

Original Research Paper

Investigation and comparison of fabrics and deformation temperature in the Alvand and Boroujerd granites, Sanandaj–Sirjan zone

Leili Izadi Kian^{*1}, Seyedeh Razieh Jafari², Nasrin Piri¹, Shima Rabbani¹, and Lida Sadeghi¹

¹ Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

² Department of Geology, Payame Noor University, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 October 04

Accepted: 2026 June 28

Available online: 2026 September 23

Keywords:

Alvand

Boroujerd

Fabric

Magma

Tectonics

Sanandaj–Sirjan

ABSTRACT

The Alvand and Boroujerd intrusive bodies are among the largest coeval plutons in the northwestern part of the Sanandaj–Sirjan Zone. Both bodies preserve magmatic, transitional, and solid-state fabrics, though with notable differences. In the Alvand granite, magmatic fabrics are generally well preserved across most parts, whereas in the Boroujerd granite, they are largely obliterated by overprinting solid-state fabrics. Moreover, mylonitization is much more pronounced in the Boroujerd granite than in the Alvand granite, indicating stronger overprinting by subsequent deformation. Transitional fabrics in both bodies are expressed by the occurrence of late-stage minerals within fractured domains. In the Alvand granite, although both magmatic and transitional fabrics are well preserved, mylonitization is not pervasive throughout the entire pluton, suggesting that this pluton was not uniformly affected by later deformation. Field and microstructural evidence further indicate that the Alvand pluton formed within an open, dynamic, and multiphase magmatic system. In contrast, the Boroujerd pluton exhibits features of a relatively closed system, where crystallization occurred under comparatively calm conditions without significant magma flow perturbations, and deformation was mostly restricted to the solid state after complete cooling.

1. Introduction

The study of internal fabrics in plutons provides critical insights into crystallization mechanisms, deformation history, and geodynamic processes shaping the continental crust. Plutons, as crystallized remnants of magma chambers, record the complex interplay between magmatic, tectonic, and thermal influences during their solidification (Bouchez, 1997). These fabrics not only refine our

understanding of intrusive magmatism but also contribute to broader discussions on crustal evolution and tectonic regimes (Paterson et al., 1998). Examining fabrics in magmatic, transitional, and solid-state conditions can shed light on the crystallization, emplacement, and deformation of minerals throughout the geological history of these intrusions. Magmatic fabrics are primarily controlled by

* Corresponding author: Leili Izadi Kian; E-mail: l.izadi@basu.ac.ir

Citation:

Izadi Kian, L., Jafari, S. R., Piri, N., Rabbani, Sh., and Sadeghi, L., 2026. Investigation and comparison of fabrics and deformation temperature in the Alvand and Boroujerd granites, Sanandaj–Sirjan zone. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 36(3), 141, 155-172. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.550643.2226>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2026.550643.2226

 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.8.0



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

magma flow and crystal growth within a melt environment. They can record the preferred orientation of minerals formed during magma flow and preserve information about the strain field acting on the magma during the emplacement of granitic plutons (Paterson et al., 1989; Bouchez, 1997; Žák et al., 2012). Transitional fabrics represent the stage between a fully molten and a completely solid state. Solid-state fabrics, on the other hand, typically form under the influence of tectonic stresses and metamorphic processes (Vernon, 2000).

The Alvand granite (Hamadan Province) and the Boroujerd granite (Lorestan Province) are among the most significant intrusive bodies within the Zagros Fold Belt and the Sanandaj–Sirjan Zone, both having been affected by various magmatic and metamorphic processes. A comparative study of fabrics in these granites can reveal differences in their geodynamic settings and the conditions of their formation. While the Alvand and Boroujerd plutons have previously been investigated from petrological, mineralogical, and geochronological perspectives, this study focuses on a systematic comparison of their fabric characteristics.

2. Research methodology

To achieve the objectives of this study, field surveys were conducted at 15 stations within the Alvand pluton and 11 stations within the Boroujerd pluton. Measurements included the orientation of enclaves, alkali feldspars, foliations, and mylonitic lineations. Oriented sampling was carried out in both plutons for microstructural analysis. More than 50 oriented samples from the Alvand granite and over 25 from the Boroujerd granite were collected. Thin sections were prepared perpendicular to foliation and parallel to stretching lineation, and subsequently analyzed under a petrographic microscope.

3. Results

In the Alvand pluton, all three types of fabrics—magmatic, transitional, and solid-state—are observed. The magmatic fabric is expressed by the preferred orientation of large alkali feldspar crystals (Fig. 4-a) and the alignment of enclaves, which are well preserved in most outcrops. In some parts of the Alvand pluton, particularly within the porphyritic granite unit, the preferred orientation of large alkali feldspar crystals is clearly visible. Enclaves with diverse morphologies and compositions, such as surmicaceous, mafic microgranular, felsic microgranular, and hornfelsic types (Shakiba and Sepahi-Garou, 2021), are in places aligned parallel to the magmatic foliation, reflecting the influence of magmatic flow on their orientation. Transitional fabrics between magmatic and solid-state phases are also present in the Alvand pluton. These are represented by fractured alkali feldspar crystals filled with secondary minerals such as quartz and biotite, as well as muscovite. Such features indicate the persistence of deformation under conditions where parts of the pluton had already solidified

while others remained partially molten. The filling of fractures by late-stage magmatic minerals is interpreted as evidence for crystallization synchronous with deformation, marking a gradual transition from magmatic flow to solid-state deformation.

In the Alvand intrusive pluton, multiple lines of evidence indicate solid-state deformation, reflecting the continuation of strain after magma crystallization. In many thin sections, alkali feldspars show dynamic recrystallization and are being transformed into a fine-grained recrystallized matrix. Owing to their higher resistance compared to quartz, alkali feldspars often form porphyroclasts in mylonitic granites and serve as shear-sense indicators that record the kinematics of the shear zone. Mylonitic foliation is commonly expressed as C/S fabrics in mylonitic granites, and in some thin sections, an abundance of phyllosilicates leads to the development of pronounced C/S fabrics as well. Both fabrics are useful for determining shear sense.

Platy minerals such as muscovite and biotite exhibit undulose extinction and dynamic recrystallization, forming a mica-fish microstructure. Tourmaline commonly responds to deformation in a brittle manner, being fractured and offset by microfaults. Myrmekite, which is widespread in the Alvand pluton, occurs in both magmatic and deformational contexts. Extensive deformation twins in plagioclase crystals also provide evidence of solid-state deformation and are frequently observed in the Alvand granite. Flame perthite and microcline structures are additional solid-state microstructures that occur abundantly in the Alvand granite.

In the Boroujerd granite, magmatic, transitional, and solid-state fabrics are all present. Evidence of magmatic fabrics includes the occurrence of enclaves and the preferred orientation of alkali feldspar crystals. Compared to the Alvand pluton, however, magmatic fabrics are much less well preserved in Boroujerd, as they are largely overprinted by stronger solid-state fabrics. Only in limited areas could enclaves and alkali feldspar orientations be identified as magmatic lineations. Based on orientation measurements, the dominant alignment of enclaves and alkali feldspar megacrysts indicates a magma flow direction toward the southeast (SE). Alkali feldspar zoning extinction is observed much more frequently in the Boroujerd granite than in Alvand, a feature formed under magmatic conditions. Some plagioclase porphyroclasts display fractures filled by quartz, biotite, and occasionally K-alkali feldspar, which represent transitional fabrics and point to the presence of melt during deformation (Bouchez, 1997; Vernon et al., 2004). In the studied plagioclase crystals, fractures are often filled by fine-grained aggregates of quartz and alkali feldspar, which may reflect deformation in the presence of fluids (Bell and Johnson, 1989; Bouchez, 1997).

Solid-state deformation fabrics are particularly strong in the Boroujerd granite. These include dynamic recrystallization of alkali feldspars, reduction of grain-boundary areas, abundant deformation twins in plagioclase, and quartz recrystallization characterized

by bulging, subgrain rotation, and grain-boundary migration. Additional microstructures such as microcline and flame perthite are also observed. Under solid-state conditions, platy minerals such as biotite and muscovite show undulose extinction, bent twins, and dynamic recrystallization, forming mica-fish structures, which can be used as shear-sense indicators. Mylonitic foliation and stretching lineations are developed across large portions of the Boroujerd granite, confirming extensive solid-state deformation of the pluton. The mylonitic foliation trends predominantly NW–SE and NE–SW, dipping mainly toward the NE and SE, with fewer planes dipping SW. Based on the porphyroclast-to-matrix ratio, most rocks in the study area classify as protomylonites to mylonites. The intensity of deformation decreases from west to east and from NW toward SE, with abundant mylonitic fabrics in the northern and northwestern parts of the Boroujerd granite. Transitional features between these fabric types are also recognized in different parts of the pluton. Stretching lineations exhibit low plunges toward NW, NE, and SW.

4. Discussions

Analyzing whether a magmatic system is open or closed plays a key role in understanding the petrogenetic evolution of intrusive bodies. In closed systems, once magma is emplaced in a magma chamber, it evolves without mass exchange with the surrounding environment, undergoing processes such as fractional crystallization, crystal settling, and degassing (Bowen, 1928; Ghiorso and Sack, 1995). The chemical composition of the magma evolves internally and gradually. As a result, crystals in such systems typically have the opportunity for orderly growth, producing well-organized fabrics with weak preferred orientations. In contrast, open systems are characterized by the influx of new magma pulses (recharge), magma mixing and mingling, assimilation of wall rocks, and degassing (Huppert and Sparks, 1988; Bachmann and Bergantz, 2004; Bohron et al., 2014). Such dynamic conditions lead to complex fabrics, textural heterogeneities, abnormal zoning in crystals, mafic enclaves, coeval dikes, and deformation during crystallization (Wiebe et al., 1997; Perugini and Poli, 2005).

A comparison of the Alvand and Boroujerd granites in the Sanandaj–Sirjan Zone indicates that, although both were emplaced within a similar geodynamic regime, their structural and fabric characteristics reflect different evolutionary pathways. The Boroujerd granite shows clear evidence of a relatively closed system: primary magmatic fabrics are largely obliterated, crystals exhibit strong polysynthetic and concentric twins, and crystal zoning is relatively regular. Moreover, solid-state deformation is intense, and mylonitic fabrics are extensively developed. These features suggest slow cooling and orderly crystallization within a static, closed magma chamber (Glazner et al., 2004). In contrast, the Alvand granite displays classic features of an open magmatic

system. Well-preserved magmatic and submagmatic fabrics, along with strong preferred orientation of alkali feldspar crystals, indicate crystallization concurrent with active magma flow. In most parts of the pluton, magma flow was non-conformal with the host rock boundaries, often cutting across them, indicating non-centered flow simultaneous with tectonic stresses. Such features can only be explained in open, dynamic environments where magma is influenced by external stresses (Paterson et al., 2011). One important indicator of an open system in Alvand is the presence of coeval mafic dikes. These dikes, often spatially and temporally associated with the felsic pluton, document the intrusion of mafic magma pulses during crystallization. Injection of such magmas not only stimulates recrystallization but also facilitates magma mixing and mingling (Wiebe et al., 1997; Perugini and Poli, 2005). Mafic enclaves with reaction rims, complex zoning in phenocrysts, and felsic–mafic hybrid textures clearly indicate that the Alvand granite formed under intense magmatic dynamics. Rounded, elongated, or haloed enclaves provide direct evidence of mingling, whereas unstable zoning or reversely zoned alkali feldspars suggest magma mixing. Solid-state deformation in Alvand is also significant, though less intense than in Boroujerd. Nevertheless, the continuity between magmatic, submagmatic, and solid-state phases indicates that deformation occurred progressively and synchronously with cooling (Bachmann and Bergantz, 2004).

5. Conclusion

A comparative study of the Alvand and Boroujerd granites in the Sanandaj–Sirjan Zone reveals that, despite emplacement within a similar geodynamic environment, the two plutons experienced distinct deformation and strain histories. The Boroujerd granite underwent more intense tectonic stresses, leading to the obliteration of primary magmatic fabrics, advanced zoning extinction, and extensive development of mylonitic fabrics. In contrast, the Alvand granite experienced milder deformation, preserving magmatic and transitional fabrics more effectively. These differences likely reflect variations in the plutons' positions within the Sanandaj–Sirjan Zone and their exposure to different tectonic events over time. Submagmatic and transitional evidence in both plutons indicates that no significant pause occurred between magmatic and solid-state phases. Continuous deformation during cooling is observed only in areas with high strain rates, such as where magma was injected into shear zones. The findings show that the Alvand granite, in addition to magmatic and transitional fabrics, also preserves all key evidence of solid-state deformation. Therefore, both plutons formed and evolved in a ductile environment, but with differing intensity and distribution of strain phases. Specifically, Alvand exhibits stronger deformation during the magmatic phase, whereas Boroujerd shows greater solid-state deformation.

