Scientific Quarterly Journal of Geosciences, Vol. 36, Issue 3, Serial No. 141, Autumn 2026, pp. 155-172
www.gsjournal.ir

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 Jafari[2], Nasrin Piri[1], Shima Rabbani[1], and Lida Sadeghi[1]

[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; Bohrson 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.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۱۴۰۵، دوره ۳۶، شماره ۳، پیاپی ۱۴۱، صفحه ۱۵۵ تا ۱۷۲

مقاله پژوهشی

پیوند صفحه نخست: www.gsjournal.ir

بررسی و مقایسه فابریک ها و دمای دگرشکلی در توده‌های نفوذی الوند و بروجرد، پهنه سنندج–سیرجان

لیلی ایزدی‌کیان*[1]، سیده راضیه جعفری[2]، نسرین پیری[1]، شیما ربانی[1] و لیدا صادقی[1]

[1] گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

[2] گروه زمین‌شناسی، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۷/۰۱

کلیدواژه‌ها:

الوند

بروجرد

فابریک

ماگما

زمین‌ساخت

سنندج- سیرجان

چکیده

توده‌های نفوذی الوند و بروجرد از بزرگ‌ترین توده‌های هم‌سن، در شمال باختر پهنه سنندج- سیرجان هستند. هر دو توده فابریک‌های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد را با تفاوت‌هایی شایان توجه در خود حفظ کرده‌اند. درتوده نفوذی الوند، فابریک ماگمایی به خوبی در بیشتر بخش‌ها 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 گرانیت الوند است، که گویای تغییر شکل‌های شدید می‌باشد. شواهد فابریک انتقالی در هر دوتوده به‌صورت حضور کانی‌های تاخیری در قسمت‌های شکسته شده مشاهده می‌شود. بررسی شواهد صحرایی و میکروسکوپی نشان می‌دهند که توده نفوذی الوند در یک سیستم ماگمایی باز، پویا و چندمرحله‌ای تشکیل شده است، اما توده نفوذی بروجرد ویژگی‌های یک سیستم بسته‌تر را دارد که در آن تبلور در شرایط به‌نسبت آرام و بدون آشفتگی جریان ماگما صورت گرفته و دگریختی عمدتا 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 می‌دهند. علت حضور فابریک حالت جامد گسترده و هوازدگی شدید در توده نفوذی بروجرد می‌تواند به دلیل نزدیکی آن به زمین‌درز زاگرس و فعالیت‌های دگرشکلی شدید و گسل‌خوردگی در این توده باشد.

۱– پیش‌نوشتار

مطالعه فابریک‌های داخلی در توده‌های آذرین درونی، بینش‌های ژرفی در مورد سازوکارهای تبلور، تاریخچه تغییرشکل و فرایندهای ژئودینامیکی پوسته زمین را ارائه می‌دهد. توده‌های آذرین درونی (پلوتون‌ها)، به عنوان بقایای متبلور اتاق‌های ماگمایی، تعاملات پیچیده‌ای را بین تاثیرات ماگمایی، زمین‌ساختی و حرارتی در طول جامد شدن خود ثبت می‌کنند (Bouchez, 1997). مطالعه فابریک‌های داخلی این توده‌ها، نه تنها اطلاعاتی در مورد ماگماتیسم نفوذی (از نظر تاریخچه تبلور، تغییرشکل و محیط زمین‌ساختی پلوتون) به پژوهشگران می‌دهد بلکه درباره تکامل پوسته و رژیم‌های زمین‌ساختی منطقه نیز اطلاعات ارزشمندی ارائه می‌دهد (Paterson et al, 1989). بررسی فابریک‌های توده‌های آذرین درونی در ۳ حالت ماگمایی، انتقالی و حالت جامد می‌تواند به درک بهتر نحوه تبلور، جایگیری و تغییر شکل بلورها در طول تاریخچه زمین‌شناسی این توده‌ها کمک کند. فابریک ماگمایی به‌طور عمده تحت تاثیر جریان ماگما و رشد بلورها در محیط مذاب شکل می‌گیرد. فابریک‌های ماگمایی نه‌تنها می‌توانند جهت‌یابی ترجیحی کانی‌ها را در ماگمای در حال جریان ثبت کنند، بلکه اطلاعاتی درباره میدان کرنشِ وارد بر ماگما را در هنگام جایگیری پلوتون‌های گرانیتی، نیز حفظ می‌کنند (Paterson et al., 1989; Bouchez, 1997). فابریک انتقالی (submagmatic fabric) (فابریک‌های گذار ازحالت ماگمایی به حالت‌جامد) نشان‌دهنده مرحله‌ای است که سنگ بین حالت کاملا مذاب و جامد قرار دارد. حضور فابریک‌های انتقالی نشان می‌دهد بین فاز ماگمایی و جامد وقفه‌ای رخ نداده است (Vernon, 2000) و جایگیری توده به‌صورت همزمان با دگرشکلی صورت گرفته است. از سوی دیگر، پس از تبلور کامل توده آذرین درونی،

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

ماخذنگاری:

ایزدی‌کیان، ل.، جعفری، س. ر.، پیری، ن.، ربانی، ش. و صادقی، ل.، ۱۴۰۵،بررسی و مقایسه فابریک‌ها و دمای دگرشکلی در توده‌های 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.

doi: 10.22071/gsj.2026.550643.2226 dor: 20.1001.1.10237429.1405.36.3.8.0

حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.

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 تنش‌های زمین‌ساختی و فرایندهای دگرشکلی ایجاد می‌شود (Vernon, 2000). شواهد جریان ماگمایی شامل موارد زیر است (Vernon, 2000; Paterson et al, 1989): الف) جهت‌یابی ترجیحی بلورهای درشت کشیده (مانند فلدسپار یا هورنبلند) که دچار تغییر شکل داخلی نشده‌اند، ب) کج‌شدگی (Imbrication) بلورهای درشت (فنوکریست‌ها) که تغییر شکل داخلی ندارند، ج) تنش حالت جامد ناکافی در نواحی بین بلورهای جهت یافته برای امکان چرخش درشت‌بلورها (فنوکریست‌ها)، د) کشیدگی انکلاوهای میکروگرانیتوییدی بدون تغییر شکل پلاستیک کانی‌ها. هـ) برگ‌وارگی‌های (فولیاسیون‌های) جریان ماگمایی و انکلاوهای کشیده میکروگرانیتوییدی که حول بیگانه‌سنگ‌ها (زینولیت‌ها) انحراف یافته‌اند، و) لایه‌بندی شلیرن در غیاب تغییر شکل پلاستیک کانی‌ها. این ویژگی‌ها با چرخش بلورها در یک محیط بسیار ضعیف‌تر(یعنی فاز مذاب) همخوانی دارند و در این مرحله ماگما به اندازه کافی چسبناک شده تا بتواند این هم‌ترازی‌ها را حفظ کند. فابریک‌های حالت انتقالی یا ساب‌ماگمایی در درصدهای مذاب پایین رخ می‌دهند (شاید حتی به اندازه چند درصد) بسته به کانی‌ها و شکل آن‌ها، و می‌تواند از طریق سازوکارهای مختلفی تشکیل شود. یکی از شواهد مهم این فابریک، پرشدگی شکستگی‌های بلورها با کانی‌های 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 دانه‌ها. ب) دنباله‌های تبلور مجدد یافته. ج) کشیدگی توده‌های تبلور مجدد یافته (مانند کوارتز و میکا). د) کاهش اندازه دانه‌ها. هـ) لایه‌های ریزدانه که به صورت شبکه‌ای حول بقایای کمتر تغییرشکل یافته قرار گرفته‌اند. و) دوقلویی در میکروکلین. ز) تشکیل میرمکیت. ح) پرتیت شعله‌ای. ط) بودیناژ کانی‌های مقاوم، معمولا با تبلور مجدد یافته کانی‌های دما پایین (مانند کوارتز و میکا) بین بودین‌ها. ی) برگ‌وارگی که از داخل انکلاوها عبور می‌کند، نه حول آن‌ها. ک) تنش ناهمگن با مناطق میلونیتی موضعی.

توده نفوذی الوند (واقع در استان همدان) و بروجرد (واقع در استان لرستان) از جمله توده‌های آذرین مهم در کمربند کوهزایی زاگرس و پهنه سنندج- سیرجان هستند که تحت تاثیر فرایندهای مختلف ماگمایی و دگرگونی قرارگرفته‌اند. مقایسه فابریک‌ها در توده‌های الوند و بروجرد می‌تواند تفاوت‌های ژئودینامیکی و شرایط تشکیل این دو توده نفوذی را آشکار سازد. توده‌های نفوذی الوند و بروجرد از جنبه‌های گوناگونی مانند سنگ‌شناسی، کانی‌شناسی، سن‌سنجی و ... توسط پژوهشگران مختلف مورد توجه قرار گرفته‌اند، در این پژوهش فابریک‌های دو توده بزرگ الوند و بروجرد مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد.

