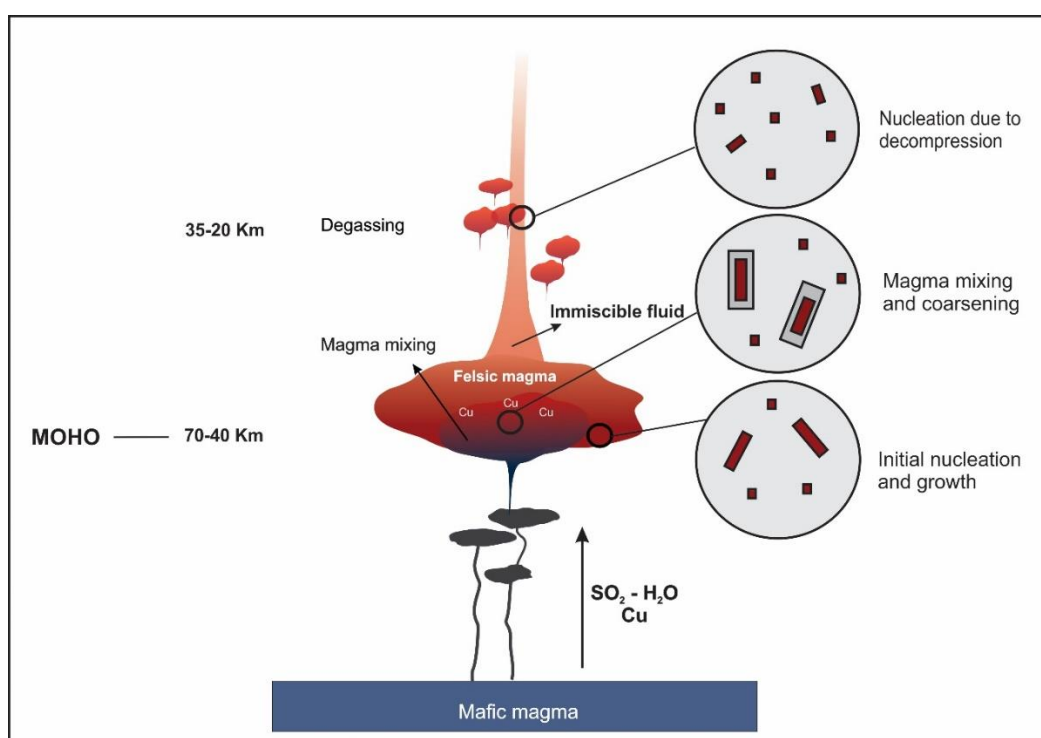
روند تکاملی و کانه‌زایی ماگمای سازنده توده مونزونیتی کانسار سریدون

سامانه‌های پورفیری کانه‌زا اغلب با جای‌گیری سنگ‌های نفوذی آبدار و اکسیدان در حاشیه‌های فعال قاره‌ای همراه هستند (Park et al., 2021). بررسی‌های سنگ‌نگاری، تحلیل کمی CSD و پروفیل‌های ترکیبی بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی سریدون، بیانگر یک روند تکاملی چندمرحله‌ای در سطوح مختلف پوسته است. تغذیه مجدد، تخلیه و فرایندهای تفریق مکرر ماگما در اعماق عمیق تا میانی (۷۰ تا ۳۰ کیلومتر)، می‌تواند به طور مؤثری محتوای آب و فوگاسیته اکسیژن ماگمای در حال تکامل را افزایش دهد؛ زیرا H_2O و Fe^{+3} در طول این فرایندها به صورت ناسازگار عمل می‌کنند (Lee et al., 2014). از این رو، در منطقه مورد مطالعه، استقرار ماگما در مخازن ماگمایی در سطوح زیرین تا میانی پوسته، شرایط ایده‌آلی را برای تولید مقادیر بالایی از ماگمای اکسیدان و غنی از آب در یک بازه زمانی قابل توجه فراهم

آن افزایش یافته و در نتیجه جدایش سیالات غنی از آب صورت می گیرد. در طول این صعود ماگمایی، فلزهای کانسار ساز به ویژه مس با تمایل شدیدی که به فاز سیال دارند، از مذاب سیلیکاتی به فاز سیال منتقل می شوند. در این مدل، باروری فلزی اولیه در مخزن عمیق، نقش تعیین کننده ای در ذخیره فلزی سیالات نهایی ایفا می کند. در ادامه، کانه زایی در منطقه در بخش های بالایی و سقف توده های نفوذی نیمه عمیق متمرکز می شود (Sillitoe, 2010; Park et al., 2021). به نظر می رسد انتقال ماگما در اعماق مختلف پوسته و عملکرد فرایندهای اختلاط و درشت شدگی بافت، نقش مهمی در تکامل و محتوای فلزی توده نفوذی مورد بررسی داشته است. از این رو، توده مونزونیتی سریدون در کنار توده نفوذی اصلی سریدون پورفیری به عنوان توده ای فرعی، بخشی از یک سامانه ماگمایی بارور است (شکل ۹).