بررسی و مقایسه فابریک ها و دمای دگرشکلی در توده های نفوذی الوند و بروجرد، پهنه سنندج-سیرجان

لیلی ایزدی کیان^{*}، سیده راضیه جعفری^۱، نسرین پیری^۱، شیمای ربانی^۱ و لیدا صادقی^۲

^۱ گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

^۲ گروه زمین شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

چکیده

توده های نفوذی الوند و بروجرد از بزرگ ترین توده های هم سن، در شمال باختر پهنه سنندج-سیرجان هستند. هر دو توده فابریک های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد را با تفاوت هایی شایان توجه در خود حفظ کرده اند. در توده نفوذی الوند، فابریک ماگمایی به خوبی در بیشتر بخش ها حفظ شده است؛ اما در توده نفوذی بروجرد، فابریک ماگمایی بیشتر به سبب تاثیر فابریک حالت جامد از بین رفته است. از سوی دیگر، میلونیتی شدن توده نفوذی بروجرد بسیار آشکارتر از گرانیته الوند است، که گویای تغییر شکل های شدید می باشد. شواهد فابریک انتقالی در هر دو توده به صورت حضور کانی های تاخیری در قسمت های شکسته شده مشاهده می شود. بررسی شواهد صحرایی و میکروسکوپی نشان می دهند که توده نفوذی الوند در یک سیستم ماگمایی باز، پویا و چند مرحله ای تشکیل شده است، اما توده نفوذی بروجرد ویژگی های یک سیستم بسته تر را دارد که در آن تبلور در شرایط به نسبت آرام و بدون آشفستگی جریان ماگما صورت گرفته و دگرریختی عمدتاً در فاز جامد و پس از سرد شدن کامل رخ داده است. شواهد دمای دگرشکلی در توده نفوذی الوند نسبت به توده نفوذی بروجرد دمای بیشتری نشان می دهند. علت حضور فابریک حالت جامد گسترده و هوازدگی شدید در توده نفوذی بروجرد می تواند به دلیل نزدیکی آن به زمین درز زاگرس و فعالیت های دگرشکلی شدید و گسل خوردگی در این توده باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه ها:

الوند

بروجرد

فابریک

ماگما

زمین ساخت

سنندج-سیرجان

۱- پیش نوشتار

مطالعه فابریک های داخلی در توده های آذرین درونی، بینش های ژرفی در مورد سازوکارهای تبلور، تاریخچه تغییر شکل و فرایندهای ژئودینامیکی پوسته زمین را ارائه می دهد. توده های آذرین درونی (پلوتون ها)، به عنوان بقایای متبلور اتاق های ماگمایی، تعاملات پیچیده ای را بین تاثیرات ماگمایی، زمین ساختی و حرارتی در طول جامد شدن خود ثبت می کنند (Bouchez, 1997). مطالعه فابریک های داخلی این توده ها، نه تنها اطلاعاتی در مورد ماگماتیسیم نفوذی (از نظر تاریخچه تبلور، تغییر شکل و محیط زمین ساختی پلوتون) به پژوهشگران می دهد بلکه درباره تکامل پوسته و رژیم های زمین ساختی منطقه نیز اطلاعات ارزشمندی ارائه می دهد (Paterson et al, 1989). بررسی فابریک های توده های آذرین درونی در ۳ حالت ماگمایی، انتقالی و حالت جامد می تواند به درک بهتر نحوه تبلور، جایگیری و تغییر

شکل بلورها در طول تاریخچه زمین شناسی این توده ها کمک کند. فابریک ماگمایی به طور عمده تحت تاثیر جریان ماگما و رشد بلورها در محیط مذاب شکل می گیرد. فابریک های ماگمایی نه تنها می توانند جهت یابی ترجیحی کانی ها را در ماگمای در حال جریان ثبت کنند، بلکه اطلاعاتی درباره میدان کرنش وارد بر ماگما را در هنگام جایگیری پلوتون های گرانیته، نیز حفظ می کنند (Paterson et al., 1989; Bouchez, 1997). فابریک انتقالی (submagmatic fabric) (فابریک های گذار از حالت ماگمایی به حالت جامد) نشان دهنده مرحله ای است که سنگ بین حالت کاملاً مذاب و جامد قرار دارد. حضور فابریک های انتقالی نشان می دهد بین فاز ماگمایی و جامد وقفه ای رخ نداده است (Vernon, 2000) و جایگیری توده به صورت همزمان با دگرشکلی صورت گرفته است. از سوی دیگر، پس از تبلور کامل توده آذرین درونی،

* نویسنده مسئول: لیلی ایزدی کیان؛ E-mail: l.izadi@basu.ac.ir

ماخذ نگاری:

ایزدی کیان، ل.، جعفری، س.، ر.، پیری، ن.، ربانی، ش. و صادقی، ل.، ۱۴۰۵، بررسی و مقایسه فابریک ها و دمای دگرشکلی در توده های نفوذی الوند و بروجرد، پهنه سنندج-سیرجان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۶ (۳)، ۱۴۱، ۱۵۵-۱۷۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2026.550643.2226>

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است. doi: 10.22071/gsj.2026.550643.2226

doi: 10.22071/gsj.2026.550643.2226

dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.8.0



This is an open access article under the by-nc/4.0/ License (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

فابریک حالت جامد تحت تاثیر تنش های زمین ساختی و فرایندهای دگرشکلی ایجاد می شود (Vernon, 2000). شواهد جریان ماگمایی شامل موارد زیر است (Vernon, 2000; Paterson et al, 1989): الف) جهت یابی ترجیحی بلورهای درشت کشیده (مانند فلدسپار یا هورنبلند) که دچار تغییر شکل داخلی نشده اند، ب) کج شدگی (Imbrication) بلورهای درشت (فئوکریست ها) که تغییر شکل داخلی ندارند، ج) تنش حالت جامد ناکافی در نواحی بین بلورهای جهت یافته برای امکان چرخش درشت بلورها (فئوکریست ها)، د) کشیدگی انکلاوهای میکروگرانیتی بدون تغییر شکل پلاستیک کانی ها. ه) برگ وارگی های (فولیاسیون های) جریان ماگمایی و انکلاوهای کشیده میکروگرانیتی که حول بیگانه سنگ ها (زینولیت ها) انحراف یافته اند، و) لایه بندی شلیرن در غیاب تغییر شکل پلاستیک کانی ها. این ویژگی ها با چرخش بلورها در یک محیط بسیار ضعیف تر (یعنی فاز مذاب) همخوانی دارند و در این مرحله ماگما به اندازه کافی چسبناک شده تا بتواند این هم ترازی را حفظ کند. فابریک های حالت انتقالی یا ساب ماگمایی در درصدهای مذاب پایین رخ می دهند (شاید حتی به اندازه چند درصد) بسته به کانی ها و شکل آن ها، و می تواند از طریق سازوکارهای مختلفی تشکیل شود. یکی از شواهد مهم این فابریک، پرشدگی شکستگی های بلورها با کانی های تاخیری مانند بیوتیت و کوارتز است (Paterson et al., 1998; Van der Molen and Paterson 1979).

شواهد فابریک حالت جامد شامل موارد زیر است (Paterson et al., 1989; Vernon, 2000): الف) تغییر شکل داخلی و تبلور مجدد دانه ها. ب) دنباله های تبلور مجدد یافته. ج) کشیدگی توده های تبلور مجدد یافته (مانند کوارتز و میکا). د) کاهش اندازه دانه ها. ه) لایه های ریزدانه که به صورت شبکه ای حول بقایای کمتر تغییر شکل یافته قرار گرفته اند. و) دوقلوبی در میکروکلین. ز) تشکیل میرمیکت. ح) پرتیت شعله ای. ط) بودیناز کانی های مقاوم، معمولاً با تبلور مجدد یافته کانی های دما پایین (مانند کوارتز و میکا) بین بودین ها. ی) برگ وارگی که از داخل انکلاوها عبور می کند، نه حول آن ها. ک) تنش ناهمگن با مناطق میلونیتی موضعی.

توده نفوذی الوند (واقع در استان همدان) و بروجرد (واقع در استان لرستان) از جمله توده های آذرین مهم در کمربند کوهزایی زاگرس و پهنه سندانج-سیرجان هستند که تحت تاثیر فرایندهای مختلف ماگمایی و دگرگونی قرار گرفته اند. مقایسه فابریک ها در توده های الوند و بروجرد می تواند تفاوت های ژئودینامیکی و شرایط تشکیل این دو توده نفوذی را آشکار سازد. توده های نفوذی الوند و بروجرد از جنبه های گوناگونی مانند سنگ شناسی، کانی شناسی، سن سنجی و ... توسط پژوهشگران مختلف مورد توجه قرار گرفته اند، در این پژوهش فابریک های دو توده بزرگ الوند و بروجرد مورد بررسی و مقایسه قرار می گیرد.

۳-۱-۱- سنگ شناسی توده نفوذی الوند

مطالعات مختلف و گسترده سنگ شناسی، ژئوشیمی و سن سنجی در مورد توده نفوذی الوند انجام شده است (برای مثال: Mahmoudi et al., 2018; Sepahi et al., 2018 and 2019). توده آذرین بزرگ و پیچیده الوند، با ۳ گروه سنگ شناسی شامل گروه ۱. گابرو-دیوریت-تونالیت (شکل ۲-ا)، گروه ۲. گرانیت پورفیرویدی (شکل های ۲-ب و ۲-د) و گروه ۳. لوکوگرانیت (شکل ۳-ب) است و مساحتی بالغ بر ۸۰۰ کیلومتر مربع را در بر می گیرد (Sepahi, 2008). داده های ژئوکرونولوژی U-Pb زیرکن، سن ژوراسیک میانی تا پسین (حدود ۱۶۷-۱۵۳ میلیون سال پیش) را برای این توده (جدول ۱) نشان می دهند (Shahbazi et al., 2010). نفوذ این توده در سنگ های دگرگونی ناحیه ای شامل فلیت ها و شیست ها به تشکیل یک هاله دگرگونی مجاورتی گسترده انجامیده است که با تبلور کانی های شاخصی مانند گارنت، آندالوزیت، کوردیریت و سیلیمانیت همراه است (Baharifar et al., 2004). مطالعات اخیر بر روی انواع انکلاوهای میکروگرانولار مافیک (شکل ۲-۲) و c) و شیست در توده الوند (شکیا و سپاهی گرو، ۱۴۰۰؛

۲- روش پژوهش

برای رسیدن به اهداف این پژوهش در پیمایش های صحرایی (۱۵ ایستگاه برای توده الوند و ۱۱ ایستگاه برای توده بروجرد) در نظر گرفته شد. جهت یابی انکلاوها، فلدسپارها، برگواره و خطواره میلونیتی برداشت شد و نمونه برداری جهت یافته از هر دو توده برای مطالعات میکروسکوپی انجام گردید. از نمونه های جهت یافته (بیش از ۵۰ نمونه برای گرانیت الوند و بیش از ۲۵ نمونه برای گرانیت بروجرد) به صورت عمود بر برگ وارگی و موازی خطواره کششی مقاطع نازک تهیه گردید و در آزمایشگاه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفت. علائم اختصاری کانی ها از (Whitney and Evan, 2010) اقتباس شده است.