۲- روش پژوهش

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

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- زمین‌شناسی عمومی منطقه

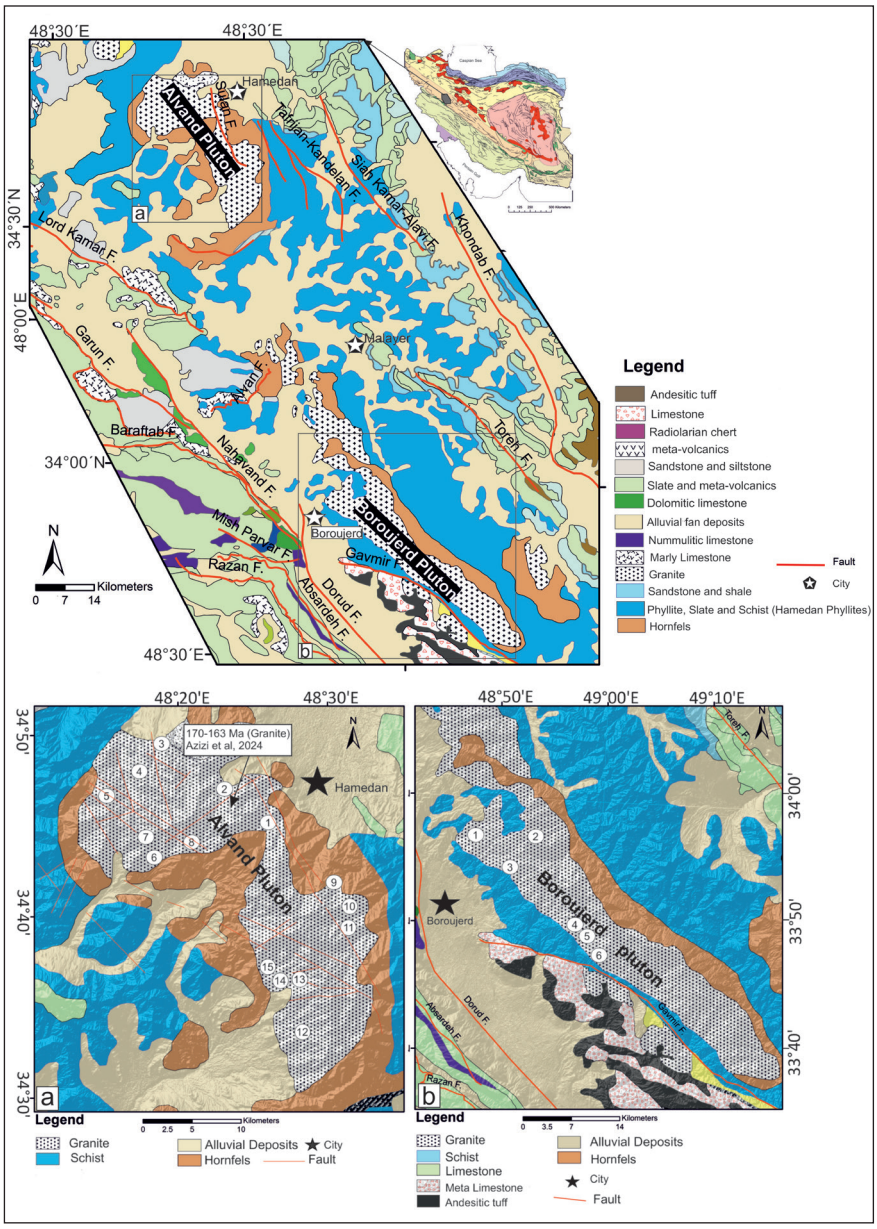
توده‌های آذرین درونی الوند و بروجرد، در بخش مرکزی پهنه ساختاری سنندج- سیرجان واقع شده‌اند (Mohajjel et al., 2003; Berberian and Alavi, 1977; Azizi et al., 2024; Jafari et al., 2020). این پهنه بخش دگرگونی کمربند کوهزایی زاگرس است که در اثر فرورانش اقیانوس تتیس‌جوان و در پی آن برخورد قاره‌ای صفحه‌های عربی و اوراسیا در باختر و جنوب ایران شکل گرفته است (e.g., Alavi, 1994; Mohajjel et al., 2003; Berberian and King, 1981). پهنه سنندج - سیرجان شامل سنگ‌های دگرگونی درجه پایین تا بالا است که همراه با توده‌های نفوذی مافیک (گابرو) تا فلسیک (گرانیتی) رخنمون یافته‌اند. اهمیت مطالعه این منطقه در درک تاریخچه پیچیده دگرگونی‌های ناحیه‌ای و مجاورتی و همچنین ماگماتیسم گسترده در طول فازهای مختلف کوهزایی سیمرین است (Mohajjel and Fergusson, 2014; Agard et al., 2005). این پهنه به‌صورت مجموعه‌ای از پی‌سنگ قاره‌ای گندوانایی (Nutman et al., 2014) و رسوبات دوران‌های مختلف تشکیل شده است (Shafaii Moghadam and Stern, 2014; Ghasemi and Talbot, 2006). تنوع سبک‌های دگرشکلی و شواهد رژیم‌های کششی و فشاری، نشان‌دهنده گذار پهنه سنندج-سیرجان از یک حاشیه غیرفعال در هنگام باز شدن اقیانوس تتیس‌جوان به حاشیه فعال قاره‌ای در اثر فرورانش این اقیانوس و سپس برخورد قاره‌ای در اثر بسته‌شدن آن صورت گرفته است (Agard et al., 2005). بیشتر دگرگونی‌ها و ماگماتیسم در پهنه سنندج-سیرجان در دوران مزوزوییک رخ داده است (e.g., Sheikholeslami et al., 2003; Ahmadi-Khalaji et al., 2007). رویدادهای پلوتونیکی با ترکیب مافیک تا فلسیک در بخش شمال باختری این پهنه در مناطق همدان، الیگودرز، ملایر، بروجرد، قروه و ... رخنمون یافته و از نظر سنی مزوزوییک تا پالئوژن هستند (e.g., Masoudi, 1997; Ahmadi-Khalaji et al., 2007; Shahbazi et al., 2010; Mahmoudi et al., 2011; Ahadnejad et al., 2011; Esna-Ashari et al., 2012; Chiu et al., 2013; Yajam et al., 2015). در بخش میانی پهنه سنندج- سیرجان، رخنمون‌های گسترده‌ای از سنگ‌های دگرگونی به‌ویژه «فیلیت‌های همدان» همراه با انواع شیست‌ها دیده می‌شوند که میزبان، توده‌های آذرین بزرگ الوند و بروجرد می‌باشند (شکل ۱). مطالعات مربوط به پیشینه دگرشکلی در پهنه سنندج-سیرجان به معرفی ۳ مرحله دگرشکلی اصلی به‌صورت تغییرشکل شکل‌پذیر (Ductile deformation) انجامیده است (e.g., Berberian and Alavi, 1997; Mohajjel et al., 2003; Izadi Kian et al., 2025; Mohajjel and Fergusson, 2000; Imanpournamin and Sarkarinejad, 2022; Mohajjel et al., 2006; Nozaem et al., 2010). با توجه به این مطالعات، دگرشکلی دوم بسیار شدید بوده و به شکل‌گیری برگ‌وارگی قوی در اسلیت‌ها و فیلیت‌های همدان انجامیده است. توده‌های الوند و بروجرد به‌صورت همزمان با دگرشکلی دوم به درون اسلیت‌ها و فیلیت‌های همدان نفوذ کرده و آن‌ها را قطع کرده‌اند (Izadi Kian et al., 2025).