محدودی از داده ها مقادیر بالاتر از یک نشان می دهند (شکل ۳-B). این مسئله می تواند بیانگر شرایط ماگمایی مستعد کانه زایی باشد؛ هر چند خود توده مونزونیتی به عنوان فاز اصلی کانه زا در منطقه سریدون معرفی نمی شود. علاوه بر آن، اقامت قابل توجه ماگما و عدم افت حرارتی ناشی از این تزریق ها، علاوه بر ایجاد نوسان های ترکیبی، با پایین نگه داشتن میزان فروچائیدگی، می تواند شرایط را برای رشد درشت بلورها فراهم کند که در مقیاس سنگ نگاری، با حضور بافت گلو مرو پورفیری و خوشه های کانیایی در نمونه های مورد بررسی مشخص است (Higgins, 1999; Higgins, 2011).

در سامانه ماگمایی سریدون، ماگمایی که از مخزن پوسته زیرین به سمت سطوح کم عمق تر صعود کرده است، تحت تأثیر کاهش فشار و تبلور کانی های بدون آب مانند پلاژیوکلاز، فشار فاز سیال



شکل ۹. مدل شمتائیک روند تکامل ماگمای اولیه توده مونزونیتی سریدون. این مدل الزاماً نشان دهنده مقیاس واقعی عمق نیست.

Fig. 9. Schematic model for the evolution of the initial magma of the Seridune monzonitic body. This model does not necessarily represent the actual depth scale.

نتیجه گیری

بررسی‌های سنگ‌شناسی، شیمی کانی و پراکندگی اندازه بلورهای پلاژیوکلاز توده مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون، بیانگر یک تاریخچه پیچیده تبلور ماگمایی برای این توده است. مشاهده بافت پورفیریتیک با زمینه میکرولیتی در نمونه‌های مورد بررسی نشان‌دهنده تبلور چند مرحله‌ای در اعماق مختلف است. بلورهای درشت پلاژیوکلاز موجود در این توده، در مراحل اولیه تبلور و در عمق زیاد تشکیل شده‌اند. با انتقال ماگما به اعماق کمتر، شرایط فیزیکوشیمیایی محیط تغییر کرده و به تشکیل زمینه میکرولیتی و همچنین ایجاد ویژگی‌های بافتی مانند منطقه‌بندی نوسانی و بافت غربالی در درشت بلورهای پلاژیوکلاز منجر شده است. ویژگی‌های بافتی مشاهده شده بیانگر تغییر ترکیب شیمیایی مذاب طی تبلور است. با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در این پژوهش، این تغییرات احتمالاً طی عملکرد فرایند اختلاط ماگمایی صورت گرفته است. بافت غربالی و منطقه‌بندی نوسانی شاهدی بر عملکرد این فرایند در طی تشکیل توده مونزونیتی در کانسار مس پورفیری سریدون هستند. بر اساس محاسبه‌های انجام‌شده نرخ هسته‌بندی و زمان اقامت ماگما در مرحله نهایی رشد بلورها در توده مونزونیتی کانسار مس پورفیری سریدون به ترتیب $\text{mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ تا $10^{-12} \times 644 \text{ mm}^{-3}/\text{s}^{-1}$ و 668×10^{-12} تا 56 و 63 سال برآورد شد. علاوه بر این، روند نمودارهای نیمه لگاریتمی تجمعی بلورهای پلاژیوکلاز نمونه‌های مورد بررسی بیانگر آن است که تزریق ماگماهای جدید به محفظه ماگمایی به افزایش نرخ