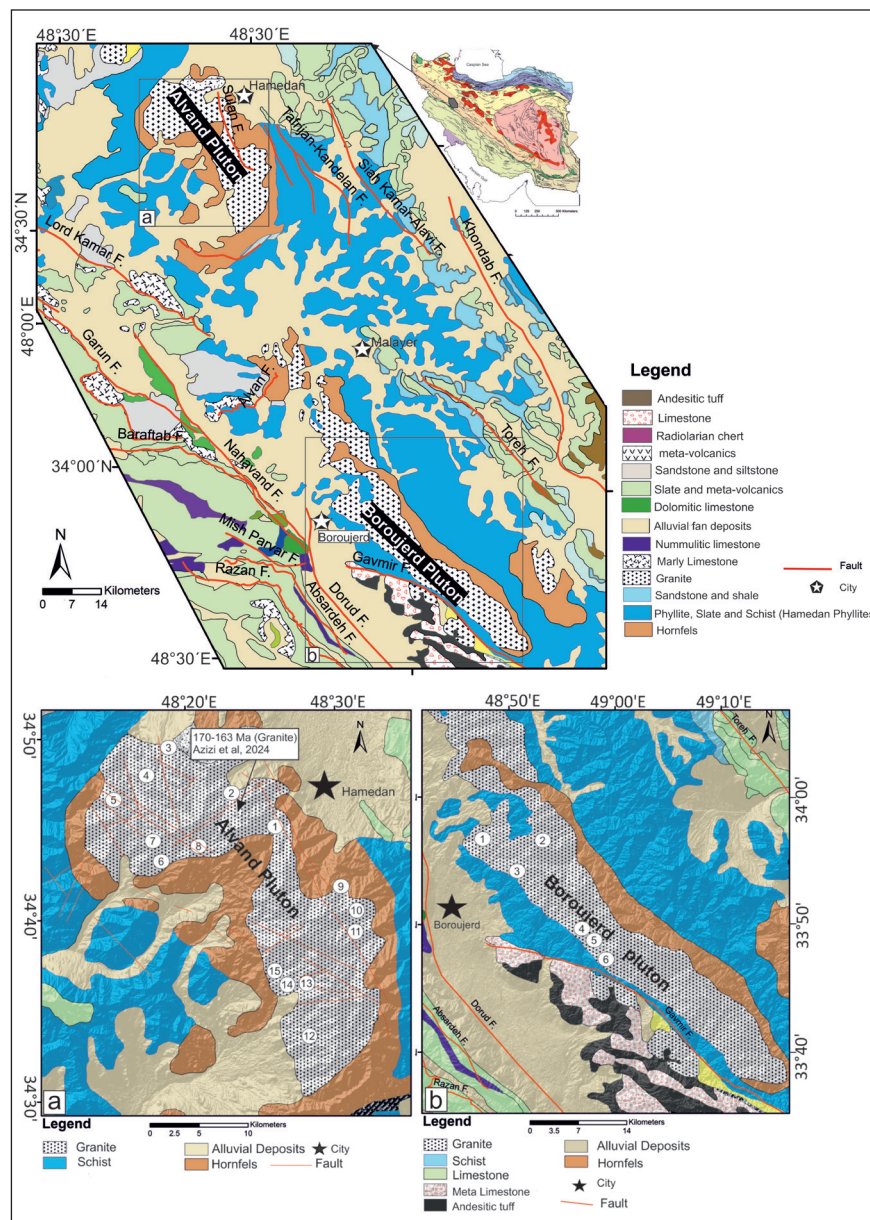
۳- داده ها و اطلاعات

۳-۱- زمین شناسی عمومی منطقه

توده های آذرین درونی الوند و بروجرد، در بخش مرکزی پهنه ساختاری سندانج-سیرجان واقع شده اند (Mohajjel et al., 2003; Berberian and Alavi, 1977).

مطالعات سن سنجی سنگ های میگماتیتهی همدان سن ۱۶۷ میلیون سال قبل را نشان می دهد (Sepahi et al., 2019).

به فرایندهای پیچیده اختلاط و آمیختگی ماگما (magma mixing/mingling) و تکامل اتافک ماگمایی اشاره دارند.



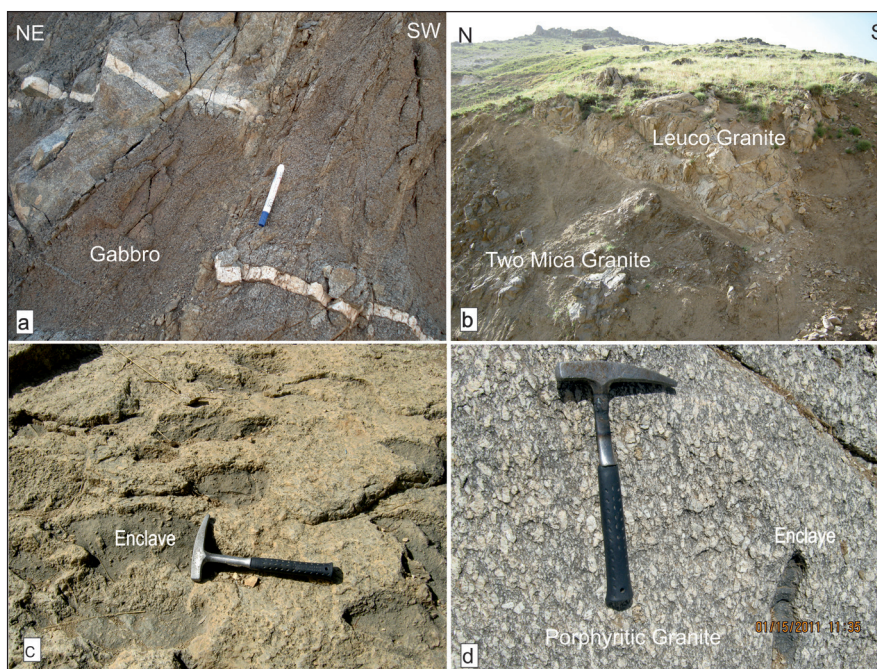
شکل ۱- نقشه زمین شناسی ساده شده توده های نفوذی الوند و بروجرد بر اساس نقشه زمین شناسی همدان، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ (ورقه ۵۹۵۷) (سبزهئی و همکاران، ۱۳۶۵) و نقشه زمین شناسی بروجرد، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ (ورقه ۵۹۵۸) (سهیلی، ۱۳۷۱). نقشه زمین شناسی توده های نفوذی الوند (a) و بروجرد (b) و محل ایستگاه های اندازه گیری این مطالعه.

Figure 1. Simplified geological map of the Alvand and Boroujerd plutons based on the Geological map of Hamadan, 1:250,000 (Sheet 5957) (sabzehei et al., 1977) and the Geological map of Boroujerd, 1:250,000 (Sheet 5958) (Soheili, 1992). Geological map of the Alvand (a) and Boroujerd (b) plutons and location of measurement stations of this study.

جدول ۱- مقایسه سن توده های الوند و بروجرد در منابع مختلف.

Table 1. Comparison of the ages of the Alvand and Boroujerd plutons according to various sources.

Boroujerd pluton	Alvand pluton
163-170 Ma (Zhang et al, 2018)	163 Ma (Shahbazi et al, 2010)
165 Ma (Mahmoudi et al, 2011)	165 Ma (Mahmoudi et al, 2011)
169-172 Ma (Ahmadi Khalaji et al, 2007)	163- 165 Ma (Chiu et al, 2013)
165 Ma (Chiu et al, 2013)	157-171 Ma (Zhang et al, 2018)
	163-170 Ma (Azizi et al, 2023)



شکل ۲- سنگ شناسی الوند: (a) گابرو در منطقه گنجنامه، (b) لوکوگرانیت و گرانیت پورفیری با مرز مشخص، (c) انکلاوهای میکروگرانولار مافیک در گرانیت، (d) گرانیت پورفیری با بلورهای درشت فلدسپار.

Figure 2. Petrography of the Alvand pluton: (a) Gabbro from the Ganjnameh area, (b) Leucogranite and porphyritic granite with a sharp contact, (c) Mafic microgranular enclaves within granite, (d) Porphyritic granite with large feldspar phenocrysts.

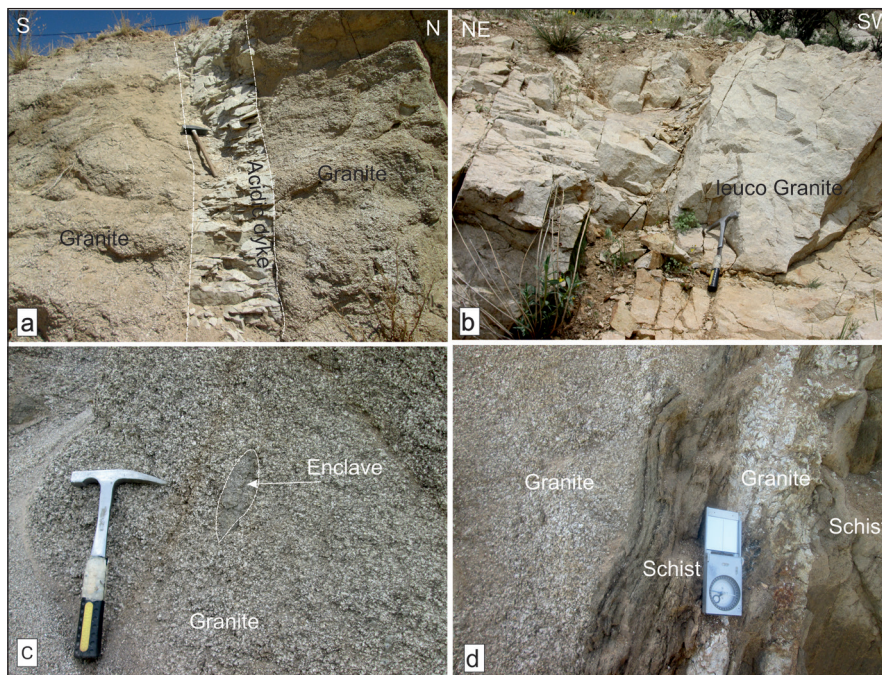
۳-۱-۲- سنگ شناسی توده نفوذی بروجرد

به داخل گرانیت افتاده است. دگرگونی مجاورتی در بروجرد با شیب های لکه دار آغاز می شود و با هورنفلس ها و میگماتیت ها پایان می یابد (Jafari et al., 2020). در این منطقه مجموعه دگرگونی ناحیه ای با طیفی از شرایط رخساره شیب سبز دیده می شود که طی نفوذ توده گرانیتوئیدی در امتداد سطح شیستوزیته آن ها یک مجموعه دگرگونی مجاورتی دمای بالا- فشار پایین حاصل شده است. سنگ های دگرگونی مجاورتی شامل یک توالی کاملی از دگرگونی درجه پایین تا بالا شامل شیب های لکه دار، هورنفلس شیب، هورنفلس و میگماتیت ها در بخش شمالی توده گرانیتوئیدی بروجرد می باشند (احمدی خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). حضور گسل ها در داخل و خارج توده سبب به هم ریختگی شدید ساختارهای و هوازدگی شدید آن شده اند و در بخش جنوبی توده به سبب فعالیت گسل ها دگرگونی مجاورتی ناقص است ولی در بخش شمالی میگماتیت ها و هورنفلس ها رخمون دارند (احمدی خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). مطالعات سن سنجی سنگ های دگرگونی درجه بالا (میگماتیت ها) سن ۱۶۰ تا ۱۷۰ میلیون سال پیش را نشان می دهد (Jafari et al., 2020).

۳-۲- فابریک ها

با توجه به باز دیده های صحرایی و مطالعات میکروسکوپی در هر دو توده نفوذی الوند و بروجرد فابریک های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می شود اما تفاوت آن ها در توزیع ناهمسان این فابریک ها است به گونه ای که در توده نفوذی الوند فابریک ماگمایی قوی تر و در توده نفوذی بروجرد فابریک حالت جامد بیشتر به چشم می خورد. فابریک انتقالی در هر دو توده وجود دارد و نشان دهنده پیوستگی دگرشکلی از حالت ماگمایی تا حالت جامد در این دو توده است. در ادامه به تفکیک توده های هر سه فابریک معرفی می شوند.

توده نفوذی بروجرد با طول ۶۰ کیلومتر و پهنای ۸-۱۰ کیلومتری در خاور و جنوب خاور شهر بروجرد قرار دارد و در مجموعه سنگ های دگرگونی ناحیه ای با درجه پایین (شامل اسلیت ها و فیلیت ها در رخساره شیب سبز) و دگرگونی مجاورتی با (دما بالا- فشار پایین) قرار دارد. این توده از ۳ واحد اصلی گرانودیوریت، مونزوگرانیت و کوارتزدیوریت تشکیل شده است. حجم اصلی توده را سنگ های گرانودیوریت (شکل های ۳- a و b) تشکیل می دهند که از نوع آهکی- قلیایی و غنی از پتاسیم بوده و از نظر درجه اشباع از آلومینیم متاآلومین تا اندکی پراآلومین می باشد. بر اساس روش U-Pb و با استفاده از کانی زیرکن مشخص شده است که ماگماتیسیم چیره در مقیاس ناحیه ای و با سن نسبی کوتاه ۱۷۱-۱۷۵ میلیون سال پیش (جدول ۱) بوده است (Masoudi et al., 2002 and 2005; Ahmadi Khalaji et al., 2007). این توده به صورت کشیده به موازات شیستوزیته چیره سنگ های دگرگونی با روند شمال باختری- جنوب خاوری رخمون دارد و دایک های اسیدی و بازی زیادی در زمان های مختلف در آن نفوذ کرده اند (شکل ۳- a). درون این توده بزرگ توده های نفوذی کوچکی دیده می شوند که به طور عمده دارای ترکیب کوارتزدیوریتی بوده و گاهی توده های بسیار لوکوکرات نیز در آن رخمون دارند. توده های گرانیتوئیدی موجود در منطقه مورد مطالعه دارای انکلاوهای گوناگونی است که بیشتر در فازهای مافیک تر و به ویژه در قسمت های حاشیه ای مشاهده می شوند و اندازه آن ها از چند سانتی متر تا چند متر متغیر است و شکل آن ها از حالت تقریباً زاویه دار تا کاملاً گرد شده تغییر می کند ولی به طور کلی اشکال تقریباً بیضوی چیره هستند (شکل ۳- c) (احمدی خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). مرز گرانیت بروجرد با شیب ها در بسیاری از بخش ها آشکار است و رگه هایی از توده به داخل شیب نفوذ کرده (شکل ۳- d) و گاهی قطعاتی از سنگ میزبان جدا شده و



شکل ۳- سنگ شناسی گرانیت بروجرده: (a) دایک آپلیتی درون گرانیت میلونیته، (b) لوکو گرانیت، (c) انکلاوهای جهت یافته درون گرانیت، (d) همبری شیس و گرانیت بروجرده.