۳-۱-۱- سنگ‌شناسی توده نفوذی الوند

مطالعات مختلف و گسترده سنگ‌شناسی، ژئوشیمی و سن‌سنجی در مورد توده نفوذی الوند انجام شده است (برای مثال ; Azizi et al., 2024; Sepahi, 2008; Mahmoudi et al., 2011, Sepahi et al., 2018 and 2019). توده آذرین بزرگ و پیچیده الوند، با ۳ گروه سنگ‌شناسی شامل گروه ۱. گابرو-دیوریت-تونالیت (شکل۲- a)، گروه ۲. گرانیت پورفیرویدی (شکل‌های ۲-b و d) و گروه۳. لوکوگرانیت (شکل۳-b) است و مساحتی بالغ بر ۸۰۰ کیلومتر مربع را در بر می‌گیرد (Sepahi, 2008). داده‌های ژئوکرونولوژی U-Pb زیرکن، سن ژوراسیک میانی تا پسین (حدود ۱۶۷-۱۵۳ میلیون سال پیش) را برای این توده (جدول ۱) نشان می‌دهند (Shahbazi et al., 2010). نفوذ این توده در سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای شامل فیلیت‌ها و شیست‌ها به تشکیل یک هاله دگرگونی مجاورتی گسترده انجامیده است که با تبلور کانی‌های شاخصی مانند گارنت، آندالوزیت، کردیریت و سیلیمانیت همراه است (Baharifar et al., 2004). مطالعات اخیر بر روی انواع انکلاوهای میکروگرانولار مافیک (شکل ۲- c) و شیست در توده الوند (شکیبا و سپاهی‌گرو، ۱۴۰۰؛

(Sepahi, 2008; Ghalamghash et al., 2009) به فرایندهای پیچیده اختلاط و آمیختگی ماگما (magma mixing/mingling) و تکامل اتاقک ماگمایی اشاره دارند.

مطالعات سن‌سنجی سنگ‌های میگماتیتی همدان سن ۱۶۷ میلیون سال قبل را نشان می‌دهد (Sepahi et al., 2019).



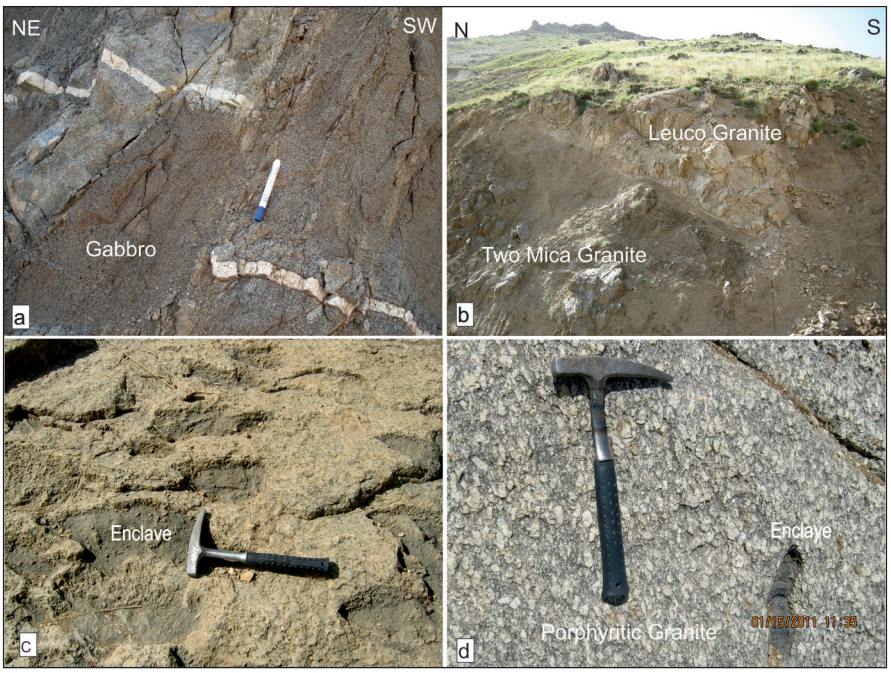
شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ساده‌شده توده‌های نفوذی الوند و بروجرد بر اساس نقشه زمین‌شناسی همدان، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ (ورقه ۵۹۵۷) (سبزه‌ئی و همکاران، ۱۳۶۵) و نقشه زمین‌شناسی بروجرد، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰ (ورقه ۵۹۵۸) (سهیلی، ۱۳۷۱). نقشه زمین‌شناسی توده‌های نفوذی الوند (a) و بروجرد (b) و محل ایستگاه‌های اندازه‌گیری این 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 توده‌های 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)



شکل۲- سنگ‌شناسی 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.

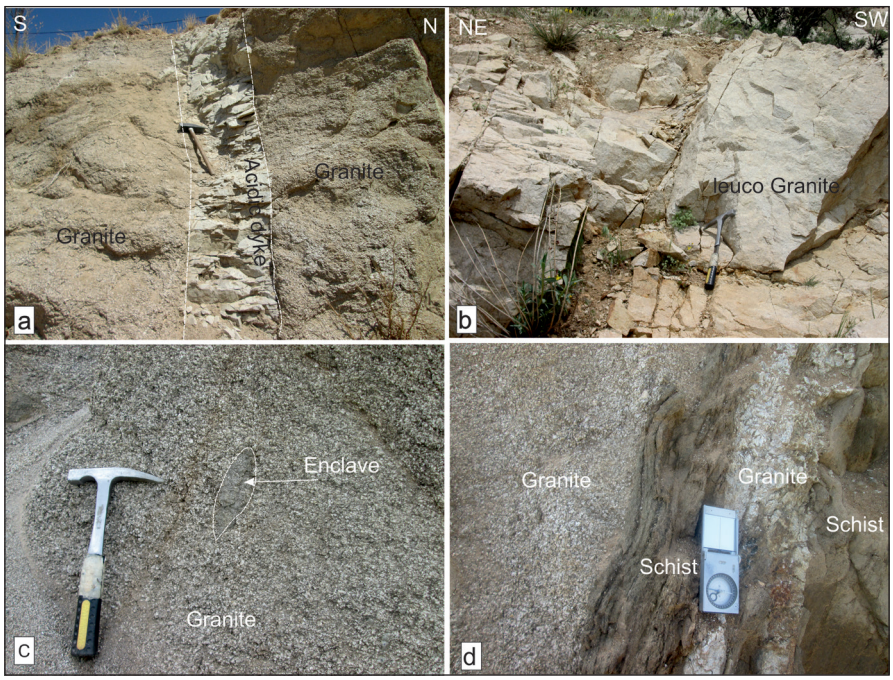
Figure 2. Petrography of the Alvand pluton: (a) Gabbro from the Ganjnameh area, (b) Leucogranite and porphyritic granite with a sharp contact, (c) Mafic microgranular enclaves within granite, (d) Porphyritic granite with large feldspar phenocrysts.

۳-۱-۲- سنگ‌شناسی توده نفوذی بروجرد

توده نفوذی بروجرد با طول ۶۰ کیلومتر و پهنای ۸-۱۰ کیلومتری در خاور و جنوب خاور شهر بروجرد قرار دارد و در مجموعه سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای با درجه پایین (شامل اسلیت‌ها و فیلیت‌ها در رخساره شیست 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 سنگ‌های گرانودیوریت (شکل‌های ۳-a و b) تشکیل می‌دهند که از نوع آهکی- قلیایی و غنی از پتاسیم بوده و از نظر درجه اشباع از آلومینیم متاآلومین تا اندکی پرآلومین می‌باشد. بر اساس روش U-Pb و با استفاده از کانی زیرکن مشخص شده است که ماگماتیسم چیره در مقیاس ناحیه‌ای 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 سنگ‌های دگرگونی با روند شمال‌باختری- جنوب‌خاوری رخنمون دارد و دایک‌های اسیدی و بازی زیادی در زمان‌های مختلف درآن نفوذ کرده‌اند (شکل ۳-a). درون این توده بزرگ توده‌های نفوذی کوچکی دیده می‌شوند که به‌طور عمده دارای ترکیب کوارتزدیوریتی بوده و گاهی توده‌های بسیار لوکوکرات نیز در آن رخنمون دارند. توده‌های گرانیتوییدی موجود در منطقه مورد مطالعه دارای اَنکلاوهای گوناگونی است که بیشتر در فازهای مافیک‌تر و به‌ویژه در قسمت‌های حاشیه‌ای مشاهده می‌شوند و اندازه آن‌ها از چند سانتی‌متر تا چند متر متغیر است و شکل آن‌ها از حالت تقریبا زاویه‌دار تا کاملا گرد شده تغییر می‌کند ولی به طور کلی اشکال تقریبا بیضوی چیره هستند (شکل ۳ -c) (احمدی‌خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). مرز گرانیت بروجرد با شیست‌ها در بسیاری از بخش‌ها آشکار است و رگه‌هایی از توده به داخل شیست نفوذ کرده (شکل۳- d) و گاهی قطعاتی از سنگ میزبان جدا شده و به داخل گرانیت افتاده است. دگرگونی مجاورتی در بروجرد با شیست‌های لکه‌دار آغاز می‌شود و با هورنفلس‌ها و میگماتیت‌ها پایان می‌یابد (Jafari et al., 2020) در این منطقه مجموعه دگرگونی ناحیه‌ای با طیفی از شرایط رخساره شیست سبز دیده می‌شود که طی نفوذ توده گرانیتوییدی در امتداد سطح شیستوزیته آن‌ها یک مجموعه دگرگونی مجاورتی دمای بالا- فشار پایین حاصل شده‌است. سنگ‌های دگرگونی مجاورتی شامل یک توالی کاملی از دگرگونی درجه پایین تا بالا شامل شیست‌های لکه‌دار، هورنفلس‌شیست، هورنفلس و میگماتیت‌ها در بخش شمالی توده گرانیتوییدی بروجرد می‌باشند (احمدی‌خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). حضور گسل‌ها در داخل و خارج توده سبب به‌هم ریختگی شدید ساختارهای و هوازدگی شدید آن شده‌اند و در بخش جنوبی توده به سبب فعالیت گسل‌ها دگرگونی مجاورتی ناقص است ولی در بخش شمالی میگماتیت‌ها و هورنفلس‌ها رخنمون دارند (احمدی‌خلجی و همکاران، ۱۳۸۵). مطالعات سن‌سنجی سنگ‌های دگرگونی درجه بالا (میگماتیت‌ها) سن ۱۶۰ تا ۱۷۰ میلیون سال پیش را نشان می‌دهد (Jafari et al., 2020).