هسته‌بندی، افزایش چگالی تراکمی و تشکیل بلورهای کوچک‌تر منجر شده است؛ در حالی که، در ادامه روند تبلور، عملکرد درشت‌شدگی به کاهش نرخ هسته‌زایی همراه با کاهش چگالی تراکمی بافتی منجر شده است که این روند می‌تواند نشان‌دهنده کاهش فعالیت تبلور و نزدیک شدن سامانه به تعادل است. در کل، این تغییرهای ترکیبی و شواهد بافتی در پلاژیوکلازهای مورد بررسی، فراتر از یک تفریق ساده بوده و بیانگر عملکرد فرایندهای کاهش فشار همراه با تزریق پالس‌های ماگمای مافیک در یک سامانه پویاست. این شرایط در کنار حضور آلومینیم اضافی با منشأ اولیه، نشان‌دهنده ظرفیت بالای سامانه برای آزادسازی سیالات کانسار ساز در مراحل پایانی صعود و جای‌گیری تلقی می‌شود.

تعارض منافع

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

قدردانی

این پژوهش با حمایت مالی معاونت پژوهشی دانشگاه شهید باهنر کرمان و شرکت ملی صنایع مس ایران انجام شده است. از این‌رو، نویسندگان نهایت سپاس خود را از سازمان‌های مربوطه اعلام می‌نمایند. همچنین صمیمانه از سردبیر محترم و داوران گرامی نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای نظرهای سازنده و پیشنهادهای ارزشمندشان که به بهبود این مقاله کمک کرد، تشکر می‌کنند.

1. CSD
2. EMPA
3. WDS
4. BSE

References

- Abedi, M., Kashani, S.B.M., Norouzi, G.H. and Yousefi, M., 2017. A deposit scale mineral prospectivity analysis: A comparison of various knowledge-driven approaches for porphyry copper targeting in Seridune, Iran. *Journal of African Earth Sciences*, 128: 127–46. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2016.09.028>
- Abedi, M., Torabi, S. and Norouzi, G., 2013. Application of fuzzy AHP method to integrate geophysical data in a prospect scale, a case study: Seridune copper deposit. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*. 54(2): 145–164. <https://doi.org/10.4430/bgta0085>
- Aghazadeh, M., Hou, Z., Badrzadeh, Z. and Zhou, L., 2015. Temporal–spatial distribution and tectonic setting of porphyry copper deposits in Iran: constraints from zircon U–Pb and molybdenite Re–Os geochronology. *Ore Geology Reviews*, 70: 385–406. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2015.03.003>
- Al'meev, R. and Ariskin, A., 1996. Mineral-melt equilibria in a hydrous basaltic system: computer modeling. *Geochemistry International*, 34(7): 563–573. Retrieved March 10, 2025 from https://www.researchgate.net/publication/281130750_MineralMelt_Equilibria_in_a_Hydrous_Basaltic_System_Computer_Modeling
- Annen, C., Blundy J. and Sparks R., 2005. The genesis of intermediate and silicic magmas in deep crustal hot zones. *Journal of Petrology*, 47 (3): 505–539. <https://doi.org/10.1093/petrology/egi084>
- Ariskin, A.A., Frenkel, M.Y., Barmina, G.S. and Nielsen, R.L., 1993. Comagmat: a Fortran program to model magma differentiation processes. *Computers and Geosciences*, 19(8): 1155–1170. [https://doi.org/10.1016/0098-3004\(93\)90020-6](https://doi.org/10.1016/0098-3004(93)90020-6)
- Armstrong, J.T., 1988. Quantitative analysis of silicate and oxide materials: comparison of Monte Carlo, ZAF, and phi-rho-z procedures. In *Microbeam Analysis — 1988*, San Francisco Press, San Francisco, CA, pp. 239–245.
- Babazadeh, S., D'Antonio, M., Raeisi D., Furman, T., Santosh, M., Di Renzo, V., Klotzli, U., Choi, S.H., Ghalamghash, J., Cottle, J.M. and Plain, R.M., 2024. Geochemical and Sr–Nd–Hf isotopic evidence for Cenozoic partial melting of mantle beneath Natanz, Central Iran. *Lithos*, 468–469: 107489. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2024.107489>
- Bamorovat, M., Dargahi, S., Arvin, M., Shaker, A. and Aminzadeh, M., 2024. Petrography, geochemistry, and tectonic setting of intrusive bodies of the Seridune deposit, northeast of Sarcheshmeh mine, Kerman Province, with an emphasis on Seridune porphyry intrusive body. *Petrological Journal*, 15(2): 79–104. <https://doi.org/10.22108/ijp.2024.141595.1334>
- Barzegar, H., 2007. Geology, petrology and geochemical characteristics of alteration zones within the Seridune prospect, Kerman, Iran. Ph.D. Thesis, RWTH Aachen University, Aachen, Germany, 161 pp.
- Bell, S.K., Hartley, M.E., Joy, K.H. and Pernet-Fisher, J.F., 2019. Crystal Size Distribution Analysis of Apollo 15 Mare Basalts: New Methods and Some Recommendations. 50th Lunar and Planetary Science Conference, The Woodlands, Texas, USA. Retrieved March 10, 2025 from <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019LPI....50.1789B/abstract>
- 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)
- Blundy, J. and Cashman, K., 2008. Petrologic reconstruction of magmatic system variables and processes. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*, 69(1): 179–239. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.6>
- Boraiaha, C.K., Ugarkar, A.G., Padhi, J.K., Chandan, R. and Kallapur, M.V., 2021. Genesis of the Late Archean granitoids of the northern part of the Dharwar foreland (Dharwar Craton), south India—Insights from field, crystal size distribution, thermobarometry, microgeochemical and bulk-rock geochemical studies. *Geochemistry*, 81(1): 125688. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2020.125688>
- Brown, J.R., Buisman, I., Castellanos Melendez, M.P., Dikaung, J.B., Steenssens, L.D., Edmonds, M., Ellis, B.s., Hartley, M.E., Itikarai, I., Mulina, K., Neave, D.A., Nicoli, G., Salem, L.C., Vukmanovic, Z. and McCormick Kilbride, D.A., 2024. Petrographic and geochemical evidence for a complex magmatic plumbing system beneath Bagana volcano, Papua New Guinea. *Journal of*

