

Research Article

## Microstructure influence on the response of granitoids to thermal Shock

Leila Ahmadi<sup>1</sup>, Mohamad Hosein Ghobadi<sup>1\*</sup>, Ali Asghar Sepahi Garou<sup>1</sup>, Leili Izadi Kian<sup>1</sup>, Seyedeh Razieh Jafari<sup>2</sup>

1-Geology Department, Faculty of Science, Bu-Ali Sina University, Hamedan

2-Department of Geology, Payame Noor University, PO BOX 19359-3697, Tehran, Iran

**Keywords:** *Crack Density, Granitoides, Thermal Shock, Grain Boundary, Texture.*

### 1-Introduction

Nowadays, granitoid masses are of interest due to their high strength, low porosity and various applications. The rock masses are considered as places for radioactive waste and toxic materials disposal, carbon dioxide storage, thermal drilling and enhanced geothermal systems. Extreme temperature changes are common in such cases and can have destructive effects on the primary structure of the rock. Induced microcracks (Tian et al., 2012) and opening passageways for the entry of fluids are some effects of thermal changes and shock, which result in increment of the granitoid mass permeability and creation of suitable places to fracture due to tectonic stresses (Dwivedi et al., 2008; Rathnaweera et al., 2018; Kang and Li, 2021). The rocks in nature inherently have characteristics that are measured in laboratory tests as physical characteristics. These properties such as density, porosity, texture and particle size are effective on the mechanical behaviour of rock, and some of them change with temperature change (Benson et al., 2007; Yang et al., 2017). The variation of mechanical properties affected by temperature are related to factors such as primary pore structure, particle size, mineral composition, mineral texture, and water content (Mo et al., 2022). The thermal properties of rocks are mainly measured by two indices of thermal conductivity and thermal expansion, although thermal conductivity is related to thermal diffusivity, specific heat and density (Siegesmund and Snethlage, 2011).

Among the rocks, quartz-rich rocks exhibit a higher average thermal conductivity, whereas rocks with increasing feldspar contents show decrement in thermal conductivity values (Siegesmund and Snethlage, 2011; Ray et al., 2021). Thermal conductivity decreases with increasing temperature. (Görgülü et al., 2008; Fuchs and Förster, 2010; Qin et al., 2020; Ye et al., 2022). Thermal conductivity increases with increasing pressure, especially in the low pressure range, which was attributed to the closure of microcracks and voids (Siegesmund and Snethlage, 2011). In oriented rocks and minerals heat transfer and diffusion depends on the direction of minerals and layering in rocks. Mica minerals especially muscovite, have good thermal conductivity parallel to layering. Phyllosilicate minerals like illite, muscovite and chlorite also play a similar role. But quartz itself exhibits an 42% anisotropy in two perpendicular directions (Siegesmund and Snethlage, 2011). In thermal shock, heating and cooling have different effect on the rock volumetric expansion and anisotropy of thermal expansion as well as residual expansion causes permanent length change which is related to the formation of thermal cracks (Den'gina et al., 1993).

The coefficient of thermal expansion determines the material's response to heat or cold. The residual strain after exposure to a heat determines the thermal sensitivity of the rock. In a rock that consists of different minerals, the interaction of all the mentioned factors leads to microcracks and thermally induced cracks in the rocks. Thermal cracking, in coarse-grained, quartz-rich rocks is dominant during heating (expansion) while in fine-grained, quartz-poor rock, is dominant during cooling (contraction) (Browning

\* Corresponding author : amirghobadi@yahoo.com

et al, 2016; Meredith et al, 2019; Browning et al, 2021). Rocks such as granit, neurite and quartzite under the condition of the earth crust with temperatures up to 900 c and higher pressures undergo thermal cracks (Ide, 1937; Richter and Simmons, 1974; Simmons and Cooper, 1978; Bauer and Johnson, 1979; Glover et al., 1995; Lu and Jackson, 1998; Liu et al., 2021; Feng et al., 2021; Guo et al., 2021).

For research about the effect of heat on granitoids, three different fresh granitoid samples have been examined in terms of physical, mineralogical characteristics and the development of microcracks. They were subjected to 4 different temperature shocks and the thermal shock effects on development of microcracks was described by using PPL and XPL photos of the samples' thin section. This study has depicted the behaviour of minerals and various textures of granitoids after different shocks also has shown the destructive effects of thermal shock on the initial structure of them. Study of thermal shock effects that lead to development of microcracks and passages could be useful in evaluating how to increase permeability the granitoid masses.

## 2- Materials and Methods

For this study 3 granitoids samples were prepared from 3 different mass located in the structural zone of Sanandaj-Sirjan which were subjected to different tests before and after thermal shock. Samples were taken from Hasan rebat mass at Golpaygan area, Alvand Mass at Hamedan area and Marivan mass at northern area of Marivan. Samples were prepared as follows: blocks were moved from mass place to the laboratory. They were cored and then cut into 3 cm height. Microscopic thin sections were prepared from fresh samples in 3 perpendicular directions. In order to induce thermal microcrack, the samples were heated in a high temperature furnace up to the desired temperature at a rate of 5 (C°/min) and kept at intended temperature for 2 hours to ensure entire samples volume were completely isothermal. Temperatures were 250, 450, 650, 850 C°. Then the samples were removed from the furnace, they were immediately immersed in municipal water (20 to 25 C°). Immersion was continued until the samples were at the same temperature as water, because of this, water flow into the bucket has been continued. For preparing to three-dimensional sectioning, the shocked samples were dried in an oven (max 50 c). Three perpendicular directions including two diametric directions and one axial direction, were determined on the cores from the first sampling to the last stage of each test. Two diametric directions were named “R plane” & “B plane” and the axial plane which was perpendicular to the axis the cores and was perpendicular to the two diametric directions, called “N plane”. To determine lithological characteristics and liner crack density thin sections inspection of fresh and shocked samples were done in three directions. Physical properties were determined based on ISRM standard tests. The thermal shock effects on granitoids were explained by using SEM images, thin section images and images of macroscopic samples.

## 3-Conclusion

This research showed that it is possible to evaluate how the sample reacts to heat by microscopic examination of the thin section of fresh samples. In short, we can say:

In the studied granitoids, medium grain size and uniform texture also various boundaries (smooth and jogged) could increase the resistance of the granitoid against the formation of microcracks.

The presence of myrmekite texture makes granitoid susceptible to the formation of transgranular microcracks.

Micas and quartz as inclusion inside coarse minerals could cause the formation of intragranular microcracks.

In general, very few microcracks generate in plagioclase unlike the orthoclase which the most microcracks form inside it.

Mostly intragranular microcracks form at cleavage and perthite texture site inside the orthoclase.

smooth boundaries abundance and jagged boundaries abundance have a positive effect on the development of microcracks.

In coarse-grained granitoid, increment of very fine or very coarse mineral abundance, cause accelerate the development of microcracks.

According to the average grain size, it was expected that the Hasan Rabat sample be in an intermediate state compared to the other samples. Meanwhile the development rate of microcracks induced by thermal

shock in the Alvand and Marivan sample are similar, their grain sizes are completely different. Hasan Rebat sample shows completely different behaviour in development rate of all kind of microcrack (intra-, trans- and intergranular). Results demonstrated that the absolute age of granitoids is an important factor in the rate and manner of microcrack development.

## References

- Bauer, S.J., Johnson, B., 1979. Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites. 20th US symposium on rock mechanics (USRMS). OnePetro.
- Benson, P.M., Thompson, B.D., Meredith, P.G., Vinciguerra, S., Young, R.P., 2007. Imaging slow failure in triaxially deformed Etna basalt using 3D acoustic-emission location and X-ray computed tomography. *Geophysical Research Letters* 34. <https://doi.org/10.1029/2006GL028721>
- Browning, J., Meredith, P., Gudmundsson, A., 2016. Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks. *Geophysical Research Letters* 43, 8417-8425. <https://doi.org/10.1002/2016GL070532>
- Browning, J., Meredith, P., Mitchell, T., Daoud, A., Karaoglu, O., Oskouei, S., Bayer, O., 2021. Microstructural Controls on Thermally-Induced Crack Damage in Rocks. AGU Fall Meeting Abstracts, pp. EP54B-02. 2021AGUFMEP54B..02B
- Den'gina, N. I., Kazak, V.N., Pristash, V.V., 1993. Changes in rocks at high temperatures. *Journal of mining science* 29, 472-477. <https://doi.org/10.1007/BF00733026>
- Dwivedi, R.D., Goel, R.K., Prasad, V.V. R., Sinha, A., 2008. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock mechanics and mining Sciences* 45, 303-315. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.05.008>
- Feng, Z.J., Zhao, Y.S., Liu, D.N., 2021. Permeability evolution of thermally cracked granite with different grain sizes. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 54, 1953-1967. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02361-3>
- Fuchs, S., Förster, A., 2010. Rock thermal conductivity of Mesozoic geothermal aquifers in the Northeast German Basin. *Geochemistry* 70, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2010.05.010>
- Glover, P.W., Baud, P., Darot, M., Meredith, P., Boon, S.A., LeRavalec, M., Reuschlé, T., 1995. Alpha/beta phase transition in quartz monitored using acoustic emissions. *Geophysical Journal International* 120, 775-782. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb01852.x>
- Görgülü, K., Durutürk, Y.S., Demirci, A., Poyraz, B., 2008. Influences of uniaxial stress and moisture content on the thermal conductivity of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45, 1439-1445. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.02.004>
- Guo, P., Wu, S., Zhang, G., Chu, C., 2021. Effects of thermally-induced cracks on acoustic emission characteristics of granite under tensile conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 144, 104820. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104820>
- Ide, J.M., 1937. The velocity of sound in rocks and glasses as a function of temperature. *The Journal of Geology* 45, 689-716. <https://doi.org/10.1086/624595>
- Kang, F., Li, Y., 2021. Grain size heterogeneity controls strengthening to weakening of granite over high-temperature treatment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 145, 104848. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104848>
- Liu, W., Zhu, X., Lv, Y., Tong, H., 2021. On the mechanism of thermally induced micro-cracking assisted rock cutting in hard formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 196, 107666. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107666>
- Lu, C., Jackson, I., 1998. Seismic-frequency laboratory measurements of shear mode viscoelasticity in crustal rocks II: thermally stressed quartzite and granite. In *Q of the Earth: Global, Regional, and Laboratory Studies* 441-473. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8711-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8711-3_10)
- Meredith, P., Daoud, A., Browning, J., Mitchell, T., 2019. Microstructural controls on thermal crack damage during temperature-cycling experiments on volcanic rocks. In *Geophysical Research Abstracts* 21.
- Mo, C., Zhao, J., Zhang, D., 2022. Real-Time Measurement of Mechanical Behaviour of Granite During Heating–Cooling Cycle: A Mineralogical Perspective. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 55, 4404-4422. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02867-y>

- Qin, Y., Tian, H., Xu, N.X., Chen, Y., 2020. Physical and mechanical properties of granite after high-temperature treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53, 305-322. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01919-0>
- Rathnaweera, T.D., Ranjith, P.G., Gu, X., Perera, M.S.A., Kumari, W.G.P., Wanniarachchi, W.A.M., Li, J.C., 2018. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 107, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.048>
- Ray, L., Chopra, N., Hiloidari, S., Naidu, N.N., Kumar, V., 2021. Thermal conductivity of granitoids of varying composition up to 300° C and implications for crustal thermal models. *Geophysical Journal International* 227, 316-332. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab191>
- Richter, D., Simmons, G., 1974. Thermal expansion behaviour of igneous rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 11, 403-411. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91111-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91111-5)
- Siegesmund, S., Sneathlge, R., 2011. *Stone in architecture: properties, durability*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>
- Simmons, G., Cooper, H.W., 1978. Thermal cycling cracks in three igneous rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15, 145-148. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91220-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91220-2)
- Tian, H., Kempka, T., Xu, N.X., Ziegler, M., 2012. Physical properties of sandstones after high temperature treatment. *Rock mechanics and rock engineering*, 45, 1113-1117. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0228-z>
- Ye, X., Yu, Z., Zhang, Y., Kang, J., Wu, S., Yang, T., Gao, P., 2022. Mineral Composition Impact on the Thermal Conductivity of Granites Based on Geothermal Field Experiments in the Songliao and Gonghe Basins, China. *Minerals* 12, 247. <https://doi.org/10.3390/min12020247>

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Ahmadi, L., Ghobadi, M.H., Sepahi Garou, A.A., Izadi Kian, L., Jafari, R., 2023. Microstructure influence on the response of granitoids to thermal Shock. *Adv. Appl. Geol.* 13(1), 337-363.