۳-۲- فابریک‌ها

با توجه به بازدیدهای صحرایی و مطالعات میکروسکوپی در هر دو توده نفوذی الوند و بروجرد فابریک‌های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می‌شود اما تفاوت آن‌ها در توزیع ناهمسان این فابریک‌ها است به‌گونه‌ای که در توده نفوذی الوند فابریک ماگمایی قوی‌تر و در توده نفوذی بروجرد فابریک حالت جامد بیشتر به چشم می‌خورد. فابریک انتقالی در هر دو توده وجود دارد و نشان‌دهنده پیوستگی دگرشکلی از حالت ماگمایی تا حالت جامد در این دو توده است. در ادامه به تفکیک توده‌های هر سه فابریک معرفی می‌شوند.



شکل ۳- سنگ‌شناسی گرانیت بروجرد: a) دایک آپلیتی درون گرانیت میلونیتی، b) لوکوگرانیت، c) انکلاوهای جهت یافته درون گرانیت، d) همبری شیست و گرانیت بروجرد.

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.

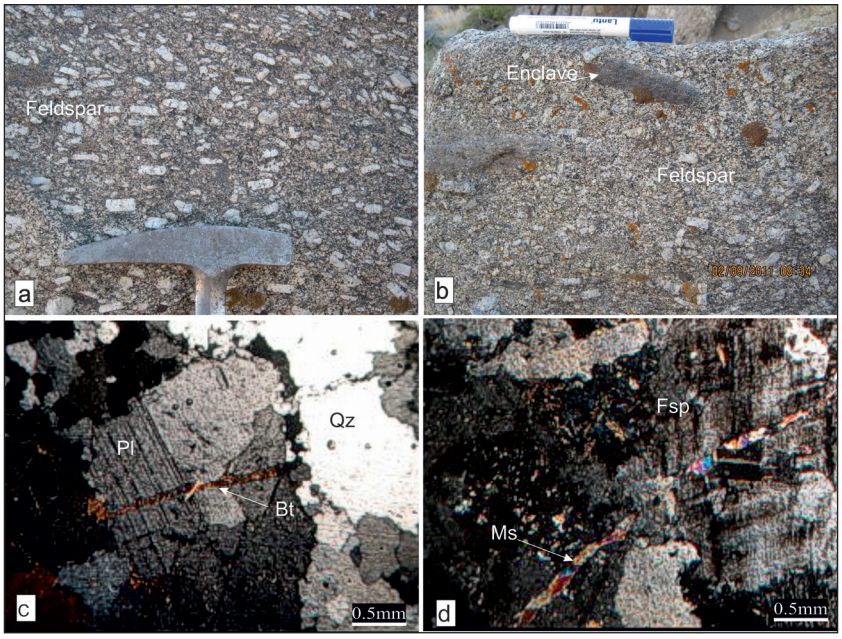
۳-۲-۱- فابریک‌های توده نفوذی الوند

در توده نفوذی الوند هر ۳ فابریک ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می‌شوند (شکل۴). فابریک ماگمایی به‌صورت جهت‌یابی آلکالی فلدسپارهای درشت‌بلور (شکل ۴-a) و جهت‌یافتگی انکلاوها (شکل۴-b) در الوند به خوبی در بیشتر رخنمون‌ها حفظ شده است. در برخی بخش‌های توده الوند، به‌ویژه در واحد گرانیت پورفیرویدی، جهت‌یابی ترجیحی فنوکریست‌های درشت آلکالی فلدسپار به‌خوبی مشاهده می‌شود. انکلاوها با شکل‌ها و ترکیبات مختلف مانند سورمیکاسه، میکروگرانولار مافیک، میکروگرانولار فلسیک و هورنفلسی (شکیبا و سپاهی گرو، ۱۴۰۰) در برخی قسمت‌ها موازی با برگ‌وارگی جریان ماگمایی قرار گرفته‌اند، که نشان‌دهنده تاثیر جریان ماگمایی بر جهت‌یافتگی آن‌ها است. ترکیب جهت‌یابی انکلاوها و درشت‌بلورهای آلکالی فلدسپار به‌عنوان 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 می‌دهد 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 می‌دهند و شیب آن‌ها متوسط تا زیاد است. در منطقه سیمین انکلاوها با شیب متوسط تا زیاد به سمت خاور و جنوب خاور میل دارند. در منطقه باباپیرخطواره ماگمایی با شیب کم تا متوسط به سمت شمال خاور و جنوب باختر میل دارد و کم و بیش با دیواره موازی است. در منطقه سیاه کوه خطواره ماگمایی شیب کم به سمت جنوب باختر دارد. در منطقه سرکان انکلاوها شیب متوسط تا زیاد دارند و به هر دو سمت جنوب خاور و شمال باختر میل دارد. در منطقه گنجنامه درشت‌بلورهای فلدسپار جهت‌یافتگی شمال خاور- جنوب باختر دارند و شیب آن‌ها کم تا متوسط است. انکلاوها هم‌راستا با درشت‌بلورهای فلدسپار شیب متوسط دارند و به شمال خاور میل دارند. در مسیر امامزاده محسن فلدسپارها شیب متوسط و روند عمومی خاوری- باختری دارند. در حیدره‌قاضی‌خان خطواره ماگمایی با شیب کم تا متوسط به سمت شمال خاور و جنوب باختر میل دارند. خطواره ماگمایی در منطقه وهنان با شیب متوسط تا زیاد به سمت خاور، جنوب خاور و به سمت باختر میل دارند. در منطقه قاسم‌آباد 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 می‌کند و شیب آن کم تا متوسط است. در نزدیکی منطقه شهرستانه فلدسپارها تقریبا در ۲ جهت خاور تا جنوب خاور و جنوب باختر تا باختر میل دارند و شیب آن‌ها کم تا متوسط است و همچنین انکلاوها نیز روند خاوری- باختری نشان می‌دهند و موازی همبری هستند و اندازه آن‌ها کوچک است.

در توده الوند، فابریک انتقالی میان فاز ماگمایی و حالت جامد نیز مشاهده می‌شود که از آن جمله می‌توان به شکستگی بلورهای فلدسپار و پرشدگی آن‌ها با کانی‌های ثانویه مانند کوارتز، بیوتیت (شکل ۴-c) و مسکوویت (شکل۴-d) اشاره کرد. این ویژگی‌ها نشان‌دهنده تداوم دگرشکلی در شرایطی هستند که بخشی از توده هنوز نیمه‌جامد بوده و بخشی دیگر وارد فاز جامد شده است. پرشدگی شکستگی‌ها با کانی‌های دیرزای ماگمایی، نشانه‌ای از تبلور هم‌زمان با تغییر شکل و گذار تدریجی از جریان ماگمایی به دگرشکلی در حالت جامد به‌شمار می‌رود (Vernon, 2000).