- Petrology, 65(7): egae065.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egae065>
- Browne, B.L., Eichelberger, J.C., Patino, L.C., Vogel, T.A., Uto, K. and Hoshizumi, H., 2006. Magma mingling as indicated by texture and Sr/Ba ratios of plagioclase phenocrysts from Unzen volcano, SW Japan. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 154(1–2): 103–116.
<https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2005.09.022>
- 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>
- Cao, K., Yang, Z.M., White, N.C. and Hou, Z.Q., 2022. Generation of the giant porphyry Cu-Au deposit by repeated recharge of mafic magmas at Pulang in eastern Tibet. *Economic Geology*, 117(1): 57–90.
<https://doi.org/10.5382/econgeo.4860>
- Cashman, K.V., 1993. Relationship between plagioclase crystallization and cooling rate in basaltic melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(1): 126–142.
<https://doi.org/10.1007/BF00320836>
- Cashman, K.V. and Marsh, B.D., 1998. Crystal size distribution (CSD) in rocks and the kinetics and dynamics of crystallization II: Makaopuhi lava lake. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 99(3): 292–305.
<https://doi.org/10.1007/BF00375363>
- Chantler, C.T., Olsen, K., Dragoset, R.A., Kishore, A.R., Kotochigova, S.A., and Zucker, D.S., 2005. X-Ray Form Factor, Attenuation and Scattering Tables (version 2.1). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD. Retrieved March 10, 2025 from <http://physics.nist.gov/ffast>
- Chelle-Michou, C., Rottier, B., Caricchi, L. and Simpson, G., 2017. Tempo of magma degassing and the genesis of porphyry copper deposits. *Scientific Reports*, 7: 40566.
<https://doi.org/10.1038/srep40566>
- Cheng, L. and Zeng, L., 2013. Nature of subvolcanic magma chambers in Emeishan province, China: evidence from quantitative textural analysis of plagioclase megacrysts in the giant plagioclase basalts. IAVCEI 2013 Scientific Assembly, Kagoshima, Japan, Abstract Vol., pp. 79. Retrieved June 09, 2026 from https://kazan.or.jp/iavcei2013/iavcei_hp/PDF/3P1_1B-O17.pdf
- Chiaradia, M. and Caricchi L., 2017. Stochastic modelling of deep magmatic controls on porphyry copper deposit endowment. *Scientific Reports* 7: 44523.
<https://doi.org/10.1038/srep44523>
- Deb, T. and Bhattacharyya, T., 2018. Interaction between felsic granitoids and mafic dykes in Bundelkhand Craton: A field, petrographic and crystal size distribution study. *Journal of Earth System Science*, 127: 102.
<https://doi.org/10.1007/s12040-018-1003-7>
- Deer, W.A., Howie, R.A., Zussman, J., 2013. An introduction to the rock-forming minerals. Mineralogical Society of Great Britain and Ireland, Middlesex, UK, 498 pp.
<https://doi.org/10.1180/DHZ>
- Ellis, B.S., Wolff, J.A., Szymanowski, D., Forni, F., Cortes-Calderon, E.A. and Bachmann, O., 2023. Cumulate recycling in igneous systems: the volcanic record. *Lithos*, 456–457: 107284.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107284>
- Garrido, C.J., Kelemen, P.B. and Hirth, G., 2001. Variation of cooling rate with depth in lower crust formed at an oceanic spreading ridge: Plagioclase crystal size distributions in gabbros from the Oman ophiolite. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 2(10).
<https://doi.org/10.1029/2000GC000136>
- Ghorbani, M., 2013. The economic geology of Iran: Mineral deposits and natural resources. Springer Dordrecht. 572 pp. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-5625-0>
- Gualda, G.A., Cook, D.L., Chopra, R., Qin, L., Anderson, Jr, A.T. and Rivers, M., 2004. Rivers M. Fragmentation, nucleation and migration of crystals and bubbles in the Bishop Tuff rhyolitic magma. *Earth and Environmental Science Transactions of the Royal Society of Edinburgh*, 95(1–2): 375–390.
<https://doi.org/10.1017/S0263593300001139>
- Guo, X. and Chen, N., 2025. Hornblende and Plagioclase Micro-Texture and Compositions: Evidence for Magma Mixing in High-Mg Adakitic Pluton, North China Craton. *Minerals*. 15(6): 604. <https://doi.org/10.3390/min15060604>