DOI : 10.22055/aag.2022.41417.2304

[https://aag.scu.ac.ir/article\\_17957.html](https://aag.scu.ac.ir/article_17957.html)

©2023 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

## تأثیر ریزساختارها بر پاسخ گرانیته‌ی‌ها به شوک حرارتی

لیلا احمدی

دانشجوی دکتری زمین شناسی مهندسی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

محمدحسین قبادی

عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا

علی اصغر سپاهی گرو

عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا

لیلی ایزدی کیان

عضو هیئت علمی دانشگاه بوعلی سینا

سیده راضیه جعفری

استادیار گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران

amirghobadi@yahoo.com

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۰۱ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۹/۲۷

### چکیده

سنگ‌های گرانیته‌ی‌ی کاربردی وسیعی در بسیاری از پروژه‌های عمرانی داشته و بررسی ریزترک‌های موجود و یا القاء شده در آن‌ها موضوع پژوهش‌های متعددی بوده است. از آنجایی که ویژگی‌های حرارتی یک سنگ متأثر از ویژگی‌های حرارتی تمام کانی‌های تشکیل‌دهنده سنگ است، بررسی مقاطع میکروسکوپی برآیند آن‌ها را به صورت تشکیل ریزترک نشان می‌دهد. در این مطالعه، در سه نمونه گرانیته‌ی‌ی درشت‌دانه با استفاده از حرارت در کوره و سپس شوک با آب سرد، القاء ریزترک انجام گرفته است. توسعه ریزترک‌ها در نمونه‌ها در حالت تازه و پس از شوک حرارتی در دماهای ۲۵۰ و ۴۵۰ و ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد با استفاده از نمونه‌های ماکروسکوپی مغزه، بررسی مقاطع نازک میکروسکوپی، تصاویر SEM و اندازه‌گیری دانسیته ترک در سه جهت فضایی عمود بر هم در نمونه‌ها برآورد شد. بررسی مقاطع میکروسکوپی نشان داد یکنواختی اندازه دانه‌ها و تنوع مرزها باعث عدم گسترش شبکه ریزترک می‌گردد. وجود برخی کانی‌ها مانند میکا و آمفیبول تأثیر خاص بر نحوه توسعه ترک‌ها دارند به نحوی که غالباً منشأ یا پایان ریزترک هستند. بررسی دانسیته ترک نشان داد، انواع ریزترک‌ها (درونی و مرزی و سراسری) در نمونه‌های مختلف به شیوه متفاوتی توسعه می‌یابند که از سن مطلق سنگ نیز تأثیر می‌پذیرد. گرانیته‌ی‌ها با میانگین اندازه ذرات ۵ میلی‌متر مقاومت بهتری در برابر توسعه ترک داشتند. بافت میرمیکیتی باعث تسریع توسعه ریزترک‌های سراسری می‌گردد. کانی پلاژیوکلاز کمترین و کانی ارتوکلاز بیشترین تعداد ریزترک‌ها را پس از شوک حرارتی داشتند. در شوک‌های حرارتی ۲۵۰ و ۴۵۰ درجه توسعه ریزترک‌ها متأثر از تخلخل نیز می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** دانسیته ترک، گرانیته‌ی‌ی، شوک حرارتی، مرز دانه‌ها، بافت.

### ۱- مقدمه

پروژه مورد نظر دچار اشکال نماید. از اثرات تغییرات و شوک حرارتی می‌توان به ایجاد ریزترک‌ها (Tian et al., 2012) و گشایش معبر برای ورود سیالات و در نتیجه افزایش نفوذپذیری توده گرانیته‌ی‌ی و ایجاد محل‌های مستعد شکستگی در اثر تنش‌های تکنونیک اشاره کرد (Dwivedi et al., 2008; Rathnaweera et al., 2018; kang and Li, 2021) که تمامی موارد مذکور تهدیدی برای عملکرد مناسب توده سنگ محسوب می‌گردند.

امروزه توده‌های گرانیته‌ی‌ی به دلیل استحکام زیاد، تخلخل کم و نیز کاربردهای متنوع مورد توجه قرار دارند. توده سنگ‌های مذکور به‌عنوان مدفن مواد رادیواکتیو و سمی، محل ذخیره دی‌اکسید کربن و نیز محل مناسب جهت استحصال انرژی از سیستم‌های زمین‌گرمایی مدنظر هستند. تغییرات شدید دمایی در این گونه موارد معمول است و می‌تواند اثرات مخربی بر ساختار اولیه و فیزیکی سنگ وارد نماید و رفتار مکانیکی سنگ را تحت تأثیر قرار دهد به نحوی که عملکرد توده سنگ را در

انتقال و انتشار حرارت وابسته به جهت کانی‌ها و لایه‌بندی در سنگ‌هاست. این موضوع بیشتر به دلیل جهت یافتگی کانی‌های میکا به‌ویژه مسکویت است که در جهت موازی با لایه‌بندی، هدایت حرارتی خوبی دارند و کمتر به موضوع هدایت حرارتی خود کانی‌ها مرتبط است. در کانی مسکویت در جهت موازی و عمود بر لایه‌بندی تفاوت ۵۰۰ درصدی وجود دارد. کانی‌های فیلو سیلیکات ایلیت - مسکویت و کلریت نیز نقش مشابهی دارند. جهت یافتگی کوارتزها نیز در سنگ به دلیل ایجاد همسانگردی کلی می‌تواند در این زمینه نقش فرعی داشته باشند اما کوارتز در دو جهت عمود بر هم در انتقال و انتشار حرارت، می‌تواند آنیزوتروپی ۴۲ درصدی بسته به جهت قرارگیری در سنگ، ایجاد نماید (Siegesmund and Snethlage, 2011).

هنگامی که سنگ گرم شده، منبسط و زمانی که سرد شده، منقبض می‌شود، این ضریب انبساط حرارتی است که پاسخ مواد را به گرما یا سرما مشخص می‌نماید. کرنش باقیمانده پس از قرار گرفتن در معرض یک حرارت، حساسیت حرارتی سنگ را مشخص می‌کند. در یک سنگ که متشکل از کانی‌های مختلفی است برهم‌کنش تمام فاکتورهای مذکور منتهی به ایجاد ریزترک و ترک‌های القایی حرارتی در سنگ می‌گردد. سنگ‌های درشت دانه غنی از کوارتز در حین دریافت حرارت (انبساط) و سنگ‌های ریزدانه و فقیر از کوارتز در حین سرد شدن (انقباض) دچار ریزترک می‌گردند (Browning et al, 2016; Meredith et al, 2021; Browning et al, 2021). سنگ‌هایی که از کانی‌های مختلفی تشکیل شده‌اند، وقتی در اثر حرارت منبسط می‌شوند با توجه به وجود کانی‌های متفاوت، انبساط غیرخطی دارند بنابراین انبساط چنین سنگ‌هایی همسانگرد نیست اما به دلیل فقدان جهت یافتگی ترجیحی، کمابیش انبساط در جهات مختلف در سنگ برابر است. البته مقدار انبساط خطی کانی‌های تشکیل دهنده یک سنگ در محدوده خاصی معتبر است و انبساط حرارتی نیز با افزایش دما رابطه خطی ندارد. در شرایط پوسته زمین با دمایی تا ۹۰۰ درجه سانتی‌گراد و فشارهای بالاتر سنگ‌هایی مانند گرانیت، نوریت و کوارتزیت دچار ترک‌های ناشی از حرارت می‌شوند (Ide, 1937; Rishter and Simons, 1974; Simmons and cooper, 1978; Bauer and Johnson, 1979; Glover et al., 1995; Lu and Jackson, 1998; Liu et al., 2021; Feng et al., 2021; Guo et al., 2021). انبساط حرارتی در سنگ‌ها باعث ایجاد افزایش طول

سنگ‌های موجود در طبیعت به‌طور ذاتی دارای خصوصیتی هستند که در آزمون‌های آزمایشگاهی و تحت عنوان خصوصیات فیزیکی بررسی و اندازه‌گیری می‌شوند. این خصوصیات مانند چگالی، تخلخل، بافت و اندازه ذرات روی رفتار مکانیکی سنگ مؤثرند و برخی از این خصوصیات با تغییر دما تغییر می‌یابند (Benson et al., 2007; Yang et al., 2017). تغییرات خصوصیات مکانیکی متأثر از تغییرات دمایی به فاکتورهایی از قبیل ساختار تخلخل اولیه، اندازه ذرات، ترکیب ذرات، بافت کانی‌ها و محتوی آب کانی‌ها و سنگ مرتبط است (Mo et al., 2022). حفرات، ریزترک‌ها و خلل و فرج و مرز بین ذرات از جمله نقاط ضعف موجود در سنگ است و تحت تاثیر تغییرات دما می‌توانند مسیرهایی را برای ورود سیالات و عوامل مخرب باز نمایند. تغییرات رطوبتی و حرارتی از اولین عوامل مؤثر بر تخریب و فروپاشی سنگ هستند. معمولاً این تغییرات با نام هوازدگی فیزیکی شناخته می‌شوند و غالباً زمینه‌ساز ایجاد هوازدگی شیمیایی می‌گردند. خصوصیات حرارتی سنگ‌ها به‌طور عمده با دو شاخص هدایت حرارتی و انبساط حرارتی سنجیده می‌شوند، البته هدایت حرارتی با خصوصیتی مانند رسانایی حرارتی، ثابت ویژه گرمایی و چگالی مرتبط است (Siegesmund and Snethlage, 2011).

کانی‌های تشکیل دهنده گرانیتوئیدها به دلیل ویژگی‌های حرارتی مختلف، واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند که منشأ ایجاد ریزترک‌ها می‌گردند. کانی‌های تشکیل دهنده این سنگ، گستره وسیعی از مقادیر هدایت حرارتی دارند. سنگ‌های غنی از کوارتز میانگین هدایت حرارتی بالاتری دارند، درحالی‌که در سنگ‌های غنی از فلدسپات، مقادیر هدایت حرارتی کاهش می‌یابد (Snethlage, 2011; Ray et Siegesmund and al., 2021). هدایت حرارتی با افزایش دما کاهش می‌یابد. بدیهی است که تخلخل و وجود سیال منفذی (هوا یا مخلوط هوا-آب) ممکن است هدایت حرارتی را به دلیل کاهش چگالی ظاهری که خود منتج از افزایش تخلخل است، کاهش دهد (Görgülü et al., 2008; Fuchs and Förster, 2010; Qin et al., 2020; Ye et al., 2022). هدایت حرارتی با افزایش فشار افزایش یافته و بیشترین نرخ افزایش هدایت حرارتی با افزایش فشار در محدوده کم‌فشار رخ می‌دهد که متأثر از بسته شدن ریزترک‌ها و حفره‌های سنگ می‌باشد (Siegesmund and Snethlage, 2011). در سنگ‌ها و نیز کانی‌های جهت‌دار

گرانیتوئیدی مسته کوه واقع در شرق روستای حسن رباط واقع در منطقه گلپایگان و از مختصات  $33^{\circ}26'45''$  شرقی و  $50^{\circ}03'50''$  شمالی برداشت گردیده و محل برداشت نمونه‌ها در شکل ۱ با علامت اختصاری AL، HR و MA نشان داده شده است.

سه نمونه گرانیتوئیدی برداشت شده، به صورت بکر و نیز پس از اعمال شوک حرارتی تحت آزمون‌های مختلف قرار گرفتند. نحوه آماده‌سازی نمونه‌ها نیز به این شرح بود که نمونه بلوک‌ها پس از انتقال از محل توده گرانیتوئیدی به آزمایشگاه مغزه‌گیری گردیده سپس به طول ۳ سانتی‌متر بریده شدند. از نمونه‌های تازه در سه جهت عمود بر هم مقطع نازک میکروسکوپی تهیه گردید. به منظور القا ریزترک حرارتی نمونه‌ها دیسکی فقط یک بار در کوره دما بالا تا حرارت مورد نظر با نرخ ۵ درجه در دقیقه حرارت داده شده و دو ساعت در حرارت مذکور نگاه داشته شدند تا از هم‌دمایی کامل کل حجم نمونه اطمینان حاصل گردد. حرارت‌ها عبارت بودند از ۲۵۰ و ۴۵۰ و ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه سانتی‌گراد. سپس نمونه‌ها از کوره خارج شده و بلافاصله در آب سرد (آب‌لوله‌کشی شهری) با دمای ۲۰ تا ۲۵ درجه سانتی‌گراد غوطه‌ور می‌گردیدند. برای خشک کردن، به نمونه‌ها حداکثر ۵۰ درجه سانتی‌گراد حرارت داده شد به همین دلیل دمای شوک نمونه‌های تازه ۵۰ درجه در نظر گرفته شده است. غوطه‌وری تا هم‌دما شدن نمونه‌ها با آب ادامه می‌یافت و به این منظور جریان آب به درون ظرف محتوی آب و نمونه‌ها برقرار بود. سپس نمونه‌های شوک دیده برای مقطع‌گیری سه جهتی در آون با دمای ۵۰ درجه خشک گردیدند. سه جهت عمود برهم شامل دو جهت قطری R و B و یک جهت محوری N بر روی مغزه‌ها بود که از آغاز نمونه برداری و تهیه مغزه تا آخرین مرحله هر آزمون مشخص و در طی آزمایشات حفظ گردید.