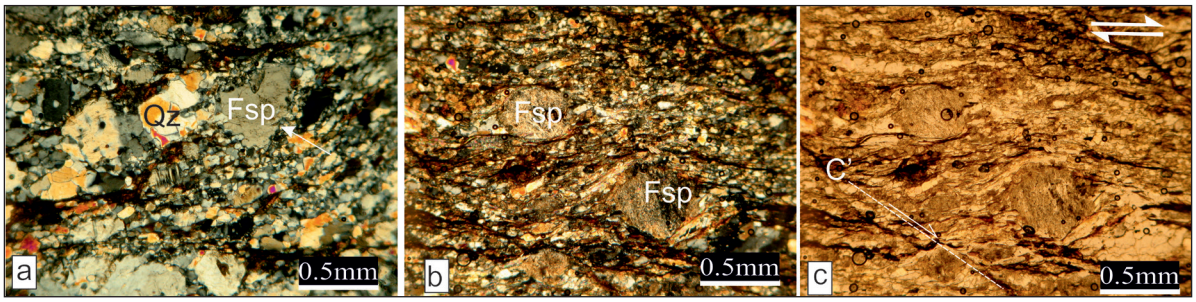
در توده نفوذی الوند، شواهد متعددی از دگرشکلی در حالت جامد مشاهده می‌شود که بیانگر تداوم تغییر شکل پس از تبلور ماگما هستند. در بسیاری از مقاطع میکروسکوپی فلدسپارهایی مشاهده می‌شوند که دچار تبلور مجدد دینامیکی شده‌اند و در حال تبدیل به زمینه نرم دانه‌ریزهستند (شکل۵-a). فلدسپارها با توجه به مقاومت بیشتری که نسبت به کوارتز دارند، بیشتر در گرانیت‌های میلونیتی ساختار پورفیروکلاست را تشکیل می‌دهند و به‌عنوان نشانگر سوی برش نوع حرکت پهنه برشی را نشان می‌دهند (شکل‌های ۵-b و c). برگ‌وارگی میلونیتی اغلب به‌صورت

فابریک C/S در گرانیت‌های میلونیتی تشکیل شده است و در برخی مقاطع دارای کانی‌های صفحه‌ای بیشتر فابریک C′/S هم تشکیل شده است (شکل۵-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 به‌صورت شکنا به دگرشکلی پاسخ داده‌اند و توسط ریزگسل‌ها شکسته و جابه‌جا شده‌اند (شکل۵-d). میرمکیت از جمله بافت‌های متداول توده الوند است که هم به‌صورت ماگمایی و هم به‌صورت دگرشکلی (شکل۵-g) در توده الوند تشکیل شده است. حضور ماکل‌های دگریختی گسترده در بلورهای پلاژیوکلاز نیز از شواهد دگرشکلی حالت جامد است که به فراوانی در گرانیت الوند مشاهده می‌شود (شکل۵-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(شکل۶).



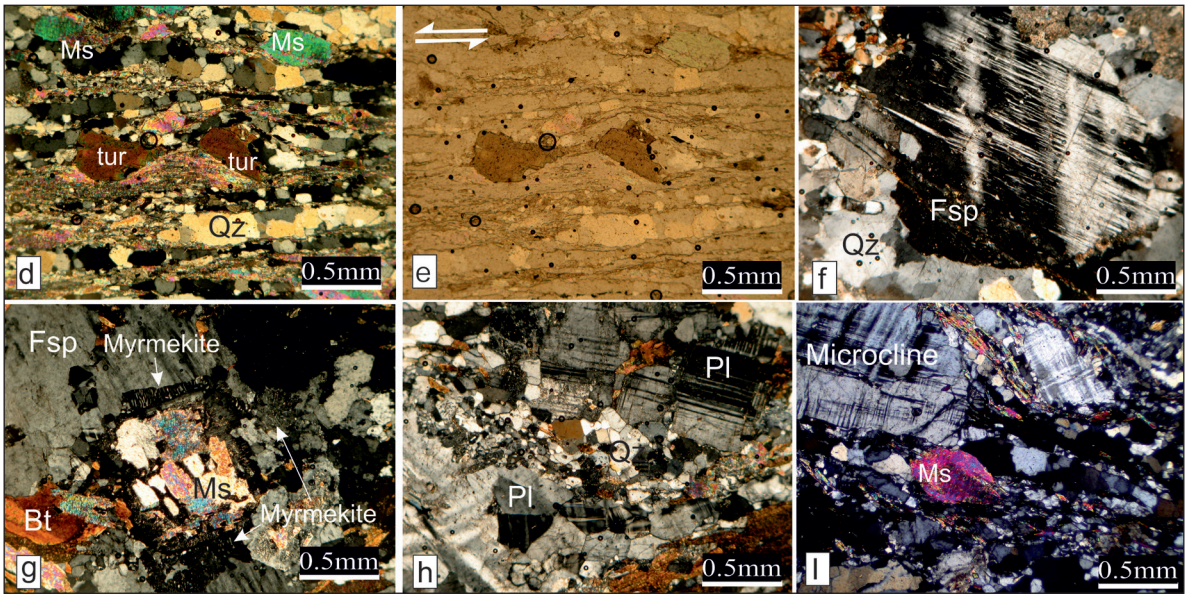
شکل ۴- شواهد فابریک‌های ماگمایی و انتقالی گرانیت الوند: جهت‌یابی ترجیحی بلورهای فلدسپار در گرانیت (a)، جهت‌یابی انکلاو شیستی و بلورهای فلدسپار در گرانیت (b)، شکستگی و پرشدگی بلور پلاژیوکلاز با بیوتیت (c)، شکستگی و پر شدگی بلور فلدسپار با مسکوویت (d).

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.



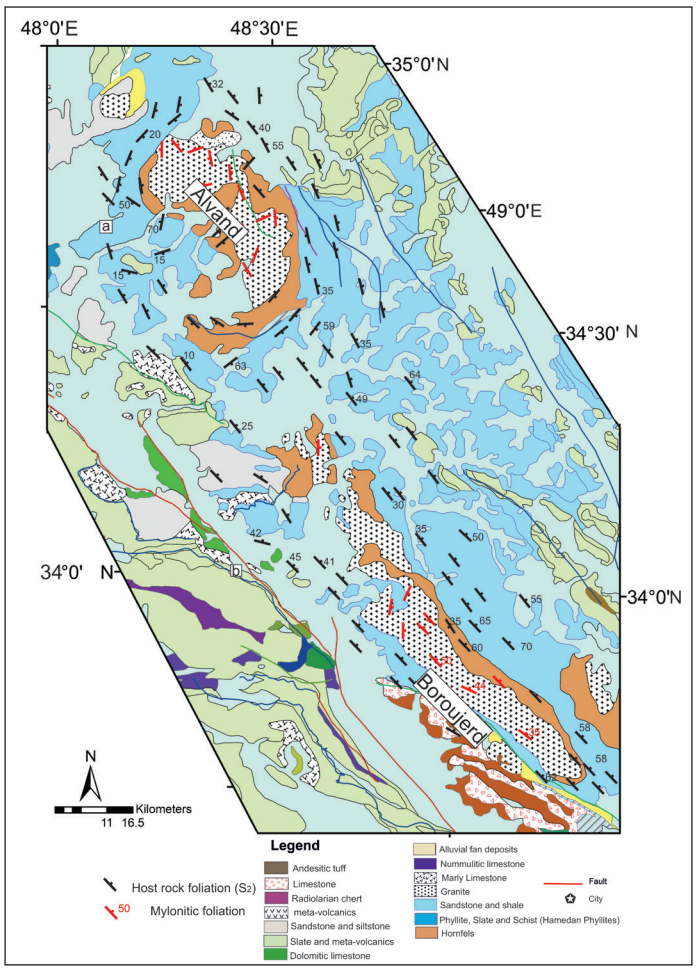
شکل ۵-شواهد فابریک‌های حالت جامد گرانیت الوند: a) خوردگی بلورهای فلدسپار، b و c) پورفیروکلاست‌های فلدسپار و فابریک C′/S با حرکت برشی راست بر،

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 فابریک‌های حالت جامد گرانیت الوند: d و e) خاموشی موجی و تبلور مجدد مسکوویت و تشکیل میکا ماهی، شکستگی و جابه‌جایی بلورهای تورمالین با حرکت چپ بر، f) ماکل‌های آلبیت و پریکلین که بر اثر دگرشکلی حاصل می‌شوند، g) تشکیل میرمکیت دگرشکلی، h) ماکل دگرریختی در بلورهای پلاژیوکلاز، i) بلورهای میکروکلین و میکاماهی با حرکت برشی چپ‌بر.

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.