Figure 3. Petrography of the Boroujerd granite: a) Aplitic dyke within mylonitic granite, b) Leuco granite, c) Oriented enclaves within granite, d) Contact between schist and the Boroujerd granite.

خان خطواره ماگمایی با شیب کم تا متوسط به سمت شمال خاور و جنوب باختر میل دارند. خطواره ماگمایی در منطقه وهنا با شیب متوسط تا زیاد به سمت خاور، جنوب خاور و به سمت باختر میل دارند. در منطقه قاسم آباد خطواره ماگمایی به سمت جنوب باختر شیب کم تا متوسط میل دارند و موازی همبری است. انکلاوهای منطقه کهنوش به سمت شمال باختر و جنوب خاور با شیب کم میل دارند و موازی همبری هستند. در منطقه وردآورد خطواره ماگمایی به سمت جنوب خاور تا جنوب تغییر می کند و شیب آن کم تا متوسط است. در نزدیکی منطقه شهرستانه فلدسپارها تقریباً در ۲ جهت خاور تا جنوب خاور و جنوب باختر تا باختر میل دارند و شیب آن ها کم تا متوسط است و همچنین انکلاوها نیز روند خاوری-باختری نشان می دهند و موازی همبری هستند و اندازه آن ها کوچک است.

در توده الوند، فابریک انتقالی میان فاز ماگمایی و حالت جامد نیز مشاهده می شود که از آن جمله می توان به شکستگی بلورهای فلدسپار و پرشدگی آن ها با کانی های ثانویه مانند کوارتز، بیوتیت (شکل ۴- c) و مسکوویت (شکل ۴- d) اشاره کرد. این ویژگی ها نشان دهنده تداوم دگرشکلی در شرایطی هستند که بخشی از توده هنوز نیمه جامد بوده و بخشی دیگر وارد فاز جامد شده است. پرشدگی شکستگی ها با کانی های دیرزای ماگمایی، نشانه ای از تبلور هم زمان با تغییر شکل و گذار تدریجی از جریان ماگمایی به دگرشکلی در حالت جامد به شمار می رود (Vernon, 2000).

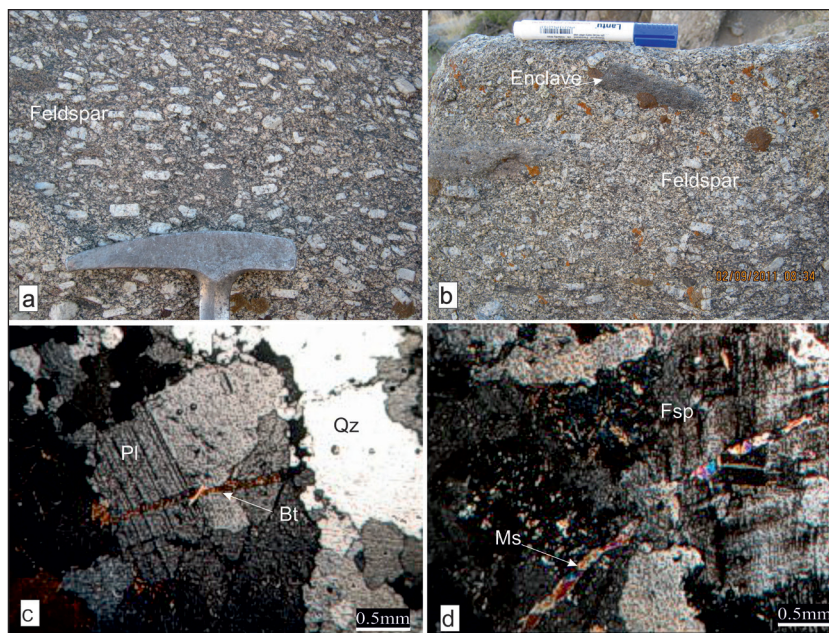
در توده نفوذی الوند، شواهد متعددی از دگرشکلی در حالت جامد مشاهده می شود که بیانگر تداوم تغییر شکل پس از تبلور ماگما هستند. در بسیاری از مقاطع میکروسکوپی فلدسپارهایی مشاهده می شوند که دچار تبلور مجدد دینامیکی شده اند و در حال تبدیل به زمینه نرم دانه ریز هستند (شکل ۵- a). فلدسپارها با توجه به مقاومت بیشتری که نسبت به کوارتز دارند، بیشتر در گرانیت های میلونیته ساختار پورفیروکلاست را تشکیل می دهند و به عنوان نشانگر سوی برش نوع حرکت پهنه برشی را نشان می دهند (شکل های ۵- b و c). برگ واریگی میلونیته اغلب به صورت

۳-۲-۱- فابریک های توده نفوذی الوند

در توده نفوذی الوند هر ۳ فابریک ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می شوند (شکل ۴). فابریک ماگمایی به صورت جهت یابی آلکالی فلدسپارهای درشت بلور (شکل ۴- a) و جهت یافتگی انکلاوها (شکل ۴- b) در الوند به خوبی در بیشتر رخنمون ها حفظ شده است. در برخی بخش های توده الوند، به ویژه در واحد گرانیت پورفیروئیدی، جهت یابی ترجیحی فنوکریست های درشت آلکالی فلدسپار به خوبی مشاهده می شود. انکلاوها با شکل ها و ترکیبات مختلف مانند سورمیکاسه، میکروگرانولار مافیک، میکروگرانولار فلسیک و هورنفلسی (شکیبا و سپاهی گرو، ۱۴۰۰) در برخی قسمت ها موازی با برگ واریگی جریان ماگمایی قرار گرفته اند، که نشان دهنده تاثیر جریان ماگمایی بر جهت یافتگی آن ها است. ترکیب جهت یابی انکلاوها و درشت بلورهای آلکالی فلدسپار به عنوان نماینده جریان ماگما یا همان خطواره ماگمایی است. در منطقه خاکو روند کلی خطواره ماگمایی با شیب کم راستای شمال خاور- جنوب باختر را نشان می دهد که در این منطقه زاویه زیادی با مرز سنگ میزبان دارد. در منطقه سیلوار فلدسپارهای درشت بلور روند شمال باختر- جنوب خاور و انکلاوها جهت شمال باختر را نشان می دهند و شیب آن ها متوسط تا زیاد است. در منطقه سیمین انکلاوها با شیب متوسط تا زیاد به سمت خاور و جنوب خاور میل دارند. در منطقه بابا پیر خطواره ماگمایی با شیب کم تا متوسط به سمت شمال خاور و جنوب باختر میل دارند و به هر دو سمت جنوب خاور و شمال باختر میل دارند. در منطقه گنجنامه درشت بلورهای فلدسپار جهت یافتگی شمال خاور- جنوب باختر دارند و شیب آن ها کم تا متوسط است. انکلاوها هم راستا با درشت بلورهای فلدسپار شیب متوسط دارند و به سمت شمال خاور میل دارند. در مسیر امامزاده محسن فلدسپارها شیب متوسط و روند عمومی خاوری- باختری دارند. در حیدره قاضی

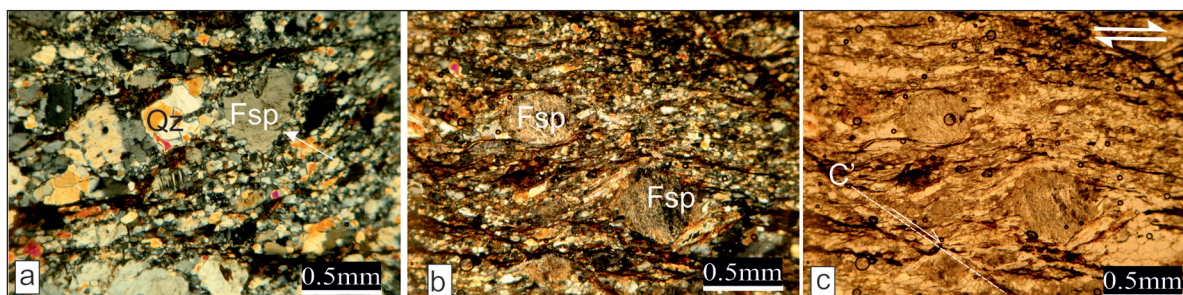
به صورت دگرشکلی (شکل ۵- g) در توده الوند تشکیل شده است. حضور ماکل‌های دگرریختی گسترده در بلورهای پلاژیوکلاز نیز از شواهد دگرشکلی حالت جامد است که به فراوانی در گرانیت الوند مشاهده می‌شود (شکل ۵- h). ساختار پرتیت‌های شعله‌ای و میکروکلین نیز از ساختارهای حالت جامد است که در گرانیت الوند فراوان تشکیل شده است (شکل‌های ۵- f و i). برگ‌وارگی میلونیتی توده نفوذی الوند در بخش‌هایی با برگ‌وارگی سنگ میزبان همخوانی دارد و در بخش‌هایی برگ‌وارگی سنگ میزبان را قطع می‌کند (شکل ۶).

فابریک C/S در گرانیت‌های میلونیتی تشکیل شده است و در برخی مقاطع دارای کانی‌های صفحه‌ای بیشتر فابریک C'/S هم تشکیل شده است (شکل ۵- c) و از هر دو فابریک برای تعیین سوی برش می‌توان استفاده کرد. کانی‌های صفحه‌ای مانند مسکوویت و بیوتیت خاموشی موجی و تبلور مجدد دینامیکی نشان می‌دهند و ساختار میکاماهی را ایجاد کرده‌اند (شکل‌های ۵- d و i). تورمالین‌ها بیشتر به صورت شکنا به دگرشکلی پاسخ داده‌اند و توسط ریزگسل‌ها شکسته و جابه‌جا شده‌اند (شکل ۵- d). میرمکیت از جمله بافت‌های متداول توده الوند است که هم به صورت ماگمایی و هم



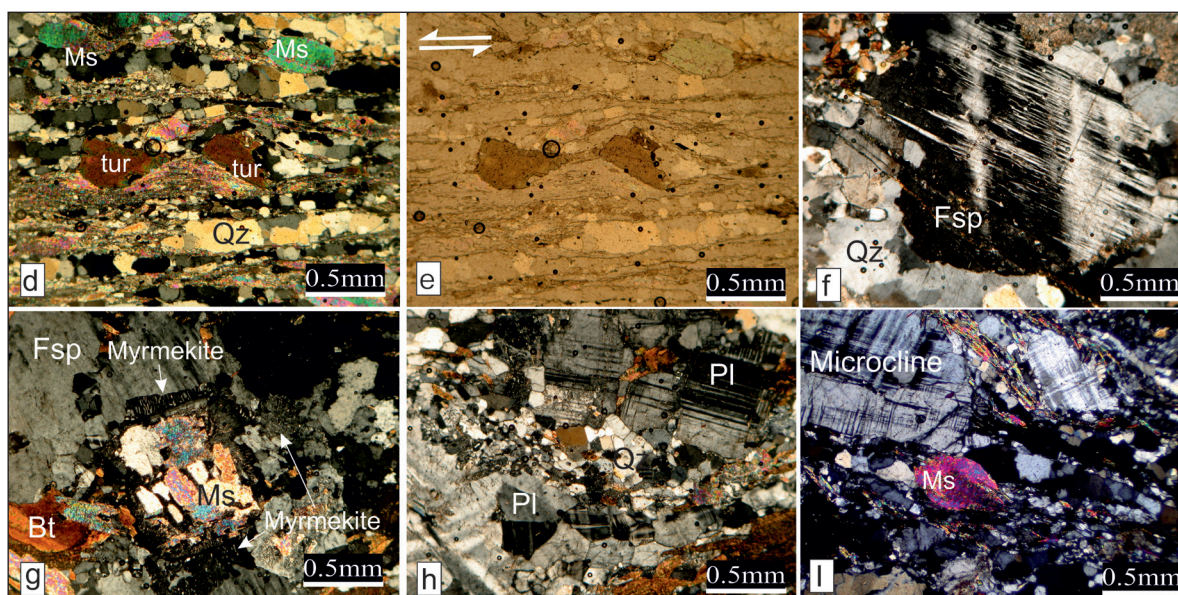
شکل ۴- شواهد فابریک‌های ماگمایی و انتقالی گرانیت الوند: جهت‌یابی ترجیحی بلورهای فلدسپار در گرانیت (a)، جهت‌یابی انکلاو شیستی و بلورهای فلدسپار در گرانیت (b)، شکستگی و پرشدگی بلور پلاژیوکلاز با بیوتیت (c)، شکستگی و پرشدگی بلور فلدسپار با مسکوویت (d).