## ۲-۲- آزمایش‌ها

خصوصیات فیزیکی گرانیتوئیدها بر اساس استاندارد ISRM و با تعداد ۲۹ نمونه در هر یک از ایستگاه‌ها اندازه‌گیری شدند. بررسی ریزترک‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و بر اساس روش Underwood (۱۹۷۰) و Wilson و همکاران (۲۰۰۳) و Swanson و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت (Underwood, 1970; Wilson et al, 2003; Swanson et al, 2020). به منظور بررسی میکروسکوپی از نمونه‌های برداشت شده از هر ایستگاه، نمونه‌های تازه و شوک دیده آماده‌شده و از هر ایستگاه

دائمی، به دلیل ایجاد ترک‌های انبساطی در سنگ می‌گردد. این مطلب شامل انبساط حجمی سنگ و همچنین ناهمسانگردی انبساط حرارتی و انبساط باقیمانده نیز می‌باشد، یعنی تغییر طول دائمی پس از اعمال شوک حرارتی که مربوط به تشکیل ترک‌های حرارتی است (Den'gina et al., 1993). با اعمال شوک حرارتی و بررسی اثرات آن می‌توان از تغییرات ساختار و مقاومت سنگ گرانیتوئیدی پس از شوک آگاه شد (Wong et al., 2020).

برای بررسی تاثیر حرارت بر گرانیتوئیدها، در این پژوهش سه نمونه مختلف گرانیتوئید در حالت سالم و فاقد هوازدگی، از نظر خصوصیات فیزیکی و کانی‌شناسی و توسعه ریزترک‌ها مورد بررسی قرار گرفته است سپس نمونه‌ها در چهار دسته مختلف تحت ۴ شوک دمایی متفاوت واقع شدند. در مرحله بعد از شوک حرارتی، دانسیته ریزترک‌ها و نیز سرعت موج فشاری در نمونه‌ها بررسی شد. در گام بعدی ارزیابی تأثیر این شوک‌ها با تهیه عکس‌های میکروسکوپی پلازیران انجام گردید. در این مقاله رفتار کانی‌ها و بافت‌های مختلف گرانیتوئیدها به تصویر کشیده شده و اثرات مخرب بر ساختار اولیه نمونه‌ها نشان داده شده است. این توضیحات می‌تواند دلایل رفتار کانی‌ها را در آزمون‌های مکانیکی تا حد زیادی روشن نماید. بررسی تاثیر تغییرات حرارتی و شوک که به ایجاد ریزترک و گشایش معبر می‌انجامد می‌تواند در نحوه افزایش نفوذپذیری و نیز ارزیابی توده گرانیتوئیدی برای گزینش مدفن مواد رادیواکتیو و سمی، محل ذخیره دی‌اکسید کربن و نیز محل مناسب جهت استحصال انرژی از سیستم‌های زمین‌گرمایی مفید باشد.

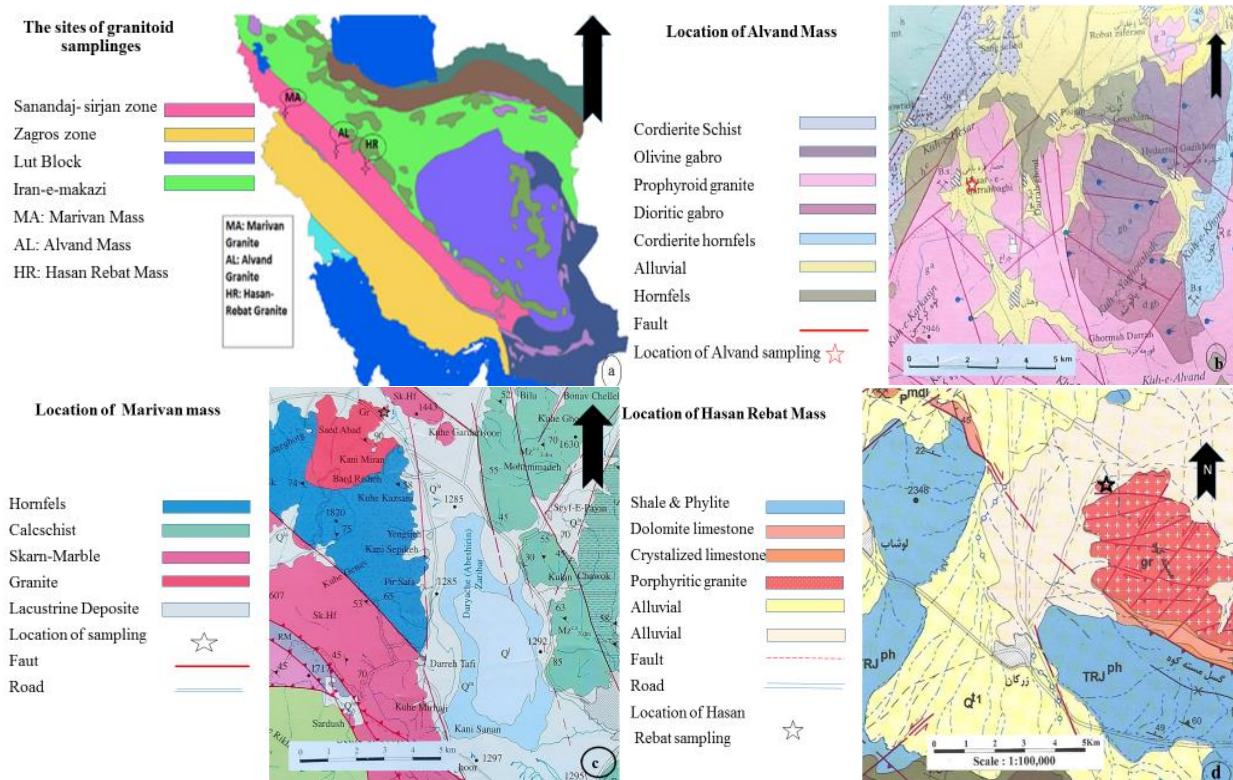
## ۲- مواد و روش‌ها

### ۲-۱- آماده‌سازی نمونه‌ها

جهت انجام مطالعات سه نمونه گرانیتی از سه توده مختلف واقع در زون ساختاری سندانج-سیرجان تهیه گردید. نمونه‌ها از سه توده گرانیتوئیدی مریوان (MA)، الوند (AL) و حسن رباط (HR) تهیه گردیدند. نمونه مریوان از توده گرانیتوئیدی کانی میران در شمال غرب دریاچه زریوار و از مختصات  $35^{\circ}36'58''$  شرقی و  $46^{\circ}04'38''$  شمالی، نمونه همدان از بخش شمالی توده گرانیتوئیدی الوند و از نزدیکی روستای حصار قره باغی و محل معدن گرانیت متروک حصار و از مختصات  $34^{\circ}49'16''$  شرقی و  $48^{\circ}17'03''$  شمالی و نمونه حسن رباط از توده

استفاده از میکروسکوپ الکترونی تصاویر SEM تهیه و ریزترک-ها و نحوه توسعه در آنها نیز بررسی گردید.

سه عدد نمونه انتخاب شده و از آنها در سه جهت عمود بر هم مقطع نازک میکروسکوپی تهیه شد. تعداد ۱۳۵ مقطع نازک بر اساس روش ISRM بررسی گردید (Hatheway, 2009).



شکل ۱- محل برداشت نمونه‌ها با علامت ستاره مشخص گردیده است. (a) محل برداشت نمونه‌های گرانیتوئیدی واقع در زون سنندج- سیرجان، AL: توده الوند (همدان)، MA: توده مریوان، HR: توده حسن رباط، (b) نقشه زمین شناسی محل برداشت نمونه الوند، (c) نقشه زمین شناسی محل برداشت نمونه مریوان، (d) نقشه زمین شناسی محل برداشت نمونه حسن رباط.

Fig 1. The site of sampling is marked with star shape. (a) The sites of granitoid samplings located in the Sanandaj-Sirjan zone, AL: Alvand granitoid (Hamadan), MA: Marivan granitoid, HR: Hassan Rabat granitoid. (b) Geological map of Alvand sampling site, (c) Geological map of Marivan sampling sit and (d) Geological map of Hassan Rabat sampling site.

غالب، میانگین اندازه کانی‌ها و سن مطلق نمونه‌های گرانیتوئیدی در جدول ۱ ارائه گردیده است.

#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- تعیین خصوصیات فیزیکی

خصوصیات فیزیکی شامل چگالی خشک و اشباع، تخلخل، شاخص پوکی (جذب سریع)، نسبت پوکی و چگالی دانه‌ای نمونه‌ها بر اساس استاندارد (2009) ISRM اندازه‌گیری شدند. خصوصیات فیزیکی گرانیتوئیدها در جدول ۲ آمده است (Hatheway, 2009). نمونه الوند بیشترین چگالی خشک و اشباع و نیز چگالی دانه‌ای را دارد و این نمونه کمترین تخلخل مؤثر را نشان داد.

#### ۳- سنگ‌شناسی

سه توده گرانیتوئیدی حسن رباط، الوند و مریوان انتخاب شدند که بر اساس یافته‌های Alirezaei و Hassanzadeh (۲۰۱۲) سن توده حسن رباط تقریباً ۲۸۸ میلیون سال، بر اساس یافته‌های Shahbazi و همکاران (۲۰۱۰) سن توده الوند به‌طور تقریبی ۱۶۳ میلیون سال و بر اساس یافته‌های Sepahi و همکاران (۲۰۱۴) سن توده مریوان حدود ۳۸ میلیون سال می‌باشد (Alirezaei and Shahbazi et al, 2010;). به لحاظ بافت هر سه درشت‌دانه بوده و کانی‌های سنگ با چشم غیرمسلح قابل تشخیص هستند. مقدار مودال کانی‌ها، بافت و نوع مرز



جدول ۱- ویژگی‌های سنگ‌شناسی، بافتی، سن و میانگین اندازه دانه‌ها در نمونه‌های گرانیتوئیدی.

Table 1. Petrographic, texture, age and average grain size characteristics of granite samples.

| Petrographic properties                   | Alvand                                     | Marivan                                    | Hasan Rebat                            |
|---|--|--|--|
| Quartz (%)                                | 23   | 37   | 38                                     |
| Average particle size of Quartz (mm)      | 5-7  | 1-3  | 4-6                                    |
| Plagioclase (%)                           | 17   | 28   | 18                                     |
| Average particle size of Plagioclase (mm) | 2-7  | 3-8  | 2-6                                    |
| Orthoclase (%)                            | 37   | 21   | 26                                     |
| Average particle size of Orthoclase (mm)  | 5-12                                       | 2-5  | 4-10                                   |
| Biotite (%)                               | 13   | 11   | 10                                     |
| Average Biotite particle size (mm)        | 1-3  | 2-4  | 1-3                                    |
| Accessory Minerals (%)                    | Sericite 4<br>Muscovite 5<br>Garnet 1      | Muscovite 1<br>Chlorite 2                  | Sphene 1<br>Sericite 2<br>Hornblende 5 |
| Dominant Texture                          | Granular subhedral,<br>myrmekite, perthite | Granular subhedral,<br>perthite, myrmekite | Granular subhedral,<br>poikilitic      |
| Absolute age (million years)              | 163.9                                      | 38   | 288.3                                  |
| Type of boundary between minerals         | smooth in some cases<br>jagged             | Extremely jagged in some<br>cases smooth   | Both jagged and<br>smooth              |
| Average of all particle sizes (mm)        | About 7 mm                                 | About 3 mm                                 | About 5 mm                             |
| The exact name of the stone               | Syenogranite                               | Granodiorite-monzogranite                  | Syenogranite                           |

جدول ۲- خصوصیات فیزیکی نمونه‌های بکر گرانیتوئیدی.