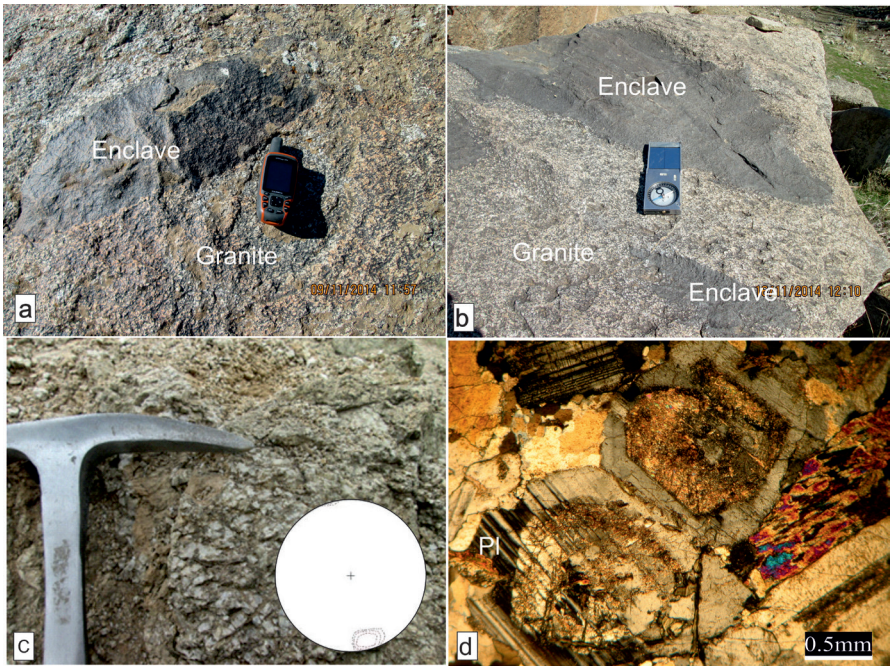


شکل ۶- ارتباط ساختاری برگ‌وارگی میلونیتی توده‌های نفوذی الوند و بروجرد با سنگ میزبان.

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

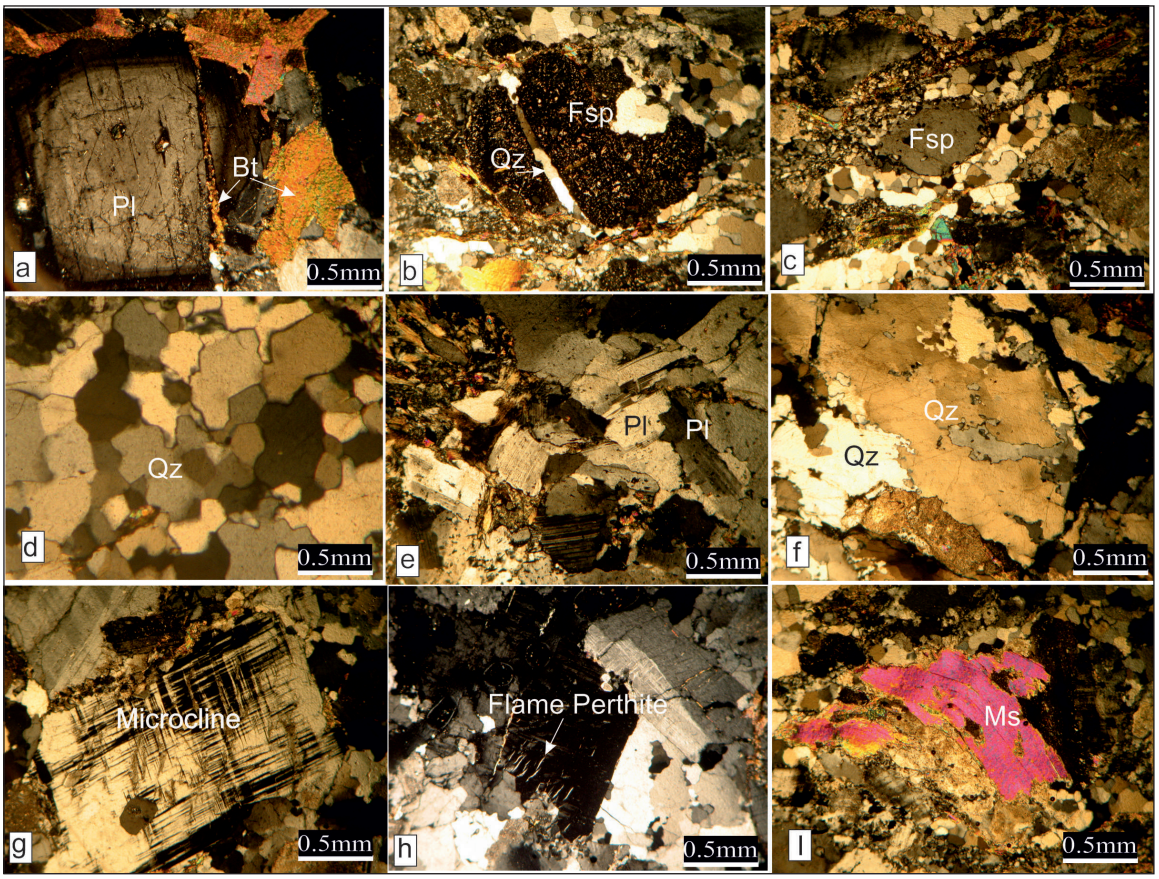
در توده نفوذی بروجرد فابریک‌های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد مشاهده می‌شوند. از شواهد فابریک ماگمایی وجود انکلاوها و فلدسپارهای جهت‌یافته در گرانیت‌ها است. در این توده نسبت به توده الوند، آثار فابریک ماگمایی خیلی کمتر حفظ شده است زیرا فابریک حالت جامد بسیار قوی‌تر است و بر روی فابریک ماگمایی فرانهاده 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 (شکل۷-c). خاموشی منطقه‌بندی (زونینگ) فلدسپار در گرانیت بروجرد بسیار بیشتر از گرانیت الوند مشاهده می‌شود (شکل۷-d) و این خاموشی در شرایط ماگمایی تشکیل می‌شود (Passchier and Trouw, 2005).



شکل۷- فابریک‌های ماگمایی بروجرد: a و b) جهت‌یابی انکلاوهای مافیک درون گرانیت، c)کشیدگی کانی‌های فلدسپار و کنتور 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.

برخی از پورفیروکلاست‌های پلاژیوکلاز در توده نفوذی بروجرد دارای شکستگی‌هایی هستند که توسط کوارتز، بیوتیت و گاهی فلدسپات پتاسیم پرشده‌اند 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 پرشده‌اند 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 (شکل۸-c)، کاهش مساحت مرز دانه‌ها (شکل ۸-d)، ماکل دگریختی فراوان در پلاژیوکلازها (شکل ۸-e) تبلور مجدد بلورهای کوارتز که از نوع و برآمدگی، چرخش ریزبلور (subgrain) و مهاجرت مرز دانه (شکل۸ -f) هستند. همچنین میکروکلین (شکل۸-g)، و بافت پرتیت شعله‌ای (شکل۸- 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 شده اند و ساختار میکاماهی را ایجاد کرده‌اند (شکل۸-i) و می‌توان 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-جنوب خاور و شمال خاور-جنوب باختر است (شکل۶) و جهت شیب برگ‌وارگی به دو سمت شمال خاور، جنوب خاور و تعداد کمی به سمت جنوب باختر هستند . از نظر نسبت آماری پورفیروکلاست 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 شمال‌باختر به سمت جنوب‌خاور کاهش می‌یابد و در قسمت شمال و شمال‌باختر 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 شمال‌باختر، شمال‌خاور و جنوب‌باختر میل دارد. برگ‌وارگی میلونیتی توده بروجرد تقریبا در بیشتر قسمت‌ها با برگ‌وارگی سنگ میزبان هم‌جهت و هم‌راستا است (شکل۶).



شکل۸- فابریک‌های گرانیت بروجرد: a) پلاژیوکلاز با ماکل منطقه‌بندی (زونینگ) و دارای شکستگی که با بیوتیت پر شده (فابریک انتقالی)، b) شکستگی پلاژیوکلاز که با کوارتز پر شده (فابریک انتقالی)، c) بلورمجدد دینامیکی فلدسپار (فابریک حالت جامد)، d) کاهش مساحت مرز دانه در دانه‌های کوارتز (فابریک حالت جامد)، e) ماکل دگریختی پلاژیوکلاز و تبلورمجدد نوع برآمدگی بین بلورهای پلاژیوکلاز (فابریک حالت جامد)، f) مهاجرت مرز دانه‌های کوارتز (فابریک حالت جامد)، g) تشکیل میکروکلین (فابریک حالت جامد)، h) تشکیل پرتیت شعله‌ای (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 فابریک‌ها از حالت ماگمایی به انتقالی و سپس به دگریختی حالت جامد مشاهده می‌شود که بیانگر تبلور تدریجی ماگما همزمان با تداوم دگریختی در یک محیط همگرا است. جهت‌یابی ترجیحی بلورهای فلدسپار و انکلاوهای مختلف در توده، بیانگر فابریک ماگمایی و شکل‌گیری در دمای حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Vernon et al., 2004; Paterson et al., 1998; Bouchez, 1997). حضور شکستگی بلورهای فلدسپار و پرشدگی با کانی‌های تاخیری، نمایانگر فاز انتقالی و شکل‌گیری در دماهای حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است (شکل ۹). تشکیل ماکل‌های دگریختی در پلاژیوکلاز، پرتیت شعله‌ای، کاهش انرژی مرز دانه‌ها و رسیدن به زوایای نزدیک به ۱۲۰ درجه بین دانه‌ها، همگی نشان‌دهنده گذار به دمای پایین‌تر (در حدود ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتی‌گراد) (Owona et al., 2013) و شروع فرایندهای تبلور مجدد و بازتنظیم فابریک در حالت جامد هستند. در ادامه، حضور فابریک S/C، تبلورمجدد فلدسپارها در گرانیت میلونیتی، و ساختارهای جهت‌یافته مسکوویت و میکا ماهی، گویای دگریختی حالت جامد در دماهای پایین‌تر، بین ۳۰۰ تا ۵۰۰ درجه سانتی‌گراد است. این تداوم فابریک‌ها نشان‌دهنده تزریق، تبلور و سردشدن تدریجی ماگما همزمان با دگریختی در یک رژیم زمین‌ساختی فعال است (جدول۲).