- Hamzah, W., Kurniawan, I., Abdurrachman, M., Sucipta, I. and Suparka, M., 2018. Textural analysis and crystal size distribution of plagioclase from Ciremai's a'ā lava: Interpretation magmatic processes and crystallization time. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, IOP Publishing, V. 212. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/212/1/012039>
- Hartmeier, P., Lanari, P., Forshaw, J.B. and Markmann, T.A., 2024. Tracking garnet dissolution kinetics in 3D using deep learning grain shape classification. *Journal of Petrology*, 65(3): egae005. <https://doi.org/10.1093/petrology/egae005>
- Hassanzadeh, J., 1993. Metallogenic and tectonomagmatic events in the SE sector of the Cenozoic active continental margin of central Iran (Shahr e Babak area, Kerman Province). Unpublished Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, 204 pp.
- Hattori, K.H. and Keith, J.D., 2001. Contribution of mafic melt to porphyry copper mineralization: evidence from Mount Pinatubo, Philippines, and Bingham Canyon, Utah, USA. *Mineralium Deposita*, 36 (8): 799–806. <https://doi.org/10.1007/s001260100209>
- Higgins, M.D., 1991. The origin of laminated and massive anorthosite, Sept Iles layered intrusion, Quebec, Canada. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 106: 340–354. <https://doi.org/10.1007/BF00324562>
- Higgins, M.D., 1996. Crystal size distributions and other quantitative textural measurements in lavas and tuff from Egmont volcano (Mt. Taranaki), New Zealand. *Bulletin of Volcanology*, 58(2): 194–204. <https://doi.org/10.1007/s004450050135>
- 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. *Geological Society, London, Special Publications*, 168: 207–219. <https://doi.org/10.1144/gsl.sp.1999.168.01.14>
- Higgins, M.D., 2000. Measurement of crystal size distributions. *American Mineralogist*, 85(9): 1105–1016. <https://doi.org/10.2138/am-2000-8-901>
- Higgins, M.D., 2006. Quantitative textural measurements in igneous and metamorphic petrology. Cambridge university press. Canada, 260 pp. <https://doi.org/10.1017/cbo9780511535574.009>
- Higgins, M.D., 2011. Textural coarsening in igneous rocks. *International Geology Review*, 53(3–4): 354–376. <https://doi.org/10.1080/00206814.2010.496177>
- Higgins, M.D., 2016. Quantitative investigation of felsic rock textures using cathodoluminescence images and other techniques. *Lithos*, 277: 259–268. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.05.006>
- 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>
- Higgins, M.D., Voos, S. and Vander Auwera J., 2015. Magmatic processes under Quizapu volcano, Chile, identified from geochemical and textural studies. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 170: 51. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1209-5>
- Housh, T.B. and Luhr, J.F., 1991. Plagioclase-melt equilibria in hydrous systems. *American Mineralogist*, 76(3–4): 477–492. Retrieved March 10, 2025 from https://msaweb.org/AmMin/AM76/AM76_477.pdf
- Inanli, F.O. and Huff, W.D., 2009. Quartz crystal size distribution of the Ordovician Millbrig K-bentonite. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 184(3–4): 285–291. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2009.04.007>
- Johannes, W., Koepke, J. and Behrens, H., 1994. Partial melting reactions of plagioclases and plagioclase-bearing systems. In: I. Parsons (Editor), *Feldspars and their Reactions*. Springer, Dordrecht, pp. 161–194. https://doi.org/10.1007/978-94-011-1106-5_4
- Kamaci, Ö. and Altunkaynak, Ş., 2019. Magma chamber processes and dynamics beneath northwestern Anatolia: Insights from mineral chemistry and crystal size distributions (CSDs) of the Kepsut volcanic complex (NW Turkey). *Journal of Asian Earth Sciences*, 181: 103889. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.103889>
- Kan Iran Exploration Company, 2007. Geological