Table 2. Physical characteristic of fresh granite samples. (St. De: Standard Deviation)

| Sample Name | Sample count |         | Dry Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Saturated Density (g/cm <sup>3</sup> ) | Porosity (%) | Void Index (%) | Void Ratio | Gs    |
|-------------|--------------|---------|----------------------------------|--|--------------|----------------|------------|-------|
| Alvand      | 29           | Average | 2.66                             | 2.67                                   | 0.72         | 0.24           | 0.0070     | 2.76  |
|             |              | St. De  | 0.011                            | 0.011                                  | 0.04         | 0.02           | 0.0004     | 0.033 |
| Marivan     | 29           | Average | 2.65                             | 2.66                                   | 1.12         | 0.36           | 0.0110     | 2.76  |
|             |              | St. De  | 0.006                            | 0.005                                  | 0.04         | 0.01           | 0.0004     | 0.030 |
| HasanRebat  | 29           | Average | 2.64                             | 2.65                                   | 0.92         | 0.29           | 0.0090     | 2.67  |
|             |              | St. De  | 0.011                            | 0.009                                  | 0.08         | 0.15           | 0.0008     | 0.024 |

#### ۲-۴- تعیین دانسیته ترک

بررسی ریزترک‌ها با استفاده از میکروسکوپ پلاریزان و بر اساس روش Underwood (۱۹۷۰) و Wilson و همکاران (۲۰۰۳) و Swanson و همکاران (۲۰۲۰) انجام گرفت (Underwood,)

در (Wilson et al, 2003; Swanson et al, 2020; 1970). در این روش تار افقی میکروسکوپ را که در استفاده از لنز ۲۰، یک میلی‌متر می‌باشد به عنوان مبنا در نظر گرفته شده و در ۵۰ نقطه تصادفی بر روی مقطع نازک برداشت تعداد ریزترک‌ها در طول

۱ میلی متر میدان دید انجام می‌گیرد و سپس میانگین این نقاط به عنوان دانسیته ترک موجود در سنگ عنوان می‌گردد البته مقطع گیری و بررسی دانسیته ترک در این پژوهش در سه جهت عمود رهم انجام گرفت. ریزترکی که درون کانی شکل گرفته و به هیچ یک از مرزهای محیطی کانی نمی‌رسد درون دانه ای (Intragranular)، ریزترکی که حداقل یک مرز کانی را قطع کرده و وارد مرز بین دو کانی یا درون کانی مجاور می‌گردد، سراسری (Transgranular) و ریزترکی که فقط از مرز بین دو کانی عبور می‌کند مرزی (Intergranular) نامیده می‌شود (شکل ۲). لازم به ذکر است به دلیل روش بررسی ریزترک‌ها که فقط در زیر نور پلاریزه و آنالیزه (PPL, XP) انجام گرفته است، تشخیص ریزترک‌های مرزی به قطعیت امکان پذیر نبود اما در طی روند آزمون‌های دما-شوکه با بالا رفتن دما به دلیل بازشدگی واضح مرزها در دما شوکه‌های ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه ریزترک‌های مرزی نیز برداشت شدند. نتایج برداشت ریزترک‌ها به تفکیک جهت در هر سه نمونه

حسن رباط (HR) و مریوان (MR) و الوند (AL) در جدول ۳ ارائه گردیده است. شکل ۲ نمودارهای دانسیته ترک هر سه نمونه را در ۵ دما، نشان می‌دهد. به طور کلی در تمام نمونه‌های تازه دانسیته ترک‌های درون‌دانه‌ای بیش از سراسری بود، اما در واکنش به حرارت رفتارهای متفاوتی نشان دادند. گرانیوتوئید حسن رباط در حالت تازه کمترین دانسیته ترک را دارد. دانسیته ترک نمونه‌های الوند و مریوان تقریباً برابر هم می‌باشد و این اختلاف کم در دانسیته ترک در نمونه‌های شوکه دیده این دو نیز دیده می‌شوند؛ اما دانسیته ترک در نمونه حسن رباط رفتار متفاوتی نسبت به دو نمونه دیگر دارد و روند افزایش دانسیته ترک در این نمونه در اثر شوکه یکنواخت‌تر از دو نمونه دیگر است. در نمونه‌های الوند و مریوان پس از شوکه ۴۵۰ درجه دانسیته ترک افزایش بیشتری دارد در حالی که در نمونه حسن رباط افزایش دانسیته ترک از ابتدا تا آخرین شوکه دمایی تقریباً روند یکنواختی دارد و در نهایت نیز به مقدار کمتری ختم می‌شود.

جدول ۳- دانسیته ترک خطی نمونه‌های گرانیوتوئیدی به تفکیک جهت اندازه‌گیری و دمای شوکه و نوع ریزترک (درونی، سراسری، مرزی)

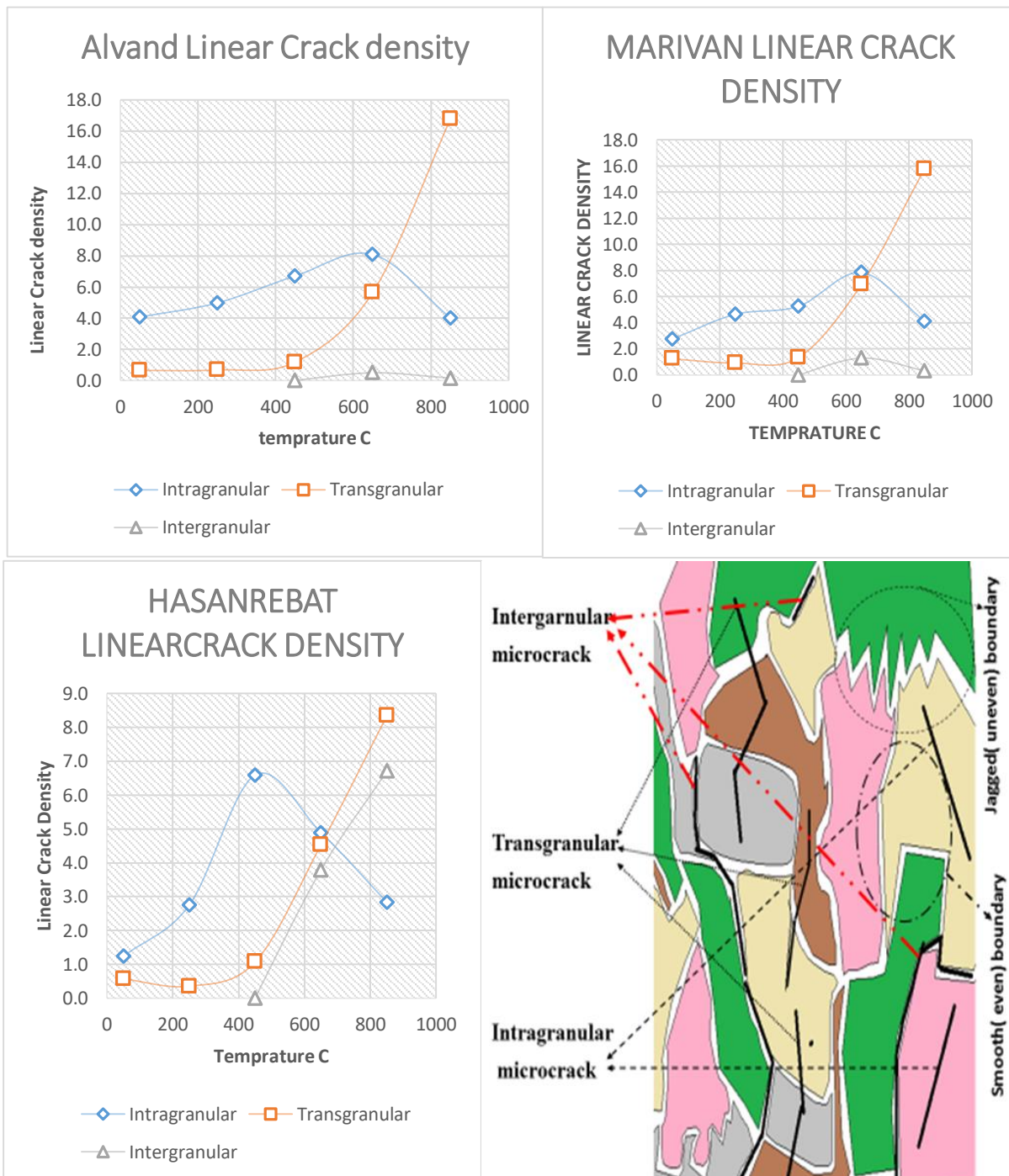
Table 3. Linear Crack Density of granite samples separately in measurement direction, shock temperature and type of microcrack (intragranular, transgranular, intergranular)

| Sample name | Measurement Direction | Micro crack Type & Shock temperature |          |           |           |           |           |           |           |           |           |           |           |
|-------------|-----------------------|--------------------------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|             |                       | Intra-50                             | Trans-50 | Intra-250 | Trans-250 | Intra-450 | Trans-450 | Intra-650 | Trans-650 | Inter-650 | Intra-850 | Trans-850 | Inter-850 |
| Alvand      | Blue diameter         | 1.31                                 | 0.27     | 2.14      | 0.25      | 1.31      | 0.31      | 3.63      | 2.06      | 0.09      | 1.61      | 5.91      | 0.02      |
|             | Red diameter          | 1.27                                 | 0.11     | 1.31      | 0.12      | 2.07      | 0.39      | 2.65      | 1.80      | 0.12      | 1.39      | 6.09      | 0.11      |
|             | Axial                 | 1.51                                 | 0.27     | 1.54      | 0.32      | 3.34      | 0.49      | 1.82      | 1.80      | 0.3       | 1.03      | 4.78      | 0.03      |
| Marivan     | Blue diameter         | 1.03                                 | 0.43     | 1.08      | 0.31      | 1.62      | 0.47      | 3.40      | 2.74      | 0.45      | 1.83      | 4.39      | 0.09      |
|             | Red diameter          | 0.74                                 | 0.34     | 1.59      | 0.43      | 1.61      | 0.47      | 1.89      | 1.91      | 0.5       | 1.26      | 5.21      | 0.15      |
|             | Axial                 | 0.99                                 | 0.48     | 1.99      | 0.19      | 2.03      | 0.41      | 2.57      | 2.31      | 0.35      | 1.05      | 6.20      | 0.09      |
| Hasan Rebat | Blue diameter         | 0.34                                 | 0.14     | 0.69      | 0.13      | 1.83      | 0.53      | 1.47      | 1.86      | 1.11      | 0.69      | 2.94      | 2.45      |
|             | Red diameter          | 0.39                                 | 0.21     | 1.23      | 0.11      | 2.43      | 0.27      | 1.76      | 1.37      | 1.52      | 1.12      | 2.71      | 1.92      |
|             | Axial                 | 0.51                                 | 0.21     | 0.83      | 0.11      | 2.34      | 0.27      | 1.65      | 1.31      | 1.16      | 1.02      | 2.70      | 2.35      |

کانی‌شناسی و نوع مرزهای بین دانه‌ها واکنش متفاوتی به شوکه‌ها دارند. توسعه ترک‌ها در درون و بیرون دانه‌ها در هر نمونه و در جهت فضایی کاملاً متفاوت است که به صورت کمی در جدول ۳ نشان داده شده است. واکنش نمونه‌ها در برابر حرارت با کمک تصاویر میکروسکوپی مقاطع نازک، در ادامه تشریح می‌گردد. تصاویر میکروسکوپی الکترونی نتایج بررسی‌های مقاطع نازک را کاملاً تأیید نمودند.

#### ۴-۳- بررسی میکروسکوپی

نمونه‌های گرانیوتوئیدی به لحاظ ابعاد و نحوه اعمال شوکه حرارتی کاملاً یکسان بوده و در ترکیب کانی‌شناسی نیز همگی در محدوده مودال کانی‌شناسی گرانیوتوئیدها واقع هستند. بررسی‌ها در سه جهت در هر نمونه و حرارت انجام گرفته و تفاوت رفتار گرانیوتوئیدها متأثر از این شوکه‌ها در سه جهت فضایی نشان می‌دهند که هر نمونه بنا بر نوع بافت و ترکیب



شکل ۲- نمودار دانسیته ترک خطی نمونه‌های گرانیتوئیدی مریوان، حسن رباط و الوند و تصویر شماتیک از مرز مضرس و صاف و ریزترک درون دانه ای، سراسری و مرزی.

Fig 2. Linear Crack Density graph of Marivan, Hassan Rebat and Alvand granite samples and schematic picture for jagged and smooth boundary, intra granular, transgranular and inter granular microcrack

#### ۴-۴-۴- توصیف واکنش نمونه گرانیتوئید توده الوند (منطقه

همدان) در برابر حرارت

##### ۴-۴-۱- گرانیتوئید تازه الوند

در مقطع نازک نمونه تازه در زیر نور پلاریزه، سنگ کاملاً تازه و فاقد هرگونه نشانه‌ای از هوازدگی بوده و کانی‌های بسیار درشت تا اندازه کمتر از ۵۰ میکرون در آن‌ها مشاهده گردید. مرز بین دانه‌ها اغلب مستقیم و صاف و در برخی موارد مضرس می‌باشند. بافت غالب ساب هدرال گرانولار بوده اما بافت میرمیکیت و به مقدار کمتر بافت پرتیت دیده می‌شود. میانگین اندازه کانی‌ها در سنگ بیش از ۷ میلی‌متر است. در شکل (a-b۳) مقاطع نازک نمونه تازه الوند دیده می‌شود و ریزترک‌ها غالباً درونی و ریزترک‌های سراسری بسیار کمتر بودند. ریزترک‌های درونی بیشتر در کانی کوارتز و به مقدار کمتر در کانی ارتوز دیده شد که این موضوع به دلیل فراوانی کانی ارتوز در گرانیتوئید الوند قابل توجه است (شکل c-d۳). ریزترک‌های موجود در کانی‌های پلاژیوکلاز نیز در حدود کمتر از ۵ درصد کل ریزترک‌های درونی را شامل می‌شوند. در نمونه تازه در مقطع نازک ریزترک‌های سراسری کاملاً مشهود است. تقریباً همه کانی‌های درشت، ریزترک‌های سراسری دارند که با مسکویت پر شده‌اند.