۳-۳-۲- توده نفوذی بروجرد

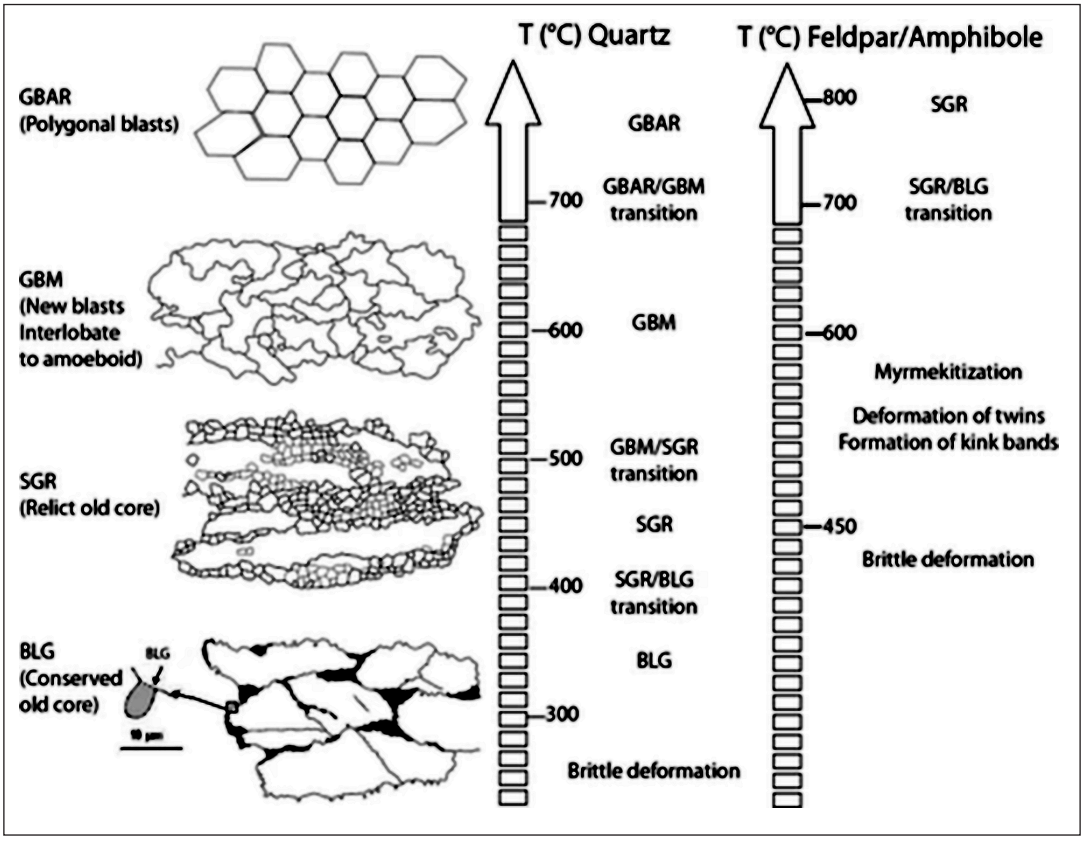
در توده نفوذی بروجرد، توالی منظم و قابل‌ردیابی از فابریک‌های ماگمایی تا دگریختی حالت جامد مشاهده می‌شود که نشان‌دهنده شکل‌گیری و تبلور توده

در یک محیط دگریختی فعال و همزمان با سرد شدن تدریجی ماگما است. حضور ماکل‌های پلی‌سنتتیک و حلقوی در پلاژیوکلازها بیانگر فابریک ماگمایی و تبلور در دماهای بالا، حدود ۷۰۰–۸۰۰ درجه سانتی‌گراد است (Paterson et al., 1998; Vernon, 2004; Bouchez, 1997). شکستگی پلاژیوکلاز و پرشدگی آن با بیوتیت یا کوارتز، نشان‌دهنده فاز انتقالی در دمای حدود ۶۰۰–۷۰۰ درجه سانتی‌گراد است که در آن سنگ به حالت نیمه‌جامد درآمده و شکستگی‌ها توسط کانی‌های تاخیری پر شده‌اند. با کاهش بیشتر دما، شواهد گوناگونی از فابریک‌های دگریختی حالت جامد قابل مشاهده است، از جمله خاموشی موجی بیوتیت، تبلور مجدد دینامیکی فلدسپار، کاهش انرژی مرز دانه در کوارتز، برآمدگی دانه‌ها، چرخش ریزبلورها، مهاجرت مرز دانه‌ها، و تشکیل میکروکلین. همچنین حضور پرتیت شعله‌ای و ماکل‌های دگریختی در پلاژیوکلازها، نشان‌دهنده شرایط دمایی پایین‌تر (در حدود ۳۰۰–۵۵۰ درجه سانتی‌گراد) (Owona et al., 2013) و دگریختی در فاز جامد است. این شواهد در مجموع گویای این هستند که گرانیت بروجرد نه‌تنها در شرایط زمین‌ساختی فعال تزریق و تبلور یافته، بلکه در مراحل پس از تبلور نیز تحت تاثیر دگریختی حالت جامد قرار گرفته است (جدول۲).

جدول۲- مقایسه فابریک‌های گرانیت 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 تبلورمجدد 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

توده‌های نفوذی الوند و بروجرد هر ۳ فابریک‌های ماگمایی، انتقالی و حالت جامد را با سهم‌های مختلف نشان می‌دهند که بازتاب مستقیم شرایط ساختاری و تفاوت شدت دگرشکلی آن‌ها در پهنه سنندج-سیرجان است. در توده نفوذی الوند، فابریک ماگمایی به خوبی حفظ شده است، ولی فابریک حالت جامد (میلونیتی) در این توده به‌صورت محلی دیده می‌شود. در توده نفوذی بروجرد فابریک حالت جامد قوی‌تر است و سبب شده فابریک ماگمایی به خوبی در این توده مشاهده نشود. توده نفوذی بروجرد نسبت به توده نفوذی الوند در فاصله نزدیک‌تری از زمین‌درز زاگرس (شکل ۱) گسل اصلی زاگرس قرار دارد و این موضوع سبب شده توده بروجرد پس از تبلور نهایی تحت تاثیر کرنش‌های برشی شدید قرار گرفته و فابریک‌های حالت جامد و میلونیتی در آن به‌طور گسترده توسعه یابد. کشیدگی توده بروجرد در راستای امتداد کمربند کوهزایی نیز گویای کنترل قوی میدان تنش منطقه‌ای 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 توده‌های نفوذی دارد. در سیستم‌های بسته، ماگما پس از جایگیری در اتاق ماگمایی، بدون تبادل جرم با محیط اطراف، تنها تحت فرایندهایی مانند تبلور تفریقی (Fractional Crystallization)، ته‌نشینی بلورها، و جداشدن گاز دچار تحول می‌شود (Bowen, 1928; Ghiorso and Sack, 1995). ترکیب‌شیمیایی مایع ماگمایی در چنین سیستمی به‌صورت درونی و تدریجی تغییر می‌یابد. در مقابل، در سیستم‌های باز با ورود پالس‌های ماگمایی جدید (recharge)، آمیختگی ماگماها (magma mixing/mingling) (شکل ۲-c)، جذب سنگ‌های دیواره (assimilation) (شکل ۲ -f) و خروج گاز (degassing) صورت می‌گیرد (Huppert and Sparks, 1988; Bachmann and Bergantz, 2004; Bohrson et al., 2014). پیامد چنین پویایی، شکل‌گیری فابریک‌های پیچیده، ناهمگونی‌های بافتی، پهنه‌بندی‌های غیرعادی در بلورها، انکلاوهای مافیک، دایک‌های هم‌زمان و شواهد دگریختی در حین تبلور است (Wiebe et al., 1997; Perugini and Poli, 2005). گرانیت بروجرد شواهد روشنی از یک سیستم تقریبا بسته‌تر نسبت به توده الوند ارائه می‌دهد. در این توده، با توجه به منشا پوسته‌ای ماگما و فقدان سنگ‌های مافیک همزاد (Ahmadi Khalaji et al., 2007)، تکامل ماگما به‌طور عمده از طریق تفریق بلوری در یک سیستم بسته تا نیمه‌بسته صورت گرفته است، در حالی‌که حضور گابروها در الوند نشان‌دهنده رفتار سیستم باز و نقش پررنگ‌تر تزریق ماگمای مافیک است. این ویژگی‌ها بیانگر سرد شدن آرام و تبلور منظم در یک اتاق ماگمایی نسبتا ایستا و بسته‌تری نسبت به توده نفوذی الوند است (Glazner et al., 2004). در مقابل، گرانیت الوند مجموعه‌ای از شواهد کلاسیک سیستم ماگمایی باز را در خود دارد. حضور فابریک‌های ماگمایی و ساب‌ماگمایی خوب‌حفظ‌شده ، همراه با جهت‌یابی ترجیحی قوی بلورهای فلدسپار، نشان‌دهنده تبلور همزمان با جریان فعال ماگما هستند. مسیر جریان ماگما در بیشتر بخش‌های توده با دیواره سنگ میزبان هم‌راستا نبوده، بلکه آن را قطع کرده است. این وضعیت بیانگر جریان ماگمایی غیرهم‌مرکز و همزمان با تنش‌های زمین‌ساختی است. چنین ویژگی‌هایی تنها در محیط‌های باز و پویا که در آن ماگما تحت تاثیر تنش‌های برون‌زا قرار دارد قابل‌توجیه هستند (Paterson et al., 2011). یکی از شواهد مهم در تایید سیستم باز در الوند، حضور دایک‌های بازیک هم‌زمان با پلوتونیسم است. این دایک‌ها که بیشتر دارای ارتباط زمانی یکسان