Figure 4. Evidence of magmatic and transitional fabrics in the Alvand granite: (a) Preferred orientation of feldspar crystals in granite, (b) Orientation of schist enclaves and feldspar crystals in granite, (c) Fracturing and infilling of plagioclase crystal by biotite, (d) Fracturing and infilling of feldspar crystal by muscovite.



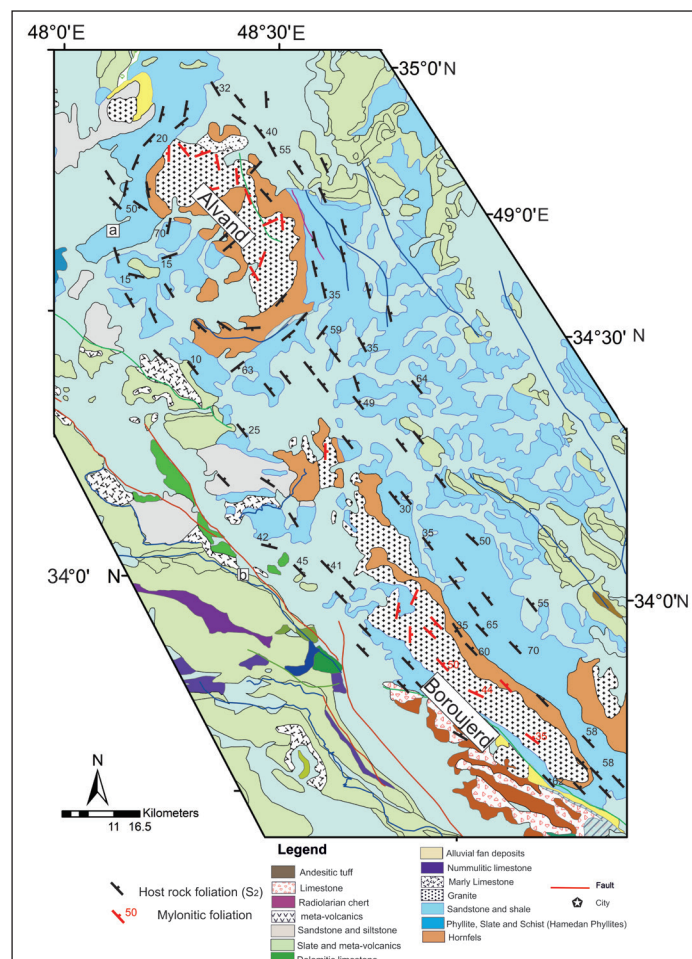
شکل ۵- شواهد فابریک‌های حالت جامد گرانیت الوند: (a) خوردگی بلورهای فلدسپار، (b) پورفایروکلاست‌های فلدسپار و فابریک C'/S با حرکت برشی راست بر،

Figure 5. Evidence of solid-state fabrics in the Alvand granite: a) Recrystallization of feldspar crystals, b and c) Feldspar porphyroclasts and C'/S fabric indicating dextral shear sense (cross-polarized and plane-polarized images),



ادامه شکل ۵- شواهد فابریک های حالت جامد گرانیت الوند: d و e) خاموشی موجی و تبلور مجدد مسکوویت و تشکیل میکا ماهی، شکستگی و جابه جایی بلورهای تورمالین با حرکت چپ بر، f) ماکل های آل بیت و پریکلین که بر اثر دگرشکلی حاصل می شوند، g) تشکیل میرمکیت دگرشکلی، h) ماکل دگرریختی در بلورهای پلاژیوکلاز، i) بلورهای میکروکلین و میکا ماهی با حرکت برشی چپ بر.

Continued from Figure 5. Evidence of solid-state fabrics in the Alvand granite: d and e) Undulose extinction and recrystallization of muscovite with mica fish formation, fracturing and displacement of tourmaline crystals showing sinistral shear sense (cross-polarized and plane-polarized images), f) Deformation-induced albite and pericline twins, g) Deformational myrmekite formation, h) Deformation twinning in plagioclase crystals, i) Microcline crystals and mica fish indicating sinistral shear sense.



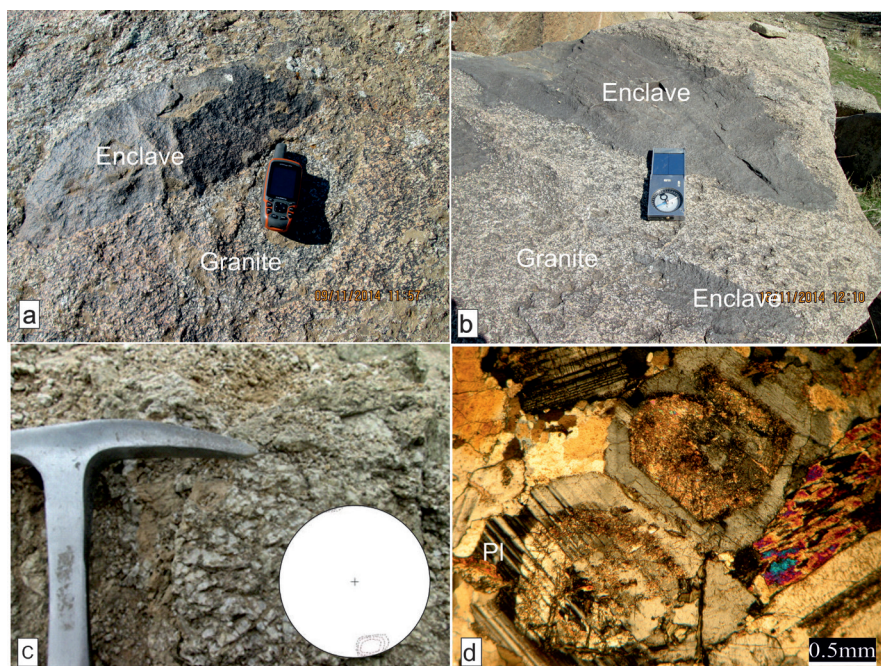
شکل ۶- ارتباط ساختاری بر گوارگی میلونیتی توده های نفوذی الوند و بروجرد با سنگ میزبان.

Figure 6. Structural relationship between the mylonitic foliation of the Alvand and Boroujerd intrusive bodies and the host rocks.

۳-۲-۲- فابریک‌های توده نفوذی بروجرد

در توده نفوذی بروجرد فابریک‌های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می‌شوند. از شواهد فابریک ماگمایی وجود انکلاوها و فلدسپارهای جهت‌یافته در گرانیت‌ها است. در این توده نسبت به توده الوند، آثار فابریک ماگمایی خیلی کمتر حفظ شده است زیرا فابریک حالت جامد بسیار قوی‌تر است و بر روی فابریک ماگمایی فرانهاد شده است. تنها در مناطق محدود انکلاو و فلدسپار قابل

برداشت به‌عنوان خط‌واره ماگمایی قابل برداشت بودند (شکل‌های ۷- a و b). با توجه به اندازه‌گیری‌ها راستای چیره انکلاوها و درشت‌بلورهای فلدسپار در منطقه جریان ماگما به سمت جنوب‌خاور (SE) است (شکل ۷- c). خاموشی منطقه‌بندی (زونینگ) فلدسپار در گرانیت بروجرد بسیار بیشتر از گرانیت الوند مشاهده می‌شود (شکل ۷- d) و این خاموشی در شرایط ماگمایی تشکیل می‌شود (Passchier and Trouw, 2005).

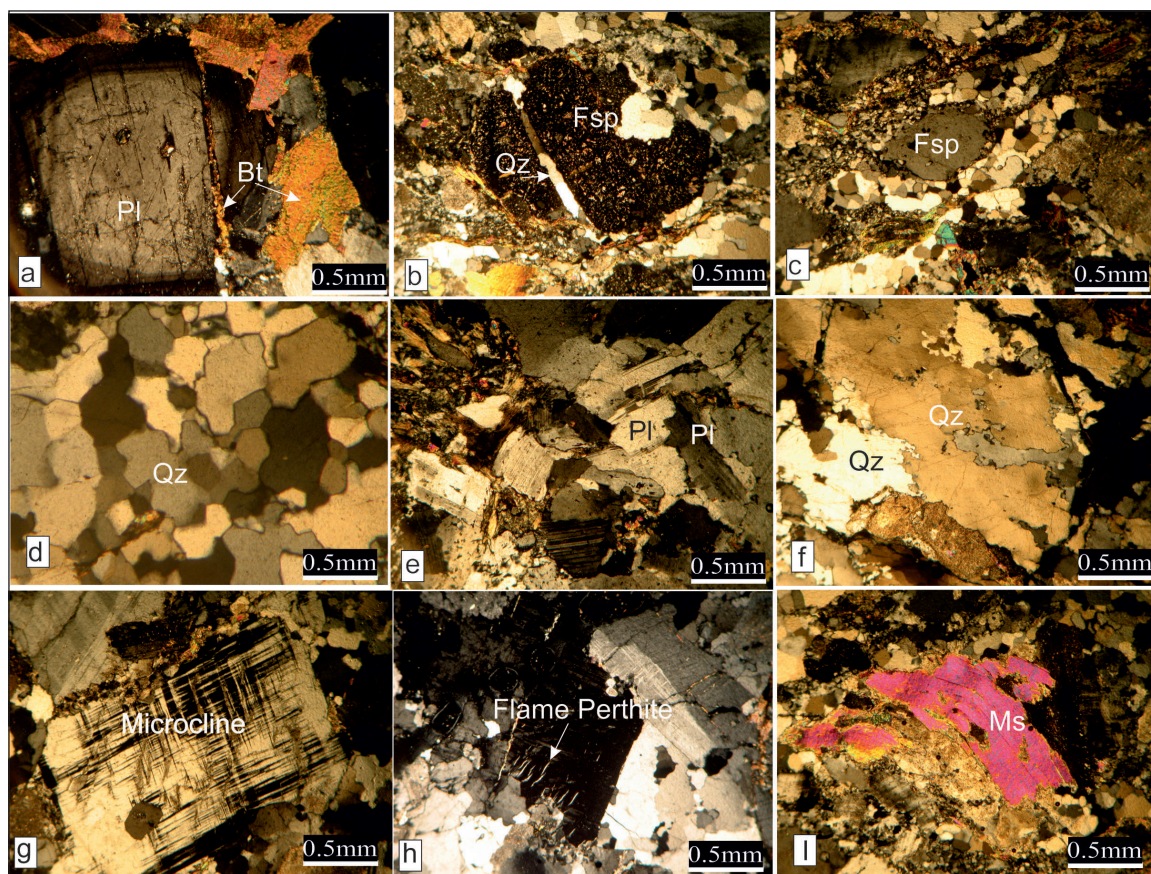


شکل ۷- فابریک‌های ماگمایی بروجرد: a و b) جهت‌یابی انکلاوهای مافیک درون گرانیت، c) کشیدگی کانی‌های فلدسپار و کن تور دیاگرام جهت‌یابی فلدسپارها، d) خاموشی منطقه‌بندی (زونینگ) فلدسپارها که برخی از پهنه‌ها دگرسان شده‌اند.

Figure 7. Magmatic fabrics of the Boroujerd granite: a and b) Orientation of mafic enclaves within the granite, c) Elongation of feldspar minerals and contour diagram of feldspar orientation, d) Zoning extinction in feldspars, with some zones altered.

از آن‌ها برای تعیین سوی برش استفاده کرد. همچنین شکل‌گیری برگ‌وارگی میلونیتی و خط‌واره کششی در بخش‌های زیادی از توده بروجرد تشکیل شده است که نشان‌دهنده تغییر شکل حالت جامد این توده است. برگ‌وارگی میلونیتی این منطقه دارای امتداد اصلی شمال باختر-جنوب‌خاور و شمال خاور-جنوب باختر است (شکل ۶) و جهت شیب برگ‌وارگی به دو سمت شمال خاور، جنوب خاور و تعداد کمی به سمت جنوب باختر هستند. از نظر نسبت آماری پورفایروکلاست به زمینه سنگ‌های میلونیتی (Passchier and Trouw, 2005)، بیشتر سنگ‌های میلونیتی منطقه در گروه پروتومیلونیت و میلونیت تقسیم‌بندی می‌شوند. شدت دگرشکلی‌ها از باختر به خاور و از شمال باختر به سمت جنوب خاور کاهش می‌یابد و در قسمت شمال و شمال باختر گرانیت بروجرد فابریک‌های میلونیتی به فراوانی یافت می‌شود (ایزدی کیان و همکاران، ۱۳۹۶) و حالت حد واسط بین این دو نیز در بخش‌های مختلف گرانیت بروجرد قابل مشاهده است. خط‌واره کششی با میل کم در جهت شمال باختر، شمال خاور و جنوب باختر میل دارد. برگ‌وارگی میلونیتی توده بروجرد تقریباً در بیشتر قسمت‌ها با برگ‌وارگی سنگ میزبان هم جهت و هم راستا است (شکل ۶).