##### ۴-۴-۲- گرانیتوئید الوند پس از شوک ۲۵۰ درجه

در گرانیتوئید الوند پس از شوک ۲۵۰ درجه دانسیته ترک‌های سراسری تغییری نیافته اما دانسیته ترک‌های درونی کمی افزایش می‌یابد. برخی ریزترک‌های سراسری محتوی مسکویت خالی شده‌اند (شکل e۳). غالباً در کانی‌های کوارتز پس از شوک اگر یک ریزترک شکل گرفته باشد ریزترک‌های دیگری مشاهده نمی‌شود و گویا تنش حرارتی با یک ریزترک رها می‌شود. در مرز بین کانی‌های ریزدانه میکا با کوارتز معمولاً ترک‌هایی به شکل شعاعی در دو یا سه جهت شکل گرفته‌اند یا ریزترک‌های سراسری که از درون کوارتز شروع شده با رسیدن به میکا، محوشده و دوباره در کانی مجاور بعدی ادامه می‌یابند. کانی‌های میکا نقش عایق یا رسانای حرارتی را بسته به جهت قرارگیری درون کانی یا نسبت به کانی مجاور حین اعمال شوک ۲۵۰ درجه کاملاً نشان می‌دهند. در گرانیتوئید الوند پس از این شوک کانی ارتوز بیشتر از کانی کوارتز دچار ریزترک شده است. کانی‌های پلاژیوکلاز و بیوتیت نیز در موارد معدودی ریزترک نشان می‌دهند.

##### ۴-۴-۳- گرانیتوئید الوند پس از شوک ۴۵۰ درجه

در مقاطع نازکی که از گرانیتوئید الوند پس از شوک ۴۵۰ درجه تهیه شده به وضوح عرض ریزترک‌ها بیشتر شده و غالباً ترک‌های پر شده با سرسیت خالی شده‌اند، آثاری از سرسیت بر دیواره ریزترک قابل مشاهده و در برخی نقاط ریزترک‌ها با همین میکاها انسداد یافته‌اند (شکل f۳). تعداد ریزترک‌های سراسری کمی بیشتر شده اما افزایش دانسیته ترک درونی قابل ملاحظه‌تر است. در تمام کانی‌ها و غالباً ارتوکلازها، ریزترک‌ها به صورت شبکه به هم متصل شده و نهایتاً به شکل ریزترک‌های سراسری درآمده‌اند و این ویژگی در محل صفحات کلیواژ کانی‌ها وضوح بیشتری می‌یابد. در معدود نقاطی که رنگ گرفتگی دارند در اثر شوک شکستگی بیشتری مشاهده می‌شود که باعث ایجاد حفرات ۲۵ تا ۵۰ میکرونی شده است. البته این نقاط رنگ گرفته در نمونه تازه مشاهده نشد و به نظر می‌رسد نقاطی است که شاید دارای ترکیبات آهن بوده و در اثر حرارت و شوک آبی پس از آن دچار رنگ گرفتگی شده است اما این نقاط مستعد ریزترک هستند (شکل g۳). در این شوک حرارتی نیز غالباً ریزترک‌ها یا از مجاورت میکاها آغاز می‌شود یا به آن‌ها ختم می‌شود (شکل h۳).

##### ۴-۴-۴- گرانیتوئید الوند پس از شوک ۶۵۰ درجه

پس از شوک ۶۵۰ درجه در مقاطع نازک ترک‌های زیادی با بازشدگی بسیار تمیز و لبه‌های صاف و بدون اثری از خردشدگی در درون ریزترک‌ها مشاهده می‌شوند. ارتوکلازهای بسیار درشت، کمتر دچار ریزترک سراسری شده و بیشتر خطوط کلیواژ واضح شده و یا ترک‌های طنابی شکلی در متن کانی شکل گرفته‌اند (شکل i۳). لبه میکاها در مرز با دیگر کانی‌ها خردشدگی نشان می‌دهند. بیوتیت‌ها به شدت آبدگیری شده و رنگ بسیار تیره‌ای به خود گرفته‌اند. ترک‌های پر شده با مسکویت در این دما خالی شده اما آثار آن‌ها بر دیواره ریزترک مشهود و بازشدگی این ریزترک‌ها به بیش از ۵۰ میکرون می‌رسد (شکل j۳). صفحات کلیواژ بیوتیت‌ها کاملاً از نظم خارج شده و حالت چین‌خورده پیدا کرده‌اند. ترک‌های بزرگ عبوری از درون میکاها بیشتر با تراکم رنگ کانی (کمرنگ و پررنگ بودن رنگ کانی) مشخص می‌شوند (شکل k۳). مرز ارتوکلاز و بیوتیت، به ویژه ارتوکلازهای کمی سرسیتی شده، بسیار خرد شده و ترک‌ها در حد ۳۰ و ۴۰ میکرون بازشدگی دارند. ترک‌هایی نیز مشاهده می‌شوند که تکه‌های سنگ از

مضرس می‌باشند. مرز کوارتز- کوارتز اغلب صاف و مرزهای کوارتز با دیگر کانی‌ها ناصاف می‌باشد (شکل a۴- b). میانگین اندازه کانی‌های موجود در سنگ ۴-۶ میلی‌متر است. اگر چه کانی‌های درشت ارتوکلاز یا پلاژیوکلاز در نمونه دستی به وضوح خودنمایی می‌کنند اما در کل اندازه دانه‌ها در حد متوسط و یکنواخت نمایان می‌گردند. ادخال به‌ویژه در ارتوکلازها بسیار زیاد است. بافت در نمونه مقطع نازک میکروسکوپی ساب هدرال گرانولار بوده اما پرتیت و به مقدار کمتر بافت میرمیکیت دیده می‌شود. نام سنگ گرانیت و به‌طور دقیق‌تر سینوگرانیت است. در بررسی دانسیته ترک نمونه‌های تازه مشاهده شد که ریزترک‌های درونی در حدود دو برابر بیش از ریزترک‌های سراسری است. بازشدگی در ریزترک‌ها مشاهده نشد. در میان کانی‌های متشکله سنگ کانی‌های ارتوز و کوارتز به یک اندازه دچار ریزترک شده‌اند، این در حالی است که فراوانی مودال کانی کوارتز بیشتر از کانی ارتوکلاز می‌باشد.

**۴-۵-۲- گرانیتوئید حسن رباط پس از شوک ۲۵۰ درجه**  
در این سنگ برخی ریزترک‌ها از کاملاً بسته به کمی باز شده تغییر یافته است که ریزترک‌های باز شده به دلایلی از جمله: باز شدن رگه‌های کوارتز پس از تحمل شوک حرارتی (شکل c۴)، خالی شدن رگه‌های سریسیتی (شکل d۴)، رگه‌های پرتیتی درون کانی‌های درشت ارتوز و مرزهای کانی‌ها (شکل e۴) ایجاد شده‌اند. در نمونه حسن رباط ترک‌های داخل کانی کوارتز بسیار ظریف هستند. در این نمونه پس از شوک دمایی کانی‌ها همچنان بسیار تازه و بدون ترک هستند (شکل f۴). ریزترک‌های سراسری کمتر از ۱۰ درصد کل ریزترک‌های این نمونه را شامل می‌شوند. کانی ارتوز ریزترک‌های درونی بیشتری نسبت به کوارتز دارد و کانی‌های دیگر ریزترک ندارند. این نمونه دارای هورنبلند است که بسته به جهت برشی که از این کانی در مقطع می‌بینیم ریزترک‌های بسیار کم یا بسیار زیاد در آن می‌بینیم. ریزترک‌های سراسری پس از این شوک نسبت به حالت تازه کمتر می‌شود گویا فضاهای بسیار کم موجود در سنگ تازه در اثر انبساط کانی‌ها به هم نزدیک شده و قابل تشخیص نیستند.

دیواره جدا شده و در محلی دورتر قرار گرفته و ریزترک را تا حد زیادی مسدود کرده‌اند و این محل‌ها می‌توانند سیال را به دام اندازند. در این گرانیتوئید و در این شوک، ارتوکلازها بسیار آسیب‌پذیرتر بوده و دانسیته ترک در آن‌ها بسیار بیشتر از کانی کوارتز بود. البته دانسیته ترک‌های سراسری نیز افزایش ناگهانی می‌یابد و چون دانسیته ترک‌های درونی افزایش کمی می‌یابد مقدار این دو دانسیته به هم نزدیک می‌شود اما همچنان دانسیته ترک‌های درونی بیش از سراسری است.

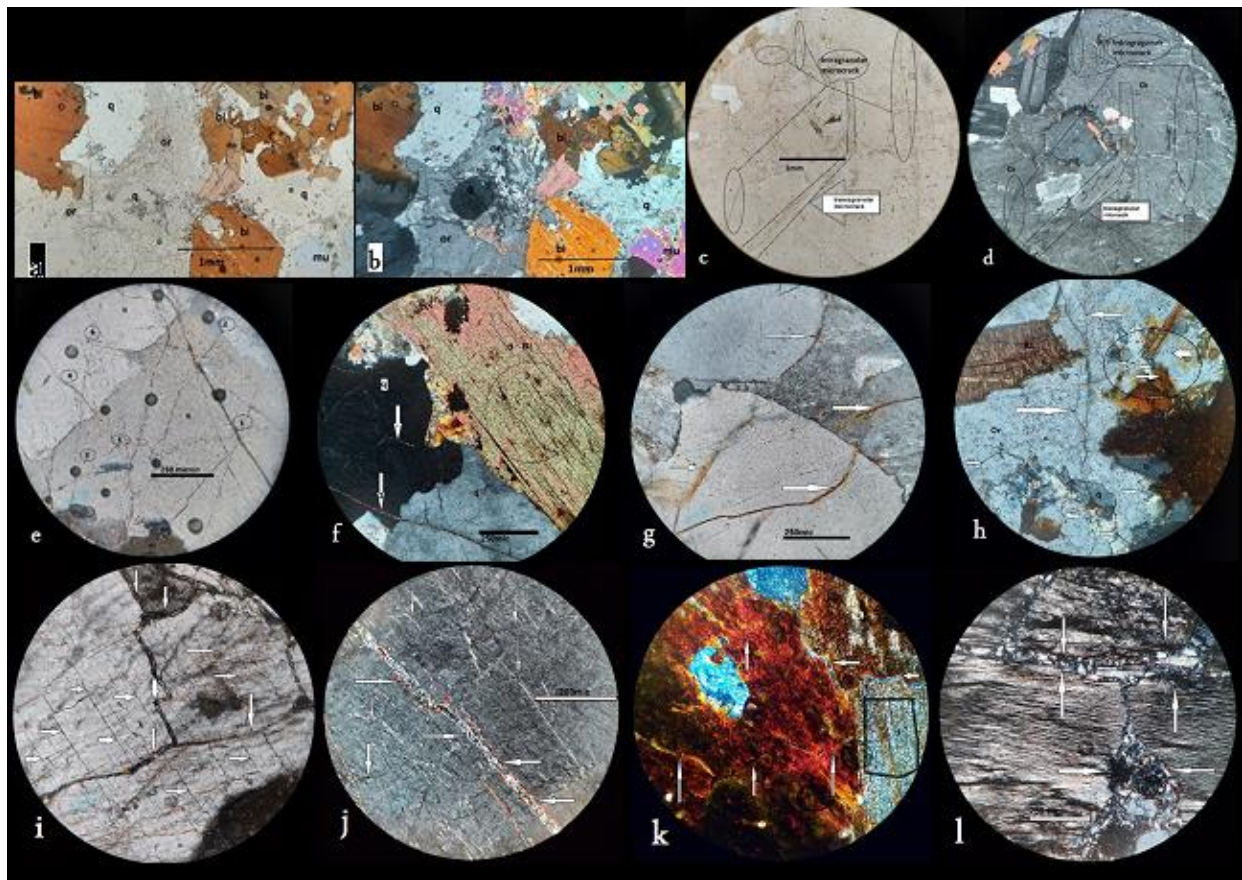
#### ۴-۵-۴- گرانیتوئید الوند پس از شوک ۸۵۰ درجه

در این نمونه‌ها تقریباً در تمام مقاطع کانی‌ها کامل خرد شده‌اند و ابعاد قطعات خرد شده ۵ تا ۵۰ میکرون است. آثار ترک‌های بزرگ‌تر نیز قابل مشاهده است. برخی ترک‌ها حدود ۲۰۰ تا ۳۰۰ میکرون عریض شده و خرده‌های همان ترک درون آن را پر کرده و مسیرهایی در حد ۲ تا ۳ میکرون برجای مانده که راه را برای عبور سیال فراهم می‌نماید (شکل ۱۳). ارتوکلازهایی که به لحاظ ترکیبی به پلاژیوکلاز نزدیک‌ترند مقاومت بیشتری در برابر حرارت دارند. در پلاژیوکلازها، در این دما نیز همچنان ترک‌های درونی بدون اتصال به ترک‌های سراسری قابل مشاهده است. کانی‌های یکپارچه و بسیار درشت کمتر دچار ترک‌های عریض و طولانی می‌شوند و غالباً ترک‌های ریز درونی دارند. در اثر شوک ترک‌های عریض و واضحی در بیوتیت‌ها و نیز در مرز کانی بیوتیت و سایر کانی‌ها ایجاد شده است. ترک‌ها غالباً ۲۰ میکرون و کمتر باز هستند اما ترک‌های عریض‌تر با خرده‌ها پر شده‌اند. در دما-شوک ۸۵۰ درجه دانسیته ترک سراسری به بیش از دو و نیم برابر دما شوک قبلی می‌رسد و از آنجاکه دانسیته ترک درونی تقریباً برابر با نمونه تازه است، تفاوت فاحشی بین این دو دانسیته مشاهده می‌شود.