- map of Seridune area, NICICO. scale 1:1500.
- Kazemi Mehrnia, A., Rasa, I., Alirezaei, S., Asadi, H. and Karami, J., 2010. Alteration mapping at saridoon porphyry copper prospect using short wave infrared spectrometry (PIMA), ASTER satellite image and XRD. 20(79): 3–12. <https://doi.org/10.22071/gsj.2018.54987>
- Klein, J., Mueller, S.P. and Castro, J.M., 2017. The influence of crystal size distributions on the rheology of magmas: New insights from analog experiments. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*, 18(11): 4055–4073. <https://doi.org/10.1002/2017GC007114>
- Kostov, I. and Kostov, R.I., 1999. Crystal habits of minerals. Pensoft Publishers and Prof. Marin Drinov Academic Publishing House, Sofia, 415 pp.
- Kress, V., 1997. Magma mixing as a source for Pinatubo sulphur. *Nature*, 389(6651): 591–593. <https://doi.org/10.1038/39299>
- Kretz, R., 1974., Some models for the rate of crystallization of garnet in metamorphic rocks. *Lithos*, 7(3): 123–131. [https://doi.org/10.1016/0024-4937\(74\)90025-5](https://doi.org/10.1016/0024-4937(74)90025-5)
- Kumar, A.A. and Ashok, C., 2024. Geochemistry and mineral chemistry of the armoor granitoids, eastern dharwar craton: implications for the redox conditions and tectono-magmatic environment. *Acta Geochimica*. 43(1): 110–133. <https://doi.org/10.1007/s11631-023-00647-1>
- Lee, C.T.A., Lee, T.C. and Wu, C.T., 2014. Modeling the compositional evolution of recharging, evacuating, and fractionating (REFC) magma chambers: Implications for differentiation of arc magmas. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 143: 8–22. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2013.08.009>
- Lofgren, G., 1980. Experimental studies on the dynamic crystallization of silicate melts. In: R.B. Hargraves, (Editor), *Physics of Magmatic Processes*. Princeton University Press, Princeton, pp. 487–551. <https://doi.org/10.1515/9781400854493.487>
- Mangler, M.F., Humphreys, M.C., Wadsworth, F.B., Iveson, A.A. and Higgins, M.D., 2022. Variation of plagioclase shape with size in intermediate magmas: a window into incipient plagioclase crystallisation. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 177(6): 64. <https://doi.org/10.1007/s00410-022-01922-9>
- 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. <https://doi.org/10.1007/BF00375362>
- Marsh, B.D., 1998. On the Interpretation of Crystal Size Distributions in Magmatic Systems. *Journal of Petrology*, 39(4): 553–599. <https://doi.org/10.1093/petroj/39.4.553>
- McInnes, B., Evans, N., Belousova, E. and Griffin, W., 2003. Porphyry copper deposits of the Kerman belt, Iran: timing of mineralization and exhumation processes. *Science Research Report*, Australia CSIRO, 41 pp.
- Moy, A., Fournelle, J., Nachlas, W., Dungan, M., Locock, A., Bullock, E., Bullock, E., Donovan, J., Cathey, H., Allaz, J. and Von der Handt, A., 2023. On the Importance of Including all elements in the EPMA matrix correction. *Microscopy and Microanalysis*, 29(1): 855–856. <https://doi.org/10.1093/micmic/ozad067.424>
- Nakamura, M. and Shimakita, S., 1998. Dissolution origin and syn-entrapment compositional change of melt inclusion in plagioclase. *Earth and Planetary Science Letters*, 161(1–4): 119–133. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(98\)00144-7](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(98)00144-7)
- Namur, O., Montalbano, S., Bolle, O. and Vander Auwera, J., 2020. Petrology of the April 2015 eruption of Calbuco volcano, southern Chile. *Journal of Petrology* 61(8): egaa084. <https://doi.org/10.1093/petrology/egaa084>
- Nelson, S.T. and Montana, A., 1992. Sieve-textured plagioclase in volcanic rocks produced by rapid decompression. *American Mineralogist*, 77(11–12): 1242–1249. Retrieved March 10, 2025 from <https://pubs.geoscienceworld.org/msa/ammin/article-abstract/77/11-12/1242/42641/Sieve-textured-plagioclase-in-volcanic-rocks?redirectedFrom=fulltext>
- Nesbitt, H.W. and Young, G.M., 1982. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, 299: 715–717. <https://doi.org/10.1038/299715a0>
- Ngonge, E.D., Archanjo, C.J. and Hollanda M.H.B.M., 2013. Plagioclase crystal size distribution in some tholeiitic mafic dykes in Cabo Frio–Buzios, Rio de Janeiro, Brazil. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 255: 26–42. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2013.01.009>