برخی از پورفایروکلاست‌های پلاژیوکلاز در توده نفوذی بروجرد دارای شکستگی‌هایی هستند که توسط کوارتز، بیوتیت و گاهی فلدسپات پتاسیم پر شده‌اند که گویای حضور مذاب در حین دگرشکلی و شواهد انتقالی است (شکل‌های ۸- a و b) (Bouchez, 1997; Vernon et al., 2004). ترک‌های موجود در بلورهای پلاژیوکلاز نمونه‌های مورد مطالعه، توسط مجموعه‌های دانه‌ریزی از جنس کوارتز و فلدسپار پر شده‌اند که می‌تواند بر وقوع دگرشکلی در حضور سیال دلالت نماید (Bouchez, 1997; Bell and Johnson, 1989). شواهد دگرشکلی حالت جامد در توده نفوذی بروجرد بسیار قوی هستند. این شواهد شامل تبلور مجدد دینامیکی فلدسپارها (شکل ۸- c)، کاهش مساحت مرز دانه‌ها (شکل ۸- d)، ماکل دگرریختی فراوان در پلاژیوکلازها (شکل ۸- e) تبلور مجدد بلورهای کوارتز که از نوع و برآمدگی، چرخش ریزبلور (subgrain) و مهاجرت مرز دانه (شکل ۸- f) هستند. همچنین میکروکلین (شکل ۸- g)، و بافت پرتیت شعله‌ای (شکل ۸- h) در گرانیت‌ها دیده می‌شود. در اثر دگرشکلی حالت جامد بیشتر کانی‌های صفحه‌ای مانند بیوتیت و مسکوویت دچار خاموشی موجی، خمیدگی ماکل و تبلور مجدد دینامیکی شده‌اند و ساختار میکاماهی را ایجاد کرده‌اند (شکل ۸- i) و می‌توان



شکل ۸- فابریک های گرانیت بروجرد: (a) پلاژیوکلاز با ماکل منطقه بندی (زونینگ) و دارای شکستگی که با بیوتیت پر شده (فابریک انتقالی)، (b) شکستگی پلاژیوکلاز که با کوارتز پر شده (فابریک انتقالی)، (c) بلور مجدد دینامیکی فلدسپار (فابریک حالت جامد)، (d) کاهش مساحت مرز دانه در دانه های کوارتز (فابریک حالت جامد)، (e) ماکل دگرریختی پلاژیوکلاز و تبلور مجدد نوع برآمدگی بین بلورهای پلاژیوکلاز (فابریک حالت جامد)، (f) مهاجرت مرز دانه های کوارتز (فابریک حالت جامد)، (g) تشکیل میکروکلین (فابریک حالت جامد)، (h) تشکیل پرتیت شعله ای (فابریک حالت جامد)، (i) خمیدگی رخها و خاموشی موجی مسکوویت (فابریک حالت جامد).

Figure 8. Fabrics of the Boroujerd granite: a) Zoned plagioclase with twinning and fractures filled by biotite (transitional fabric), b) Fractured plagioclase filled by quartz (transitional fabric), c) Dynamic recrystallization of feldspar (solid-state fabric), d) Reduction of grain boundary area in quartz grains (solid-state fabric), e) Deformation twinning in plagioclase and bulging-type recrystallization between plagioclase crystals (solid-state fabric), f) Grain boundary migration in quartz (solid-state fabric), g) Formation of microcline (solid-state fabric), h) Development of flame perthite (solid-state fabric), i) Curved cleavages and undulose extinction in muscovite (solid-state fabric).

۳-۳- بررسی دمای دگرشکلی توده ها

۳-۳-۱- توده نفوذی الوند

در توده نفوذی الوند، شواهد متعددی از گذار پیوسته فابریک ها از حالت ماگمایی به انتقالی و سپس به دگرریختی حالت جامد مشاهده می شود که بیانگر تبلور تدریجی ماگما همزمان با تداوم دگرریختی در یک محیط همگرا است. جهت یابی ترجیحی بلورهای فلدسپار و انکلاوهای مختلف در توده، بیانگر فابریک ماگمایی و شکل گیری در دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی گراد است (Vernon et al., 2004; Paterson et al., 1998; Bouchez, 1997). حضور شکستگی بلورهای فلدسپار و پرشدگی با کانی های تاخیری، نمایانگر فاز انتقالی و شکل گیری در دماهای حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی گراد است (شکل ۹). تشکیل ماکل های دگرریختی در پلاژیوکلاز، پرتیت شعله ای، کاهش انرژی مرز دانه ها و رسیدن به زوایای نزدیک

به ۱۲۰ درجه بین دانه ها، همگی نشان دهنده گذار به دمای پایین تر (در حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی گراد) (Owona et al., 2013) و شروع فرایندهای تبلور مجدد و بازتنظیم فابریک در حالت جامد هستند. در ادامه، حضور فابریک S/C، تبلور مجدد فلدسپارها در گرانیت میلونیتی، و ساختارهای جهت یافته مسکوویت و میکا ماهی، گویای دگرریختی حالت جامد در دماهای پایین تر، بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی گراد است. این تداوم فابریک ها نشان دهنده تزریق، تبلور و سرد شدن تدریجی ماگما همزمان با دگرریختی در یک رژیم زمین ساختی فعال است (جدول ۲).

۳-۳-۲- توده نفوذی بروجرد

در توده نفوذی بروجرد، توالی منظم و قابل ردیابی از فابریک های ماگمایی تا دگرریختی حالت جامد مشاهده می شود که نشان دهنده شکل گیری و تبلور توده

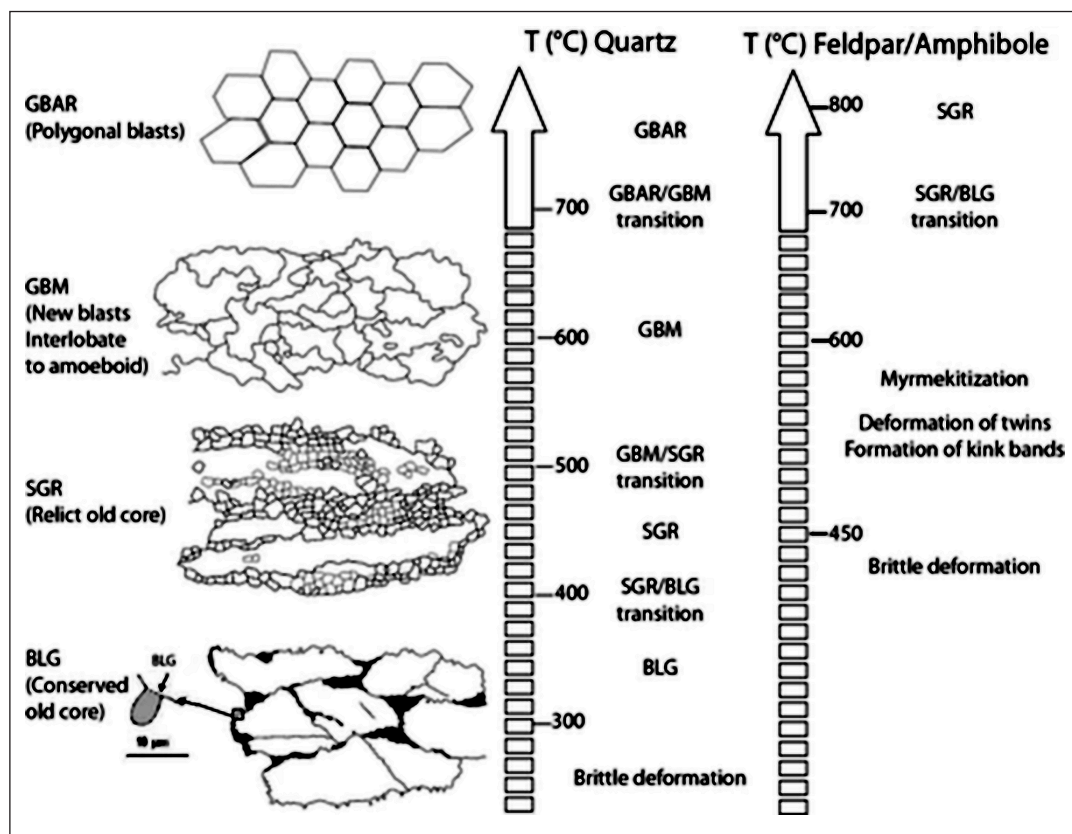
مجدد دینامیکی فلدسپار، کاهش انرژی مرز دانه در کوارتز، برآمدگی دانه ها، چرخش ریزبلورها، مهاجرت مرز دانه ها، و تشکیل میکروکلین. همچنین حضور پرتیت شعله ای و ماکل های دگرریختی در پلاژیوکلازها، نشان دهنده شرایط دمایی پایین تر (در حدود ۳۰۰-۵۵۰ درجه سانتی گراد) (Owona et al., 2013) و دگرریختی در فاز جامد است. این شواهد در مجموع گویای این هستند که گرانیب بر وجود نه تنها در شرایط زمین ساختی فعال تزریق و تبلور یافته، بلکه در مراحل پس از تبلور نیز تحت تاثیر دگرریختی حالت جامد قرار گرفته است (جدول ۲).

در یک محیط دگرریختی فعال و همزمان با سرد شدن تدریجی ماگما است. حضور ماکل های پلی سنتتیک و حلقوی در پلاژیوکلازها بیانگر فابریک ماگمایی و تبلور در دماهای بالا، حدود ۷۰۰-۸۰۰ درجه سانتی گراد است (Paterson et al., 1998; Vernon, 2004; Bouchez, 1997). شکستگی پلاژیوکلاز و پرشدگی آن با بیوتیت یا کوارتز، نشان دهنده فاز انتقالی در دمای حدود ۶۰۰-۷۰۰ درجه سانتی گراد است که در آن سنگ به حالت نیمه جامد درآمده و شکستگی ها توسط کانی های تاخیری پر شده اند. با کاهش بیشتر دما، شواهد گوناگونی از فابریک های دگرریختی حالت جامد قابل مشاهده است، از جمله خاموشی موجی بیوتیت، تبلور

جدول ۲- مقایسه فابریک های گرانیب الوند و بروجرد.

Table 2. Comparison of fabrics in the Alvand and Boroujerd granites.

Type of Evidence	Fabric type	Boroujerd Granite	Alvand Granite	Approx. Temperature (°C)
Preferred orientation of feldspars	Magmatic	Low ✓	High ✓	700-800
Zoning in plagioclase	Magmatic	High ✓	Low ✓	700-800
Fractures filled with biotite	Transitional	High ✓	Low ✓	600-700
Fractures filled with quartz	Transitional	High ✓	Low ✓	600-700
Undulose extinction in quartz	Solid-state	High ✓	High ✓	400-500
Bending and kinking of biotite/ muscovite	Solid-state	Moderate ✓	Moderate ✓	350-500
Flame perthite	Solid-state	High ✓	High ✓	400-600
Deformation twins and stepped	Solid-state	High ✓	High ✓	400-500
Dynamic recrystallization of feldspar	Solid-state	High ✓	High ✓	400-550
Quartz grain boundary migration (GBM)	Solid-state	High ✓	Moderate ✓	550-650
Subgrain rotation (SGR)	Solid-state	High ✓	Moderate ✓	350-450
Quartz bulging (BLG)	Solid-state	High ✓	Moderate ✓	Less than 350
Dynamic recrystallization of quartz	Solid-state	High ✓	Moderate ✓	350-650
Grain boundary area reduction (GBAR)	Solid-state	High ✓	Moderate ✓	More than 700
Deformation-induced myrmekite	Solid-state	Very Low ✓	High ✓	300-500
Microcline	Solid-state	High ✓	High ✓	400-500



شکل ۹- انواع تبلور مجدد دینامیکی و دمای تخمین دگرشکلی (Owona et al., 2013).

Figure 9. Types of dynamic recrystallization and estimated deformation temperatures (Owona et al., 2013).