#### ۴-۵-۴- توصیف واکنش نمونه گرانیت توده حسن رباط (منطقه گلپایگان) در برابر حرارت

##### ۴-۵-۱- گرانیتوئید تازه حسن رباط

مقطع نازک میکروسکوپی در زیر نور پلاریزه بررسی شد که نشان داد، نمونه سنگ کاملاً تازه بوده و نشانه‌ای از هوازدگی در آن دیده نمی‌شود. اختلاف اندازه دانه‌ها زیاد بوده و گستره‌ای از ۳۰ میکرون تا ۱۰ میلی‌متر را در برمی‌گیرد. مرز بین کانی‌های درشت و ریز بیشتر



شکل ۳- تصاویری از مقاطع نازک گرانیوتوئید الوند. اعداد پس از نام تصویر دمای شوک را نشان می‌دهند. (a) نمونه تازه در نور PPL. (b) نمونه تازه در نور XPL. (c) ریزترک‌های سراسری و درون‌دانه‌ای در نمونه تازه در نور PPL. (d) نمونه C در نور XPL. (e) ۲۵۰. نشانگر (۱) ریزترک در بخش پایینی خالی شده و در بخش بالایی حاوی مسکوئیت است. نشانگرهای (۲ و ۳ و ۵) ریزترک‌های درونی و (۴ و ۶) ریزترک‌هایی که از درونی به سراسری تغییر ماهیت داده‌اند. (f) ۴۵۰. پیکان ۱ ریزترک خالی‌شده از مسکوئیت و پیکان ۲ ریزترک دارای مسکوئیت را درون کوارتز نشان می‌دهد و دایره ۳ نظم لایه‌های بیوتیت را که همچنان حفظ شده‌اند. (g) ۴۵۰. رنگ گرفتگی ریزترک‌ها که توسط پیکان‌ها مشخص گردیده‌اند. (h) ۴۵۰. پیکان‌های افقی ریزترک‌های منشعب از بیوتیت یا مختوم به آن را نشان می‌دهند. (i) ۶۵۰. پیکان‌های افقی بازشدگی کلیواژها و پیکان‌های عمودی بازشدگی ریزترک بدون ایجاد ریزش دیواره به درون ترک را نشان می‌دهند. (j) ۶۵۰. پیکان‌های افقی بازشدگی ریزترک درون‌دانه‌ای و پیکان‌های عمودی ریزترک و آثار سرسیت بر دیواره ترک را نشان می‌دهند. (k) ۶۵۰. محدوده ۱ خردشدگی لایه‌های بیوتیت، پیکان‌های سفید ترک‌های القایی در آن و رنگ تیره، آبگیری شدید آن‌ها را نشان می‌دهند و (l) ۸۵۰. پیکان‌ها ترک‌های عریض و خردشدگی دیواره ترک و ریزش آن به درون ترک را نشان می‌دهند.

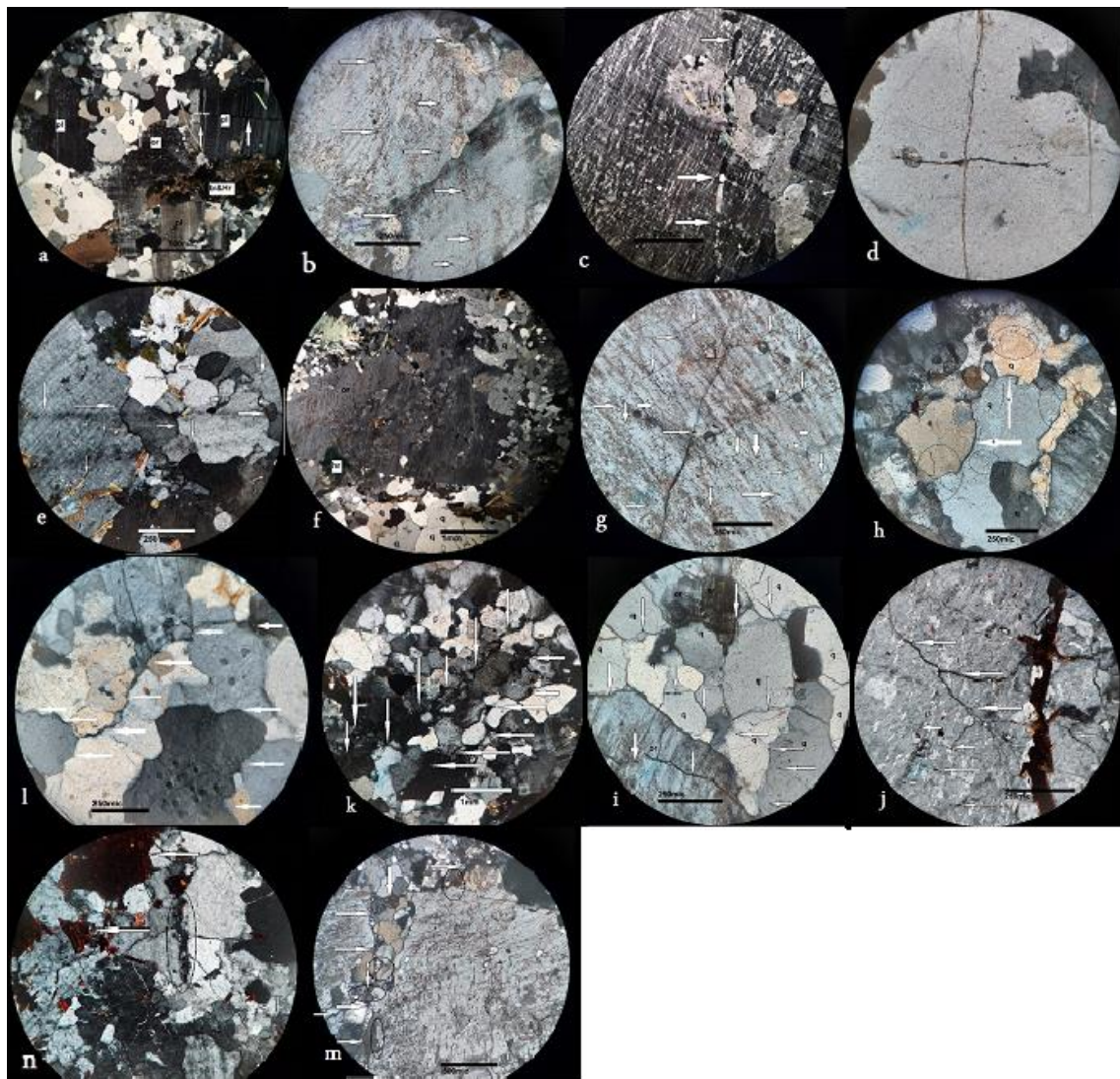
Fig 3. Images of thin sections of Alvand sample. The numbers after the name of the image indicate the shock temperature. (a) Fresh sample in PPL light. (b) Fresh sample in XPL light. (c) Trans and intragranular microcracks in fresh sample in PPL light. (d) Image C in XPL light. (e) 250. Sign (1): The microcrack is empty in the lower part and contains muscovite in the upper part. Sign (2, 3, 5): intragranular micro cracks. Sign (4,6): intragranular microcracks that have convert in transgranular. (f) 450. Arrow (1) shows microcrack depleted of muscovite. Arrow (2) shows microcrack containing muscovite inside the quartz. Circle (3) shows the order of the biotite layers that are still preserved. (g) 450. Staining of microcracks marked by arrows. (h) 450. Horizontal arrows indicate microcracks branching from or terminated in biotite. (i) 650. The horizontal arrows show the Separation of cleavages and the vertical arrows show the opening of the microcrack without causing the wall to fall into the crack. (j) 650. The horizontal arrows show the opening of intragranular micro cracks and the vertical arrows show the micro crack and the effects of sericite on the crack wall. (k) 650. Range (1) shows crushing of biotite layers. White arrows show cracks created in biotite and the dark color of biotite show their severe dehydration and (l) 850. Arrows show wide cracks and crushing of the crack wall and its fall into the crack.

بازشدگی‌ها در حد ۵ میکرون است. در مرز ارتوز و کوارتز ریزترک‌هایی با بازشدگی شکل‌گرفته‌اند. ادخال‌های درون کانی‌های درشت محل آغاز و تشکیل ریزترک‌های جدید هستند. غالباً ترک‌های مرزی منشأ تشکیل ترک‌های سراسری هستند (شکل k۴). میکاها محل منشأ یا استهلاک ریزترک‌ها هستند. از اتصال ریزترک‌ها به یکدیگر گاهی حفراتی به مساحت ۲ میلی‌متر مربع نیز حاصل می‌گردند این حفرات در جذب و نگهداشت آب می‌توانند مهم باشند. ریزترک‌های مرزی بیشتر بین کانی‌های ارتوز-کوارتز تشکیل شده است. پس‌از این شوک دانسیته ترک‌های مرزی و درونی و سراسری به مقدار تقریباً برابری می‌رسند.

**۴-۵-۵- گرانیتوئید حسن رباط پس از شوک ۸۵۰ درجه**  
پس‌از این شوک غالب ریزترک‌ها در مرز بین کانی‌ها شکل‌گرفته و مرزها با این ریزترک‌ها به‌وضوح قابل‌ردیابی است. ریزترک‌های ایجادشده و بازشدگی بین دو لبه ریزترک با خرده‌سنگ پرشده‌اند (شکل l۴). مواردی مشاهده گردید که در دو کانی مجاور و در مرز بین دو کانی، خردشدگی برجای کانی‌ها مشاهده می‌شود که نوار پهنی از جنس دو کانی مجاور هم درون این ریزترک را پر کرده است گویا انبساط در مرز دو کانی رخ داده سپس در اثر شوک حرارتی و انقباض پس از آن این کانی‌ها در محل مرزها به هم فشرده و خردشده و به دام افتاده‌اند و به همین دلیل فقط درهم‌ریختگی ساختار مرزی و متفاوت بودن شدید خاموشی کانی‌ها و رنگ آن‌ها نشانگر خردشدگی در این محل می‌باشد (شکل m۴). در این نقاط ساختارهای چند شاخه‌ای از ریزترک‌های ۲ میکرونی شکل می‌گیرند. کانی‌هایی به رنگ بسیار تیره در هردو نور PPL, XPL مشاهده می‌شود که کانی‌های هورنبلند و میکا هستند که به‌شدت آبگیری شده‌اند (شکل n۴). در این نمونه ریزترک‌های ۱۰ تا ۱۵ میکرونی ناگهان به ریزترک ساده و بدون بازشدگی منتهی می‌گردد یعنی بسته شدن تدریجی ریزترک باز مشاهده نشد به عبارتی می‌توان گفت ریزترک‌هایی عمود بر ریزترک عریض از توسعه تدریجی ریزترک عریض جلوگیری می‌کند. پس از این شوک دانسیته ترک سراسری و مرزی در حدود دو تا سه برابر دانسیته ترک درون‌دانه‌ای است.

**۴-۵-۳- گرانیتوئید حسن رباط پس از شوک ۴۵۰ درجه**  
پس‌از این شوک ریزترک‌های اورتوز و کوارتز، غالباً بازشدگی ریزترک‌های پیشین و کلیواژها است. کانی ارتوز در این نمونه غالباً در جهت کلیواژ ریزترک نشان می‌دهد و وجوه ضعف این کانی در برابر حرارت ۴۵۰ درجه فقط این صفحات هستند (شکل g۴). در کوارتزها اغلب ریزترک‌ها از مرز کوارتز با کانی مجاور شروع شده و به داخل کانی توسعه‌یافته است و نشانه‌هایی از بازشدگی نیز در آن‌ها مشاهده می‌گردد. شکستگی‌ها در کانی کوارتز در این دما درونی، کوتاه و بدون امتدادیافتگی و توسعه است (شکل h۴). تغییر رنگ واضحی در این نوع ریزترک‌ها مشاهده می‌گردد که می‌تواند نشانه‌های اولیه حضور اکسید آهن باشد که در اثر حرارت حالت زنگ‌زدگی یافته و در هر دو نور ppl, xpl رنگ قهوه‌ای رنگ دارند. در کنار میکاها، کوارتزها خردشدگی بسیار بیشتری دارند اما هیچ ریزترکی در میکاهای مجاور این کوارتزها دیده نمی‌شود و به‌وضوح پس‌از این شوک ریزترک‌ها با رسیدن به کانی‌های میکا و نیز هورنبلند مستهلک می‌گردند. در نقاطی در درون ارتوزها کانی‌های کوارتز به‌صورت ادخال دیده می‌شوند، در این حالت کانی کوارتز به‌طور کامل با ریزترک محیطی از کانی ارتوز دربرگیرنده خود، جدا می‌شود و کانی کوارتز نیز دچار ریزترک‌های متعدد می‌گردد. دانسیته ترک‌های درونی بسیار بیشتر از ریزترک‌های سراسری است اما در مجموع دانسیته ترک در این دما شوک خیلی زیاد نیست.