- Ou, O., Qian S.P., Hoernle, K., Carvalho, B.B., Zi, F., Wang, K., Zhang, L., Liu, J.Y. and Liao, J., 2024. Magmatic processes within the plumbing system of the ultraslow-spreading southwest Indian ridge: constraints from olivine, plagioclase and melt inclusions. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(3): 20. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02098-0>
- Pallister, J.S., Hoblitt, R.P., Meeker, G.P., Knight, R.J. and Siems, D.F., 1996. Magma Mixing at Mount Pinatubo: Petrographic and Chemical Evidence from the 1991 Deposits. In: C.G. Newhall and R.S. Punongbayan, (Editors), *Fire and Mud: Eruptions and Lahars of Mount Pinatubo*, Philippines. Philippine Institute of Volcanology and Seismology, and University of Washington, Seattle, 1126 pp.
- Pamukcu, A.S., Gualda, G.A. and Anderson, J.R., 2012. Crystallization stages of the Bishop Tuff magma body recorded in crystal textures in pumice clasts. *Journal of Petrology*, 53(3): 589–609. <https://doi.org/10.1093/petrology/egr072>
- Panjasawatwong, Y., Danyushevsky, L.V., Crawford, A.J. and Harris, K.L., 1995. An experimental study of the effects of melt composition on plagioclase-melt equilibria at 5 and 10 kbar: implications for the origin of magmatic high-An plagioclase. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 118: 420–432. <https://doi.org/10.1007/s004100050024>
- Park, J.W., Campbell, I.H., Chiaradia, M., Hao, H. and Lee, C.T., 2021. Crustal magmatic controls on the formation of porphyry copper deposits. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2(8): 542–557. <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00182-8>
- Pearce, T., Russell, J. and Wolfson, I., 1987. Laser-interference and Nomarski interference imaging of zoning profiles in plagioclase phenocrysts from the May 18, 1980, eruption of Mount St. Helens, Washington. *American Mineralogist*, 72(11–12): 1131–1143. Retrieved June 29, 2026 from http://www.minsocam.org/ammin/AM72/AM72_1131.pdf
- Perugini, D., Poli, G. and Valentini, L., 2005. Strange attractors in plagioclase oscillatory zoning: petrological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 149: 482–497. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0667-6>
- Pietranik, A., Koepke, J. and Puziewicz, J., 2006. Crystallization and resorption in plutonic plagioclase: implications on the evolution of granodiorite magma (Gęsiniec granodiorite, Strzelin Crystalline Massif, SW Poland). *Lithos*, 86(3–4): 260–280. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2005.05.008>
- Renjith, M., 2014. Micro-textures in plagioclase from 1994–1995 eruption, Barren Island Volcano: evidence of dynamic magma plumbing system in the Andaman subduction zone. *Geoscience frontiers*, 5(1): 113–126. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2013.03.006>
- Resmini, R.G. and Marsh, B.D., 1995. Steady-state volcanism, paleoeffusion rates, and magma system volume inferred from plagioclase crystal size distributions in mafic lavas: Dome Mountain, Nevada. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 68(4): 273–296. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(95\)00003-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(95)00003-5)
- Seitz, S., Gualda, G.A. and Harmon, L.J., 2024. On the origin of alkali feldspar megacrysts in granitoids. Part 2: evidence for nucleation and growth under magmatic conditions from crystal size distributions of the Cathedral Peak Granodiorite, California, USA. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 179(7): 70. <https://doi.org/10.1007/s00410-024-02152-x>
- Shahriari, H., Ranjbar, H., Honarmand, M. and Carranza, E.J.M., 2014. Selection of less biased threshold angles for SAM classification using the real value–area fractal technique. *Resource Geology*, 64(4): 301–315. <https://doi.org/10.1111/rge.12042>
- Sillitoe, R.H., 2000. Gold-rich porphyry deposits: Descriptive and genetic models and their role in exploration and discovery. *Reviews in Economic Geology*, 13: 315–345. <https://doi.org/10.5382/Rev.13.09>
- Sillitoe, R.H., 2010. Porphyry copper systems. *Economic Geology*, 105(1): 3–41. <https://doi.org/10.2113/gsecongeo.105.1.3>
- Singer, B.S., Dungan, M.A. and Layne, G.D., 1995. Textures and Sr, Ba, Mg, Fe, K, and Ti compositional profiles in volcanic plagioclase: clues to the dynamics of calc-alkaline magma chambers. *American Mineralogist*, 80(7–8): 776–798. <https://doi.org/10.2138/am-1995-7-819>
- Sisson, T. and Grove, T., 1993. Experimental investigations of the role of H₂O in calc-alkaline