با توده فلسیک هستند، بیانگر ورود پالس‌های ماگمایی مافیک به اتاق ماگما در طول تبلور هستند (شکیبا و سپاهی، ۱۴۰۰). تزریق چنین ماگماهایی نه‌تنها موجب تحریک تبلور مجدد می‌شود، بلکه شرایط را برای اختلاط ماگما (magma mixing) یا آمیختگی (magma mingling) نیز فراهم می‌سازد (Wiebe et al., 1997; Perugini and Poli, 2005). در توده نفوذی الوند، حضور انکلاوهای مافیک با مرزهای واکنشی، پهنه‌بندی پیچیده در درشت‌بلورها (فنوکریست‌ها) و ساختارهای آمیخته فلسیک-مافیک آشکارا نشان می‌دهد که این توده در نتیجه پویایی شدید ماگمایی شکل گرفته است. وجود انکلاوهای گرد، کشیده یا دارای هاله‌های تعاملی با میزبان فلسیک، شواهد بی‌واسطه‌ای از آمیختگی ماگمایی (Mingling) است، در حالی که پهنه‌بندی ناپایدار یا فلدسپارهای معکوس نشانه‌هایی از اختلاط ماگمایی (Mixing) هستند. از سوی دیگر، دگریختی حالت جامد در گرانیت الوند نیز شایان توجه است، ولی شدت آن نسبت به گرانیت بروجرد کمتر است. با این حال، پیوستگی میان فازهای ماگمایی، ساب‌ماگمایی و جامد نشان می‌دهد (Bachmann and Bergantz, 2004) که دگرشکلی در الوند و بروجرد به‌صورت پیوسته و همزمان با سرد شدن رخ داده است.

۵- نتیجه گیری

مقایسه فابریک‌های توده‌های نفوذی الوند و بروجرد در پهنه سنندج-سیرجان نشان می‌دهد که این دو توده، به‌رغم قرارگیری در یک محیط ژئودینامیکی مشابه، پیشینه تغییر شکل و دگرشکلی متمایزی را تجربه کرده‌اند. گرانیت بروجرد تحت تاثیر تنش‌های زمین‌ساختی شدیدتری قرار گرفته که به تخریب فابریک ماگمایی اولیه و تشکیل فابریک‌های میلونیتی گسترده انجامیده است. در مقابل، گرانیت الوند تغییر شکل‌های ملایم‌تری را متحمل شده و فابریک‌های ماگمایی و انتقالی در آن بهتر حفظ شده‌اند. این تفاوت‌ها احتمالا ناشی از موقعیت متفاوت این دو توده و ژرفای بیشتر توده الوند نسبت به توده بروجرد در پهنه سنندج-سیرجان نسبت به پهنه برخوردی و تاثیرپذیری آن‌ها از رویدادهای زمین‌ساختی مختلف در طول زمان است. شواهد فابریک انتقالی در هر دو توده نشان می‌دهد که بین فاز ماگمایی و جامد وقفه‌ای رخ نداده است. پیوستگی دگرشکلی در حین سرد شدن، تنها در مناطقی با نرخ کرنش (استرین) بالا (مانند تزریق ماگما به پهنه برشی) مشاهده می‌شود. یافته‌ها نشان می‌دهند که گرانیت الوند نیز افزون بر فابریک‌های ماگمایی و انتقالی، تمام شواهد کلیدی دگریختی حالت جامد را نیز دارد. بنابراین، هر دو توده در محیط شکل‌پذیر تشکیل و تکامل یافته‌اند، اما شدت و توزیع فازهای تغییرشکل در آن‌ها متفاوت است. به‌طور مشخص، توده الوند در فاز ماگمایی قوی‌تر بوده، در حالی‌که توده بروجرد تغییرشکل بیشتری در فاز جامد نشان می‌دهد. با این حال، تفاوت اصلی در توزیع و پهنه‌بندی کرنش (strain partitioning) است، به‌طوری‌که درتوده الوند بیشترین تغییر شکل در فاز ماگمایی رخ داده، در حالی‌که توده بروجرد عمدتا در فاز جامد دچار دگریختی شده است. این مشاهدات آشکارا نشان می‌دهد که چگونه تعامل پیچیده بین شرایط اتاق ماگمایی، رژیم‌های تنشی و پهنه‌بندی دگریختی می‌تواند به الگوهای متفاوتی از سازمان‌یابی ساختاری در توده‌های گرانیتی هم‌زمان بیانجامد. یافته‌های این مطالعه بر اهمیت موقعیت ساختاری و تاثیر همزمان فرایندهای ماگماتیسم و زمین‌ساخت در کنترل مسیر تکامل توده‌های گرانیتی تاکید می‌کند.

سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند از حمایت‌های مالی دانشگاه بوعلی‌سینا 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 می‌دارند.

کتابنگاری

احمدی خلج، ا.، اسماعیلی، د.، ولی زاده، م.، ۱۳۸۵، خاستگاه و ویژگی‌های زمین‌ساختی توده گرانیتوییدی بروجرد (باختر ایران)، فصلنامه علوم زمین، ۱۵(۶۰)، ۳۲-۴۷.

ایزدی‌کیان، ل.، صدر، ا. ح.، ربانی، ش.، ۱۳۹۶، تحلیل ساختاری گرانیت میلونیتی خاور و جنوب‌خاور بروجرد. پژوهش‌های دانش زمین، ۸(۴)، ۱-۱۵. https://dor.isc.ac/dor/20.1001.1.20088299.1396.8.4.1.5

سهیلی، م.، ۱۳۷۱، نقشه زمین‌شناسی بروجرد، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

سبزه ئی، م.، مجیدی، ب.، عمیدی، س. م.، علوی تهرانی، م، قرشی، م.، ۱۳۶۵، نقشه زمین‌شناسی همدان، مقیاس ۱:۲۵۰,۰۰۰، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

شکیبا، س. و سپاهی‌گرو، ع.ا.، ۱۴۰۰، سنگ‌نگاری، زمین‌شیمی و تحلیل فرکتال انکلاوهای مافیک توده آذرین درونی الوند برای بررسی فرایند آمیختگی ماگمایی. پترولوژی، ۱۲(۲)، 43-۷۰. 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., Esmaeily, 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., Esmaeily, 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.jseaes.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.

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., Ghiorso, 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.jseaes.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.jseaes.2005.01.003.

Ghiorso, 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.

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.jseaes.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.jseaes.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.

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., Ondoa, 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.

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.

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.jseaes.2014.04.008.

Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, 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.jseaes.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 Esmaeili, 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.