۴- بحث

Huppert and Sparks, 1988; Bachmann and Bergantz, 2004; Bohrsen et al., 2014). پیامد چنین پویایی، شکل گیری فابریک های پیچیده، ناهمگونی های بافتی، پهنه بندی های غیرعادی در بلورها، انکلاوهای مافیک، دایک های هم زمان و شواهد دگرریختی در حین تبلور است (Wiebe et al., 1997; Perugini and Poli, 2005). گرانتیت بروجرد شواهد روشنی از یک سیستم تقریباً بسته تر نسبت به توده الوند ارائه می دهد. در این توده، با توجه به منشأ پوسته ای ماگما و فقدان سنگ های مافیک همزاد (Ahmadi Khalaji et al., 2007)، تکامل ماگما به طور عمده از طریق تفریق بلوری در یک سیستم بسته تا نیمه بسته صورت گرفته است، در حالی که حضور گابروها در الوند نشان دهنده رفتار سیستم باز و نقش پررنگ تر تزریق ماگمای مافیک است. این ویژگی ها بیانگر سرد شدن آرام و تبلور منظم در یک اتاق ماگمایی نسبتاً ایستا و بسته تر نسبت به توده نفوذی الوند است (Glazner et al., 2004). در مقابل، گرانتیت الوند مجموعه ای از شواهد کلاسیک سیستم ماگمایی باز را در خود دارد. حضور فابریک های ماگمایی و ساب ماگمایی خوب حفظ شده، همراه با جهت یابی ترجیحی قوی بلورهای فلدسپار، نشان دهنده تبلور هم زمان با جریان فعال ماگما هستند. مسیر جریان ماگما در بیشتر بخش های توده با دیواره سنگ میزبان هم راستا نبوده، بلکه آن را قطع کرده است. این وضعیت بیانگر جریان ماگمایی غیرهم مرکز و هم زمان با تنش های زمین ساختمانی است. چنین ویژگی هایی تنها در محیط های باز و پویا که در آن ماگما تحت تاثیر تنش های برونزا قرار دارد قابل توجیه هستند (Paterson et al., 2011). یکی از شواهد مهم در تایید سیستم باز در الوند، حضور دایک های بازیک هم زمان با پلوتونیسیم است. این دایک ها که بیشتر دارای ارتباط زمانی یکسان

توده های نفوذی الوند و بروجرد هر ۳ فابریک های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد را با سهم های مختلف نشان می دهند که بازتاب مستقیم شرایط ساختاری و تفاوت شدت دگرشکلی آن ها در پهنه سندانج-سیرجان است. در توده نفوذی الوند، فابریک ماگمایی به خوبی حفظ شده است، ولی فابریک حالت جامد (میلونیتی) در این توده به صورت محلی دیده می شود. در توده نفوذی بروجرد فابریک حالت جامد قوی تر است و سبب شده فابریک ماگمایی به خوبی در این توده مشاهده نشود. توده نفوذی بروجرد نسبت به توده نفوذی الوند در فاصله نزدیک تری از زمین درز زاگرس (شکل ۱) گسل اصلی زاگرس قرار دارد و این موضوع سبب شده توده بروجرد پس از تبلور نهایی تحت تاثیر کرنش های برشی شدید قرار گرفته و فابریک های حالت جامد و میلونیتی در آن به طور گسترده توسعه یابد. کشیدگی توده بروجرد در راستای امتداد کمربند کوهزایی نیز گویای کنترل قوی میدان تنش منطقه ای بر هندسه و تحول فابریک این توده نفوذی است. از سوی دیگر، تحلیل نوع سیستم ماگمایی (باز یا بسته) نقش کلیدی در درک تکامل پتروژنز توده های نفوذی دارد. در سیستم های بسته، ماگما پس از جایگیری در اتاق ماگمایی، بدون تبادل جرم با محیط اطراف، تنها تحت فرایندهایی مانند تبلور تفریقی (Fractional Crystallization)، ته نشینی بلورها، و جدا شدن گاز دچار تحول می شود (Bowen, 1928; Ghiorso and Sack, 1995). ترکیب شیمیایی مایع ماگمایی در چنین سیستمی به صورت درونی و تدریجی تغییر می یابد. در مقابل، در سیستم های باز با ورود پالس های ماگمایی جدید (recharge)، آمیختگی ماگماها (magma mixing/mingling) (شکل ۲- c)، جذب سنگ های دیواره (assimilation) (شکل ۲- f) و خروج گاز (degassing) صورت می گیرد

ژرفای بیشتر توده الوند نسبت به توده بروجرد در پهنه سندانج-سیرجان نسبت به پهنه بروجردی و تاثیرپذیری آن ها از رویدادهای زمین ساختی مختلف در طول زمان است. شواهد فابریک انتقالی در هر دو توده نشان می دهد که بین فاز ماگمایی و جامد وقفه ای رخ نداده است. پیوستگی دگرشکلی در حین سرد شدن، تنها در مناطقی با نرخ کرنش (استرین) بالا (مانند تزریق ماگما به پهنه برشی) مشاهده می شود. یافته ها نشان می دهند که گرانیته الوند نیز افزون بر فابریک های ماگمایی و انتقالی، تمام شواهد کلیدی دگرریختی حالت جامد را نیز دارد. بنابراین، هر دو توده در محیط شکل پذیر تشکیل و تکامل یافته اند، اما شدت و توزیع فازهای تغییر شکل در آن ها متفاوت است. به طور مشخص، توده الوند در فاز ماگمایی قوی تر بوده، در حالی که توده بروجرد تغییر شکل بیشتری در فاز جامد نشان می دهد. با این حال، تفاوت اصلی در توزیع و پهنه بندی کرنش (strain partitioning) است، به طوری که در توده الوند بیشترین تغییر شکل در فاز ماگمایی رخ داده، در حالی که توده بروجرد عمدتاً در فاز جامد دچار دگرریختی شده است. این مشاهدات آشکارا نشان می دهد که چگونه تعامل پیچیده بین شرایط اتاق ماگمایی، رژیم های تنش و پهنه بندی دگرریختی می تواند به الگوهای متفاوتی از سازمان یابی ساختاری در توده های گرانیته هم زمان بیانجامد. یافته های این مطالعه بر اهمیت موقعیت ساختاری و تاثیر هم زمان فرایندهای ماگماتیسم و زمین ساخت در کنترل مسیر تکامل توده های گرانیته تاکید می کند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می دانند از حمایت های مالی دانشگاه بوعلی سینا در انجام عملیات صحرایی و تهیه مقاطع میکروسکوپی صمیمانه قدردانی کنند. همچنین مراتب سپاس و قدردانی خود را از سردبیر محترم، مدیران داخلی مجله و داوران گرامی ابراز می دارند.

با توده فلسیک هستند، بیانگر ورود پالس های ماگمایی مافیک به اتاق ماگما در طول تبلور هستند (شکیبا و سپاهی، ۱۴۰۰). تزریق چنین ماگماهایی نه تنها موجب تحریک تبلور مجدد می شود، بلکه شرایط را برای اختلاط ماگما (magma mixing) یا آمیختگی (magma mingling) نیز فراهم می سازد (Wiebe et al., 1997; Perugini, 2005 and Poli). در توده نفوذی الوند، حضور انکلاوهای مافیک با مرزهای واکنشی، پهنه بندی پیچیده در درشت بلورها (فئو کریست ها) و ساختارهای آمیخته فلسیک-مافیک آشکارا نشان می دهد که این توده در نتیجه پویایی شدید ماگمایی شکل گرفته است. وجود انکلاوهای گرد، کشیده یا دارای هاله های تعاملی با میزبان فلسیک، شواهد بی واسطه ای از آمیختگی ماگمایی (Mingling) است، در حالی که پهنه بندی ناپایدار یا فلدسپارهای معکوس نشانه هایی از اختلاط ماگمایی (Mixing) هستند. از سوی دیگر، دگرریختی حالت جامد در گرانیته الوند نیز شایان توجه است، ولی شدت آن نسبت به گرانیته بروجرد کمتر است. با این حال، پیوستگی میان فازهای ماگمایی، ساب ماگمایی و جامد نشان می دهد (Bachmann and Bergantz, 2004) که دگرشکلی در الوند و بروجرد به صورت پیوسته و هم زمان با سرد شدن رخ داده است.

۵- نتیجه گیری

مقایسه فابریک های توده های نفوذی الوند و بروجرد در پهنه سندانج-سیرجان نشان می دهد که این دو توده، به رغم قرارگیری در یک محیط ژئودینامیکی مشابه، پیشینه تغییر شکل و دگرشکلی متمایزی را تجربه کرده اند. گرانیته بروجرد تحت تاثیر تنش های زمین ساختی شدیدتری قرار گرفته که به تخریب فابریک ماگمایی اولیه و تشکیل فابریک های میلونیتی گسترده انجامیده است. در مقابل، گرانیته الوند تغییر شکل های ملایم تری را متحمل شده و فابریک های ماگمایی و انتقالی در آن بهتر حفظ شده اند. این تفاوت ها احتمالاً ناشی از موقعیت متفاوت این دو توده و

کتابنگاری

- احمدی خلج، ا.، اسماعیلی، د.، ولی زاده، م.، ۱۳۸۵، خاستگاه و ویژگی های زمین ساختی توده گرانیته بروجرد (باختر ایران)، فصلنامه علوم زمین، ۱۵ (۶۰)، ۳۲-۴۷.
ایزدی کیان، ل.، صدر، ا. ح.، ربانی، ش.، ۱۳۹۶، تحلیل ساختاری گرانیته میلونیتی خاور و جنوب خاور بروجرد. پژوهش های دانش زمین، ۸ (۴)، ۱-۱۵. <https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.200>
88299.1396.8.4.1.5
سپهلی، م.، ۱۳۷۱، نقشه زمین شناسی بروجرد، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
سبزه ئی، م.، مجیدی، ب.، عمیدی، س. م.، علوی تهرانی، م.، قرشی، م.، ۱۳۶۵، نقشه زمین شناسی همدان، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.
شکیبا، س. و سپاهی گرو، ع. ا.، ۱۴۰۰، سنگ نگاری، زمین شیمی و تحلیل فرکاتال انکلاوهای مافیک توده آذرین الوند برای بررسی فرایند آمیختگی ماگمایی. پترولوژی، ۱۲ (۲)، ۷۰-۴۳.
<https://doi.org/10.22108/ijp.2021.122815.1175>

References

- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Mouthereau, F., 2005. Convergence history across Zagros (Iran): constraints from collisional and earlier deformation, International Journal of Earth Sciences, 94(3), 401-419. <https://doi.org/10.1007/s00531-005-0481-4>.
Ahadnejad, V., Valizadeh, M.V., Deevsalar, R., Rezaei-Kahkhaei, M., 2011. Age and geotectonic position of the Malayer granitoids: Implication for plutonism in the Sanandaj-Sirjan Zone, W Iran. Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie-Abhandlungen, 261, 61-75. DOI:10.1127/0077-7749/2011/0149.
Ahmadi Khalaji, A., Esmaily, D., Valizadeh, M.V., 2006. Petrology and geochemistry of the Boroujerd granitoid complex (Western Iran). Geoscience Quarterly, 15(60), 32-47. (In Persian).
Ahmadi Khalaji, A.A., Esmaily, D., Valizadeh, M.V., and Rahimpour-Bonab, H., 2007. Petrology and geochemistry of the granitoid complex of Boroujerd, Sanandaj-Sirjan Zone, Western Iran, Journal of Asian Earth Sciences, 29(5-6), 859-877. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2006.06.005>.