- differentiation and subduction zone magmatism. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 113(2): 143–166.
<https://doi.org/10.1007/BF00283225>
- Slaby, E. and Götze, J., 2004. Feldspar crystallization under magma-mixing conditions shown by cathodoluminescence and geochemical modelling—a case study from the Karkonosze pluton (SW Poland). *Mineralogical Magazine*, 68(4): 561–577.
<https://doi.org/10.1180/0026461046840205>
- Smith, R.K. and Lofgren, G.E., 1983. An analytical and experimental study of zoning in plagioclase. *Lithos*, 16(2): 153–168.
[https://doi.org/10.1016/0024-4937\(83\)90012-9](https://doi.org/10.1016/0024-4937(83)90012-9)
- Tsuchiyama, A., 1985. Dissolution kinetics of plagioclase in the melt of the system diopside-albite-anorthite, and origin of dusty plagioclase in andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 89(1): 1–16.
<https://doi.org/10.1007/BF01177585>
- Ustunisik, G., Kilinc, A. and Nielsen, R., 2014. New insights into the processes controlling compositional zoning in plagioclase. *Lithos*, 200–201: 80–93.
<https://doi.org/10.1016/j.lithos.2014.03.021>
- Viccaro, M., Giacomoni, P.P., Ferlito, C. and Cristofolini, R., 2010. Dynamics of magma supply at Mt. Etna volcano (Southern Italy) as revealed by textural and compositional features of plagioclase phenocrysts. *Lithos*, 116(1–2): 77–91. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.12.012>
- Whitney, D.L. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187. <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>
- Williamson, B.J., Herrington, R.J. and Morris, A., 2016. Porphyry copper enrichment linked to excess aluminium in plagioclase. *Nature Geoscience*, 9(3): 237–241. Retrieved June 29, 2026 from
<https://www.nature.com/articles/ngeo2651>
- Yang, Z-F., 2012. Combining quantitative textural and geochemical studies to understand the solidification processes of a granite porphyry: Shanggusi, East Qinling, China. *Journal of Petrology*, 53(9): 1807–1835.
<https://doi.org/10.1093/petrology/egs034>
- Yousefi, F., Lentz, D.R. and Papadopoulou, L., 2024. Plagioclase-hosted Crystallized Melt Inclusions within Hypabyssal Volcanic Rocks of the Torud-Ahmad Abad Magmatic Belt, Iran: Analysis of Origin and Fractionation Processes. *Earth Science Research*, 13(1).
<https://doi.org/10.5539/esr.v13n1p13>
- Zieg, M. and Marsh, B., 2002. Crystal size distributions and scaling laws in the quantification of igneous textures. *Journal of Petrology*, 43(1): 85–101.
<https://doi.org/10.1093/petrology/43.1.85>
- Zingg, Th., 1935. Beitrag zur Schotteranalyse. Unpublish Ph.D. Thesis, Universität Zürich, Switzerland, 140 pp.