**۴-۵-۴- گرانیتوئید حسن رباط پس از شوک ۶۵۰ درجه**  
پس‌از این شوک نمونه گرانیتوئیدی دچار ریزترک‌های مرزی گردیده که به‌وضوح بازشدگی قابل‌تشخیصی را نشان می‌دهند و این در حالی است که در دما شوک‌های قبلی مرز کانی از ریزترک - با اطمینان - قابل‌تشخیص نبود. در این دما شوک ترک‌های مرزی بسیاری شکل‌گرفته‌اند که از بین کانی‌ها می‌گذرند و گاهی در صورت رسیدن به کانی درشت از میان کانی درشت عبور کرده‌اند (شکل i۴). ریزترک‌ها معمولاً از کنار مجموعه کانی‌های ریز کوارتز با کانی مجاور می‌گذرند و اگر به ارتوز برسند از محل صفحات ضعف از جمله صفحه کلیواژ، صفحات ماکل و محل‌هایی که نشانگر نوسان ترکیب شیمیایی کانی است، به داخل ارتوز راه می‌یابند (شکل j۴). غالب



شکل ۴- تصاویری از مقاطع نازک گرانیتوئید حسن رباط. اعداد پس از نام تصویر دمای شوک را نشان می‌دهند. (a) نمونه تازه. به مرزها و ابعاد کانی‌ها توجه شود. پیکان‌ها، ریزترک‌ها را نشان می‌دهند. (b) نمونه تازه. پیکان‌ها، ریزترک‌های موجود در یک کانی ارتوز درشت را نشان می‌دهند. (c) ۲۵۰. خالی شدن یک رگه کوارتزی درون یک کانی درشت ارتوکلاز. (d) ۲۵۰. خالی شدن ریزترک افقی سریسیتی شده و وجود دو رگه سریسیتی شده عمودی که خالی نشده‌اند (e) ۲۵۰. پیکان‌های افقی بازشدگی خفیف مرزهای کانی‌ها و پیکان‌های عمودی ریزترک‌های درون‌دانه‌ای را نشان می‌دهند. (f) ۲۵۰. به سلامت کانی‌ها و رگه‌های کوارتزی و اندازه ذرات کوارتز توجه شود. (g) ۴۵۰. ریزترک با کمی بازشدگی در مرکز تصویر و پیکان‌های افقی و عمودی، دو سری کلیواژ ارتوز را نشان می‌دهند که در اثر حرارت واضح گردیده‌اند. (h) ۴۵۰. مرزهای کوارتز که باز شده و نیز تغییر رنگ داده‌اند و نیز منشأ ایجاد ترک کانی‌های مجاور شده‌اند. (i) ۶۵۰. بازشدگی مرزها و نیز راه یافت آن‌ها به داخل کانی‌ها. (j) ۶۵۰. توسعه ریزترک‌ها به داخل یک کانی ارتوکلاز که با باز شدن سطوح کلیواژ و محل‌های پرتیتی، صورت گرفته است. آبیگری شدید بیوتیت نیز مشخص است. (k) ۶۵۰. ریزترک‌های مرزی منشأ تشکیل ریزترک‌های سراسری. (l) ۶۵۰. پیکان‌ها بازشدگی واضح مرزها و وجود خرده‌های سنگ در محل مرزها را نشان می‌دهند. (m) ۸۵۰. پیکان‌های سفید ترک‌های سراسری تشکیل شده در یک رگه کوارتزی را نشان می‌دهند و در نقاطی عریض‌تر شده و درون آن با خرده‌های سنگ و خرده‌های دیواره پر شده که با دوایری مشخص گردیده‌اند و ترک‌های سراسری دیگری در سمت راست عکس دیده می‌شوند و (n) ۸۵۰. محدوده بیضوی، یک حفره کاملاً باز شده و پیکان‌ها، بیوتیت‌های خرد شده و کاملاً آبیگری شده را نشان می‌دهند.

Fig 4. Images of thin sections of Hassan Robot sample. The numbers after the name of the image indicate the shock temperature: (a) Fresh sample. Pay attention to the boundaries and dimensions of the minerals. Arrows indicate microcracks. (b) Fresh sample. Arrows show microcracks in a coarse orthoclase. (c) 250. Emptying of a quartz vein in a



Fig. 4 caption continued-----

coarse orthoclase is shown. (d) 250. Emptying of horizontal sericitized microcracks and the presence of two vertical sericitized veins that are not emptied, are shown. (e) 250. Horizontal arrows show slight openings of mineral boundaries and vertical arrows show intragranular microcracks. (f) 250. Pay attention to the health of the minerals, the quartz veins and the particle size of the quartz. (g) 450. A microcracks with a slight opening in the center of the image is seen and horizontal also vertical arrows show two series of orthoclase cleaves that have become clear due to high temperature. (h) 450. Quartz boundaries have opened, their color have changed and them have been the source of adjacent mineral cracks. (i) 650. The opening of boundaries and their ingression into minerals. (J) 650. The development of microcracks in an orthoclase that were formed by opening the cleavage surfaces and perthite texture sites. Severe dehydration of biotite is also evident. (k) 650. Intergranular microcracks are source of the formation of transgranular microcracks. (l) 650. Arrows indicate the clear opening of the boundaries and the presence of rock fragments at them. (m) 850. The white arrows show transgranular microcracks formed in a quartz vein which widened in some places and filled with rock fragments. The wall fragments marked with circles, and other transgranular microcracks are seen at the right side of the photo and (n) 850. The elliptical range shows a fully open cavity and arrows shows crushed and completely dehydrated biotites.

نشانهگر مقاومت کانی پلاژیوکلاز در برابر عوامل ایجادکننده ریزترک‌ها می‌باشد.

#### ۴-۶-۲- گرانیتوئید مریوان پس از شوک ۲۵۰ درجه

در نمونه‌های ۲۵۰ درجه تعداد بسیار کمی ریزترک‌های باز شده به‌ویژه در کانی کوارتز مشاهده گردید. ریزترک‌های درونی بیش از حالت تازه دیده شدند اما ریزترک‌های سراسری کاهش داشتند که این موضوع می‌تواند به دلیل فشار ناشی از افزایش حجم منتج از ریزترک‌های درونی و نیز رهایی تنش ناشی از حرارت در ریزترک‌های درونی باشد (شکل ۵e, f).

#### ۴-۶-۳- گرانیتوئید مریوان پس از شوک ۴۵۰ درجه

در این نمونه‌ها در محل‌هایی ریزترک‌ها در کنار هم ایجاد ترک‌های طنابی شکلی کرده‌اند اما بازشدگی ندارند، این نوع ریزترک‌های طنابی شکل اغلب طویل و سراسری هستند بدین معنا که از چند کانی مجاور هم گذر می‌کند البته در کانی‌های درشت به‌صورت درون‌دانه‌ای دیده می‌شوند (شکل ۵g). پس‌از این شوک هر جا آثار بیوتیت و یا مسکویت داخل یک کانی وجود داشته، منشأ شکل‌گیری ریزترک‌های القایی گردیده و گاهی بازشدگی در کنار این کانی‌ها یا خطوط پیوسته متشکل از این کانی‌ها دیده می‌شود (شکل ۵h, i). ریزترک‌های باز شده‌ای نیز وجود دارند که درون آن‌ها با خرده‌های سنگ پر شده‌اند، این پرشدگی می‌تواند مربوط به زمان اشباع‌شدگی در آب سرد در حین شوک حرارتی باشد.

#### ۴-۶-۴- توصیف واکنش نمونه گرانیتوئید توده مریوان (منطقه مریوان) در برابر حرارت

##### ۴-۶-۱- نمونه تازه مریوان

در مقطع نازک میکروسکوپی در نمونه مریوان هیچ اثری از هوازدگی دیده نمی‌شود. بافت سنگ‌ساب هدرال گرانولار است و بافت پوئی‌کلستیک هم دیده می‌شود. کانی‌های ارتوکلاز و پلاژیوکلاز تا اندازه ۱۰ میلی‌متر در مقطع دیده می‌شوند. میانگین اندازه دانه‌های کوارتز که غالباً فضای بین کانی‌های درشت را پر کرده، به ۲ تا ۳ میلی‌متر می‌رسد و بیوتیت‌ها نیز به‌طور چشمگیری در نمونه دستی و نیز مقاطع نازک قابل مشاهده‌اند و اندازه‌ای تا حد ۳ میلی‌متر دارند (شکل ۵a). کانی‌های دیگر مانند کلریت و مسکویت در مقطع میکروسکوپی فراوانی کم و اندازه کانی بسیار کوچکی دارند. به‌طور کل می‌توان گفت میانگین اندازه دانه‌های سنگ در نمونه دستی تقریباً ۳-۴ میلی‌متر است. پلاژیوکلازها کمی سوسورپته شده‌اند. مرزهای کانی‌ها به‌شدت مضرس بوده و این تضرس در مرز کانی‌های کوارتز - کوارتز بسیار مشهود است. مرزهای بین کوارتز - فلدسپات و کوارتز - میکا مضرس تا صاف و بیشتر مضرس هستند (شکل ۵b, c, d). مرزهایی که به‌صورت خلیجی داخل هم شده‌اند نیز بسیار مشهود است. در بررسی مقطع نازک نمونه تازه ریزترک‌ها غالباً درون‌دانه‌ای بوده و ریزترک‌های سراسری کمتر دیده شد. بازشدگی در ریزترک‌ها در این نمونه دمایی دیده نشد. تعداد ریزترک‌های درونی در کانی‌های ارتوز بیش از کانی کوارتز بوده و کانی پلاژیوکلاز علیرغم فراوانی مودال در مقطع، بسیار کم دچار ریزترک گردیده است که این

خرده‌های گرانیتوئیدی ۲۰ میکرونی درون آن‌ها قابل مشاهده است (شکل b۶). بافت میرمیکیتی درون کانی‌ها منشأ شکل‌گیری ترک‌های جدید است. در این گرانیتوئید در محل اجتماع کانی‌های بسیار ریزدانه اغلب ترک‌های سراسری شکل می‌گیرند. اگر این کانی‌های ریزدانه از جنس کوارتز باشند ترک‌های طنابی شکلی کاملاً مرز این محل را با کانی‌های درشت مجاور جدا می‌سازد. ریزترک‌های درون‌دانه‌ای به‌طور واضحی طولیل‌تر از شوک‌های پیشین هستند (شکل c۶). در شوک‌های قبلی تشخیص ریزترک‌های مرزی امکان‌پذیر نبود اما پس‌از این شوک به دلیل وضوح بازشدگی، تشخیص این نوع ریزترک‌ها امکان‌پذیر است (شکل d۶). پس‌از این شوک، ریزترک‌های سراسری و درونی افزایش‌یافته‌اند اما افزایش دانسیته ترک سراسری بسیار بیشتر از دانسیته ترک درونی است و ریزترک‌های درونی و سراسری تقریباً برابر می‌گردند.

#### ۴-۶-۵- گرانیتوئید مریوان پس از شوک ۸۵۰ درجه

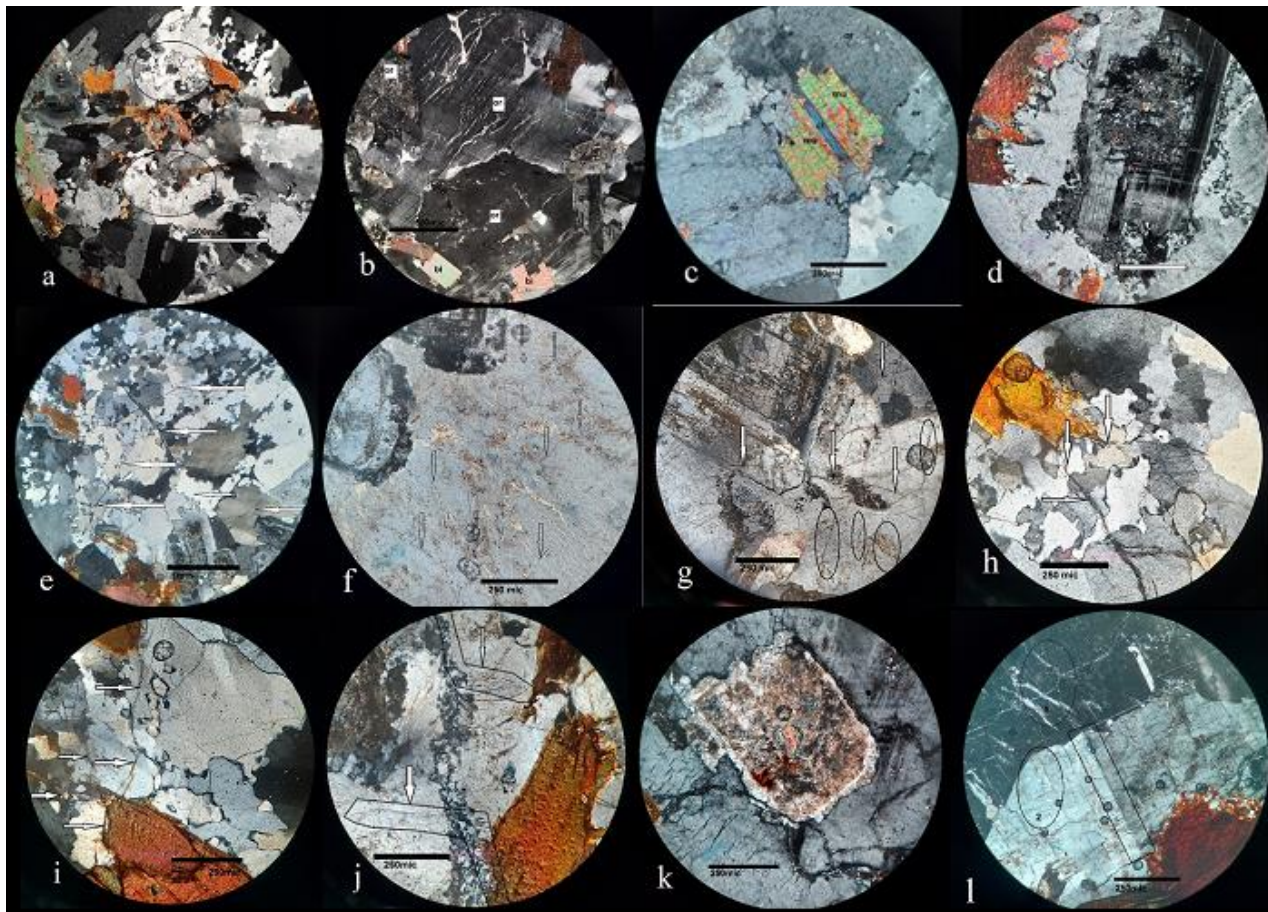
پس‌از این شوک ترک‌های فراوانی دیده می‌شوند که با خرده‌های بیوتیت پر شده‌اند. به نظر می‌رسد هرگونه نوسان در ترکیب شیمیایی اولیه در سنگ مثل زونینگ و بافت‌های پرتیتی و اکسولوشن و نیز ناهمگنی‌های دیگر از جمله کلیواژ و سریسیتی شدن منشأ تشکیل بسیاری از ترک‌ها با بازشدگی دو تا ۳ میکرون است. ریزترک‌های کوتاه (به طول ۵-۱۰ میکرون) و عرض ۲ میکرون فراوان دیده می‌شود (شکل e۶). خرده‌های میکا به‌طور چشمگیری ریزترک‌ها را پر کرده‌اند. در ترک‌های عریض منتهی به بیوتیت، غالباً خرده‌های میکا فراوان هستند (شکل f۶). پس‌از این شوک کانی‌های میکا به‌طور واضح دچار شکستگی و جدایش قطعات گردیده‌اند.