- Alavi, M., 1994. Tectonics of Zagros orogenic belt of Iran, new data and interpretation, *Tectonophysics*, 229(3-4), 211-238, [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Azizi, H., Daneshvar, N., Rafat, Gh., Asahara, Y., Horie, K., Takehara, M., Kon, Y., Minami, M., and Anma, R., 2024. O–Hf isotope ratios of Alvand S-type granite, western Iran, reveal crustal melting in an extensional regime, *Lithos*, 464-465, 107437. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2023.107437>.
- Bachmann, O., and Bergantz, G.W., 2004. On the origin of crystal-poor rhyolites: extracted from batholithic crystal mushes, *Journal of Petrology*, 45(8), 1565-1582. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh019>.
- Baharifar, A., Moinevaziri, H., Bellon, H., and Piqué, A., 2004. The crystalline complexes of Hamadan (Sanandaj–Sirjan zone, western Iran): metasedimentary Mesozoic sequences affected by Late Cretaceous tectono-metamorphic and plutonic events. *Comptes Rendus. Géoscience*, 336(16), 1443-1452. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.014>.
- Bell, T.H., and Johnson, S.E., 1989. The role of deformation partitioning in the deformation and recrystallization of plagioclase and K-feldspar in the Woodroffe Thrust mylonite zone, central Australia, *Journal of Metamorphic Geology*, 7(2), 151-168. <https://doi.org/10.1111/j.1525-314.1989.tb00582.x>.
- Berberian, M., and Alavi, M., 1977. Structural analyses of Hamedan metamorphic tectonites: A paleotectonic discussion, *geological survey Iran*, 40, 263-279.
- Berberian, M., King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences*, 18(2), 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>
- Bohrson, W.A., Spera, F.J., Ghiorsio, M.S., Brown, G.A., Creamer, J.B., and Mayfield, A., 2014. Thermodynamic model for energy-constrained open-system evolution of crustal magma bodies undergoing simultaneous recharge, assimilation and crystallization: the magma chamber simulator, *Journal of Petrology*, 55(9), 1685-1717. <https://doi.org/10.1093/petrology/egu036>.
- Bouchez, J.L., 1997. Granite is never isotropic: an introduction to AMS studies of granitic rocks, In: *Granite: from segregation of melt to emplacement fabrics*. Springer Netherlands, Dordrecht, 17 p. DOI: 10.1007/978-94-017-1717-5_6.
- Bowen, N.L., 1928. *The Evolution of the Intrusive Rocks*. Princeton University Press, Princeton, 332 p.
- Esna-Ashari, A., Tiepolo, M., Valizadeh, M.V., Hassanzadeh, J., and Sepahi, A.A., 2012. Geochemistry and zircon U–Pb geochronology of Aligoodarz granitoid complex, Sanandaj–Sirjan zone, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 43,11–22. DOI:10.1016/j.jseae.2011.09.001.
- Chiu, H–Y., Chung, S–L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Khatib, M.M., and Iizuka, Y., 2013. Zircon U–Pb age constraints from Iran on the magmatic evolution related to Neotethyan subduction and Zagros orogeny. *Lithos*, 162, 70– 87. DOI:10.1016/j.lithos.2013.01.006.
- Ghalamghash, J., Mirnejad, H., Rashid, H., 2009. Mixing and mingling of mafic and felsic magmas along the Neo-Tethys continental margin, Sanandaj-Sirjan zone, NW Iran: A case study from the Alvand pluton. *Neues Jahrbuch für Mineralogie-Abhandlungen*, 79-93. <https://doi.org/10.1127/0077-7757/2009/0133>.
- Ghasemi, A., Talbot, C. J., 2006. A new tectonic scenario for the Sanandaj–Sirjan Zone (Iran). *Journal of Asian Earth Sciences*, 26(6), 683-693. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2005.01.003>.
- Ghiorsio, M.S., and Sack, R.O., 1995. Chemical mass transfer in magmatic processes IV. A revised and internally consistent thermodynamic model for the interpolation and extrapolation of liquid–solid equilibria in magmatic systems at elevated temperatures and pressures, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 119(2), 197-212. <https://doi.org/10.1007/BF00307281>.
- Glazner, A.F., Bartley, J.M., Coleman, D.S., Gray, W., and Taylor, R.Z., 2004. Are plutons assembled over millions of years by amalgamation from small magma chambers? *GSA Today*, 14(5-Apr), 4-11. [https://doi.org/10.1130/1052-5173\(2004\)014<0004: APAOMO>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/1052-5173(2004)014<0004: APAOMO>2.0.CO;2).
- Huppert, H.E., and Sparks, R.S.J., 1988. The generation of granitic magmas by intrusion of basalt into continental crust, *Journal of Petrology*, 29(3), 599-624. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.599>.
- Imanpournamin, A., and Sarkarinejad, K., 2022. Structural significance of the Alvand mantled granite-gneiss dome exhumation within the Zagros hinterland fold-and-thrust belt, Iran. *International Journal of Earth Science*, 111, 195–214. <https://doi.org/10.1007/s00531-021-02108-7>.
- Izadi Kian, L., Miri, M., Alavi, S. A., and Sepahi, A. A., 2025. Interplay between polyphase deformation and metamorphism of the NW Sanandaj-Sirjan Zone, Hamedan Area, Western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 290, 106655. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2025.106655>.
- Izadi Kian, L., Sadr, A.H., and Rabbani, Sh., 2018. *Structural analysis of the mylonitic granite in the east and southeast of Boroujerd. Journal of Earth Science Researches*, 8(4), 1–15. (In Persian).
- Jafari, S.R., Sepahi, A.A. and Osanai, Y., 2020. LA-ICP-MS zircon U-Pb geochronology on migmatites from the Boroujerd region, Sanandaj-Sirjan zone, Zagros Orogen, Iran: provenance analysis and metamorphic age, *Geopersia*, 10(2), pp. 367-380. <https://doi.org/10.22059/10.22059/GEOPE.2020.288587.648501>.

- Mahmoudi, S., Corfu, F., Masoudi, F., Mehrabi, B., and Mohajjel, M., 2011. U–Pb dating and emplacement history of granitoid plutons in the northern Sanandaj–Sirjan Zone, Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 41, 238-249. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2011.03.006>
- Masoudi, F., and Yardley, B.W.D., 2005. Magmatic and metamorphic fluids in pegmatite development: Evidence from Boroujerd Complex, Iran, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 16(1), 43-53. https://jsciences.ut.ac.ir/article_31626_c179f6a673781007009f6942dfc06f88.pdf.
- Masoudi, F., Yardley, B.W.D., and Cliff, R.A., 2002. Rb–Sr geochronology of pegmatites, plutonic rocks and a hornfels in the region south-west of Arak, Iran, *Journal of Sciences, Islamic Republic of Iran*, 13(3), 249-254. https://jsciences.ut.ac.ir/article_31720_ac0df005e87605efe0e2b271e80c7253.pdf.
- Masoudi, F., 1997. Contact metamorphism and pegmatites development in the region SW of Arak, Iran. PhD, University of Leeds, UK.
- Mohajjel, M., and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in late cretaceous continental collision, sanandaj–Sirjan zone, western Iran. *Journal of Structural Geology*, 22(8), 1125–1139. DOI:10.1016/S0191-8141(00)00023-7.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., and Sahandi, M.R., 2003. Cretaceous–Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj–Sirjan zone, Western Iran, *Journal of Asian Earth Sciences*, 21(4), 397-412. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(02\)00035-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(02)00035-4).
- Mohajjel, M., and Fergusson, C.L., 2014. Jurassic to cenozoic tectonics of the zagros orogen in northwestern iran, *international geology review*, 56, 263-287. <https://doi.org/10.1080/00206814.2013.853919>.
- Mohajjel, M., Baharifar, A.A., Moinevaziri, H., and Nozaem, R., 2006. Deformation history, micro-structure and P–T–t path in ALS-bearing schists, southeast Hamadan, Sanandaj–Sirjan zone. *Journal of Geological Society of Iran* 1:11–19, <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0635-2>.
- Nozaem, R., Mohajjel, M., Moinevaziri, H., 2010. Syn-Tectonic Progressive and Retrogressive Metamorphism in ALS-Bearing Schists, Southeast Hamadan, Sanandaj-Sirjan Zone, Iran, *EGU General Assembly, Austria*, p.6603.
- Nutman, A. P., Mohajjel, M., Bennett, V. C., and Fergusson, C. L., 2014. Gondwanan Eoarchean–Neoproterozoic ancient crustal material in Iran and Turkey: zircon U–Pb–Hf isotopic evidence. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 51(3), 272-285. <https://doi.org/10.1139/cjes-2013-0138>.
- Owona, S., Ondo, J.M., and Ekodeck, G.E., 2013. Evidence of quartz, feldspar and amphibole crystal plastic deformations in the Paleoproterozoic Nyong Complex shear zones under amphibolite to granulite conditions (west Central African Fold Belt, SW Cameroon), *Journal of Geography and Geology*, 5(3), 186. <https://doi.org/10.5539/jgg.v5n3p186>.
- Passchier, C., and Trouw, R., 2005. *Microtectonics*, Springer, Berlin, 366 p. <https://doi.org/10.1007/3-540-29359-0>.
- Paterson, S.R., Okaya, D., Memeti, V., Economos, R., and Miller, R.B., 2011. Magma addition and flux calculations of incrementally constructed magma chambers in continental margin arcs: combined field, geochronologic, and thermal modeling studies, *Geosphere*, 7(6), 1439-1468. <https://doi.org/10.1130/GES00696.1>.
- Paterson, S. R., Fowler Jr, T. K., Schmidt, K. L., Yoshinobu, A. S., Yuan, E. S., and Miller, R. B., 1998. Interpreting magmatic fabric patterns in plutons. *Lithos*, 44(1-2), 53-82. [https://doi.org/10.1016/s0024-4937\(98\)00022-x](https://doi.org/10.1016/s0024-4937(98)00022-x).
- Paterson, S.R., Vernon, R.H., and Tobisch, O.T., 1989. A review of criteria for the identification of magmatic and tectonic foliations in granitoids, *Journal of Structural Geology*, 11(3), 349-363. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90074-6](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90074-6).
- Perugini, D., and Poli, G., 2005. Viscous fingering during replenishment of felsic magma chambers by continuous inputs of mafic magmas: field evidence and fluid-mechanics experiments, *Geology*, 33(1), 5-8. <https://doi.org/10.1130/G21075.1>.
- Sabzehei, M., Majidi, B., Amidi, S.M., Alavi Tehrani, M., and Qorashi, M., 1977. *Geological Map of Hamedan, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Sepahi, A.A., 2008. Typology and petrogenesis of granitic rocks in the Sanandaj–Sirjan metamorphic belt, Iran: with emphasis on the Alvand plutonic complex, *Neues Jahrbuch für Geologie und Paläontologie – Abhandlungen*, 247(3), 295-312. <https://doi.org/10.1127/0077-7749/2008/0247-0295>.
- Sepahi, A.A., Jafari, S.R., Osanai, Y., Shahbazi, H., and Moazzen, M., 2019. Age, petrologic significance and provenance analysis of the Hamedan low-pressure migmatites; Sanandaj–Sirjan Zone, west Iran, *International Geology Review*, 61(12), 1446-1461. <https://doi.org/10.1080/00206814.2018.1517392>.
- Sepahi, A.A., Salami, S., Lentz, D., McFarlane, C., and Maanijou, M., 2018. Petrography, geochemistry, and U–Pb geochronology of pegmatites and aplites associated with the Alvand intrusive complex in the Hamedan region, Sanandaj–Sirjan zone, Zagros orogen (Iran), *International Journal of Earth Sciences*, 107(3), 1059-1096. <https://doi.org/10.1007/s00531-017-1515-4>.
- Shafaii Moghadam, H. S., and Stern, R. J., 2014. Ophiolites of Iran: Keys to understanding the tectonic evolution of SW Asia: (I) Paleozoic ophiolites. *Journal of Asian Earth Sciences*, 91, 19-38. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2014.04.008>.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafae, M., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Shang, C.K., and Abedini, M.V., 2010. Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of the Alvand plutonic complex in Sanandaj–Sirjan zone (Iran): new evidence for Jurassic magmatism, *Journal of Asian Earth Sciences*, 39(6), 668-683, doi:10.1016/j.jseae.2010.04.014. <https://doi.org/10.22067/econg.v13i1.1011>.

- W/Sheikholeslami, R., Bellon, H., Emami, H., Sabzehei, M., and Pique, A., 2003. New structural and 40K-40Ar data for the metamorphic rocks in Neyriz area (Sanandaj-Sirjan Zone, Southern Iran), Their interest for an overview of the NeoTethyan domain in the Middle East: *Comptes Rendus Geoscience*, 335, 981–991. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2003.09.001>.
- Soheili, M., 1992. *Geological Map of Boroujerd, Scale 1:250,000. Geological Survey of Iran. (In Persian)*.
- Van der Molen, I., and Paterson, M.S., 1979. Experimental deformation of partially-melted granite, *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 70(3), 299–318. <https://doi.org/10.1007/BF00375359>.
- Vernon, R.H., 2000. Review of microstructural evidence of magmatic and solid-state flow, *Visual Geosciences*, 5(2), 1-23. <https://doi.org/10.1007/s10069-000-0002-3>.
- Vernon, R.H., Johnson, S.E., and Melis, E.A., 2004. Emplacement-related microstructures in the margin of a deformed pluton: the San José tonalite, Baja California, México, *Journal of Structural Geology*, 26(10), 1867-1884. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.02.007>.
- 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>.
- Wiebe, R.A., Smith, D., Sturm, M., King, E.M., and Seckler, M.S., 1997. Enclaves in the Cadillac Mountain granite (Coastal Maine): samples of hybrid magma from the base of the chamber, *Journal of Petrology*, 38(3), 393-423. <https://doi.org/10.1093/petroj/38.3.393>.
- Yajam, S., Ghalamghash, J., Montero, P., Scarrow, J., Razavi, S., and Bea, F., 2015. The spatial and compositional evolution of the Late Jurassic Ghorveh–Dehgolan plutons of the Zagros Orogen, Iran. *Geologica acta* 13, 0025–0043. <https://doi.org/10.1344/GeologicaActa2015.13.1.2>.
- Žák, J., Verner, K., Holub, F.V., Kabele, P., Chlupáčová, M., and Halodová, P., 2012. Magmatic to solid state fabrics in syntectonic granitoids recording early Carboniferous orogenic collapse in the Bohemian Massif, *Journal of Structural Geology*, 36, 27-42. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2011.12.011>.
- Zhang, Z., Xiao, W., Ji, W., Majidifard, M. R., Rezaeian, M., Talebian, M., Xiang, D., Chen, L., Wan, B., Ao, S., and Esmacili, R., 2018. Geochemistry, zircon U-Pb and Hf isotope for granitoids, NW Sanandaj-Sirjan zone, Iran: Implications for Mesozoic-Cenozoic episodic magmatism during Neo-Tethyan lithospheric subduction. *Gondwana Research*, 62, 227-245. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2018.04.002>.