و این حالت با این شدت در کانی‌های میکا در هیچ یک از شوک‌های قبلی مشاهده نشد. ترک‌های مرزی در مرز کانی‌ها فراوان هستند و بازشدگی ۲-۳ میکرونی دارند. کانی‌های ارتوز غالباً با کانی‌های مجاور ترک مرزی محیطی دارند و اگر ترکی داخل آن‌ها شکل گرفته باشد یا از مرز به درون راه یافته باشد، در محل کلیواژها تشکیل شده‌اند. در نمونه‌های این شوک ترک‌ها چند شاخه شده و در محل انشعاب ترک‌ها حفره‌های ۳۰ تا ۵۰ میکرونی و در مواردی نیز بزرگ‌تر دیده می‌شوند. البته ترک‌های پهنی که ناگهان باریک شده و حتی مسدود شده‌اند نیز فراوان مشاهده می‌شوند.

غالباً ریزترک‌های درون‌دانه‌ای ویژگی ریزترک‌های نمونه تازه و نمونه ۲۵۰ درجه را دارند. کانی‌های ریز که به‌صورت ادخال درون کانی‌های بزرگ‌تر دیده می‌شوند نیز منشأ تشکیل ریزترک‌های جدید هستند. در نمونه مریوان رگه‌هایی از جنس کوارتز بسیار ریزدانه یا بیوتیت یا کوارتز با بافت میرمیکیتی فراوان است و بسیاری از ریزترک‌هایی که بازشدگی دارند به‌موازات این رگه‌ها شکل گرفته‌اند (شکل j۵). ریزترک‌هایی با بازشدگی کم در محل‌های زونینگ و پرتیتی درون ارتوکلازهای بزرگ و در امتداد خطوط ماکلی پلاژیوکلازها شکل گرفته‌اند که پیش‌از این شوک دیده نمی‌شدند. به‌طور واضحی پلاژیوکلازها کمتر دچار ریزترک گردیده‌اند و در مقابل تغییرات حرارتی در این نوع سنگ مقاوم هستند. غالب ریزترک‌ها در کانی‌های ارتوکلاز و کوارتز شکل گرفته است. پس‌از این شوک حرارتی ریزترک‌های مرزی قابل تشخیص با اطمینان بالا نبود، اما ریزترک‌های درونی افزایش بیشتری نسبت به ریزترک‌های سراسری داشتند.

#### ۴-۶-۴- گرانیتوئید مریوان پس از شوک ۶۵۰ درجه

پس‌از این شوک هر جا که سریسیتی شدن در کانی ارتوز در حد متوسط بوده در اثر شوک حرارتی مرز این کانی با کانی مجاور جدایش حاصل می‌نماید و کاملاً به‌وضوح بازشدگی در محل مرز دو کانی مجاور دیده می‌شود (شکل k۵)؛ اما اگر سریسیتی شدن در حد بالایی باشد ترک‌هایی با بازشدگی واضح درون خود کانی ارتوز شکل می‌گیرد. اگر در ارتوکلازهای درشت رگه‌های کوارتزی دیده شود، ترک‌ها غالباً در این محل‌ها شکل می‌گیرند. محل کلیواژ در ارتوزهای درشت، نقاط ضعف عمده در برابر شوک حرارتی هستند و پس‌از این شوک غالباً منشأ تشکیل ترک‌های سراسری هستند (شکل l۵). رگه‌های مسکویت غالباً محل تشکیل ترک بوده و خرده‌های مسکویت ترک ایجاد شده را به‌صورت منقطع پر کرده است. در اثر شوک کانی‌های میکا از دیگر کانی‌ها جدایش مرزی پیدا می‌کنند درحالی‌که در شوک‌های قبلی ترک‌ها با رسیدن به این نوع کانی غالباً محو می‌شدند. خرده میکاهای داخل ترک‌ها قابل توجه هستند (شکل a۶). در بسیاری از ترک‌های سراسری خرده‌های دیواره ترک، به درون ترک ریزش نموده است. در مواردی فضای بزرگی در اثر ریزش دیواره ترک ایجاد شده و سپس در اثر وجود یک قطعه بزرگ‌تر مسیر ورود سیال به این فضا بسیار محدود گردیده است. ترک‌هایی با بازشدگی ۵۰ میکرون مشاهده می‌شوند که



شکل ۵- تصاویری از مقاطع نازک نمونه مریوان. اعداد پس از نام تصویر دمای شوک را نشان می‌دهند. (a) نمونه تازه. کوارتزهای ریزدانه در بین کانی‌های درشت‌تر. (b) نمونه تازه. به ابعاد متفاوت و مرزهای کانی‌ها دقت شود. (c) نمونه تازه. q: کوارتز، or: ارتوکلاز، cl: کلریت، mu: مسکویت. (d) ۲۵۰. به مرزهای مضرس دقت شود. (e) ۲۵۰. ریزترک سراسری. (f) ۲۵۰. ریزترک درونی. (g) ۴۵۰. پیکان‌ها، ترک‌های طنابی شکل سراسری و بیضوی‌ها ریزترک‌های درون کانی‌های درشت را نشان می‌دهند. (h) ۴۵۰. ریزترک‌هایی که از میکاها منشأ گرفته یا به آن‌ها ختم شده‌اند. (i) ۴۵۰. ریزترک‌هایی که از میکا منشأ گرفته و برخی از آن‌ها که بازشدگی دارند از خرده‌های میکا پر شده‌اند. (j) ۴۵۰. ریزترک‌هایی که در کنار رگه‌های کوارتزی ریزدانه شکل گرفته و توسعه یافته‌اند. (k) ۶۵۰. جدایش تقریباً کامل مرز ارتوز سرسیتی شده از ارتوزهای مجاور با بازشدگی قابل مشاهده و (l) ۶۵۰. صفحات کلیواژ نقاط ضعف عمده در برابر شوک حرارتی هستند.

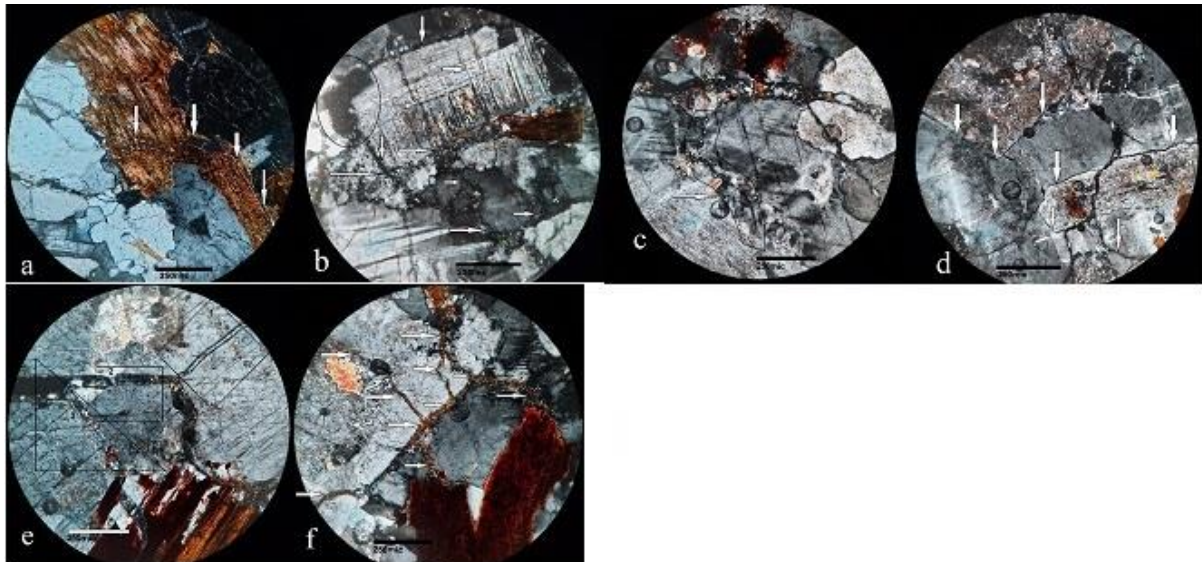
Fig 5. Images of thin sections of Marivan sample. The numbers after the name of the image indicate the shock temperature. (a) Fresh sample. Fine quartz among coarser minerals. (b) Fresh sample. Pay attention to the different dimensions and boundaries of the minerals. (c) Fresh samples. q: Quartz, or: orthoclase, cl: chlorite, mu: muscovite. (d) 250. Pay attention to the jagged boundaries. (e) 250. Transgranular microcracks. (f) 250. Intragranular microcracks. (g) 450. Arrows show rope-shaped transgranular microcracks and ellipses show small cracks in coarse minerals. (h) 450. Microcracks that originate or end in micas. (i) 450. Microcracks originating from mica and some of them have openings which are filled with mica fragments. (j) 450. Microcracks have been formed and developed adjacent with fine-grained quartz veins. (k) 650. Sericitized orthoclase boundary is almost completely separated from adjacent orthoclase with visible opening and (l) 650. Cleavage plates are major weaknesses against heat shock.

شوگ قبلی افزایش می‌یابد درحالی‌که دانسیته ترک درونی با کاهش چشمگیر به ۵۰ درصد شوگ قبلی می‌رسد. می‌توان نتیجه گرفت که تشکیل ریزترک‌های سراسری در این شوگ باعث رهایی تنش حرارتی القایی شده و از اعمال تنش به درون

ترک‌های عریض و پهن، با انبوهی از خرده‌های برجای لبه‌های ترک به‌طور فشرده‌ای پر شده‌اند به‌نحوی که تشخیص آن‌ها از بافت اولیه سنگ مستلزم دقت است. در این نمونه پس از شوگ ۸۵۰ درجه دانسیته ترک سراسری ناگهان به دو برابر

غیر قابل تشخیص می‌نماید.

کانی و ایجاد ریزترک‌های درونی جلوگیری می‌نماید و یا ریزترک‌های درونی پیشین را می‌بندد و در این روش مطالعه



شکل ۶- تصاویری از مقاطع نازک نمونه مریوان. اعداد پس از نام تصویر دمای شوک را نشان می‌دهند. (a) ۶۵۰. پیکان‌ها ترک‌خوردگی بیوتیت‌ها و جدایش مرز بین بیوتیت و کانی مجاور را نشان می‌دهند. (b) ۶۵۰. ترک‌های عریض و حفره‌های بیش از ۵۰ میکرونی (محدوده دایره) در اثر خرد شدن و پراکنده شدن بیوتیت و مواد دیواره در درون ترک ایجاد شده است. (c) ۶۵۰. ریزترک‌های ایجاد شده در کنار کوارتز میرمیکیتی و اتصال به ریزترک‌های سراسری قابل مشاهده است. (d) ۶۵۰. ریزترک‌های مرزی که واضح شده‌اند. (e) ۸۵۰. کلیواژها نقاط ضعف برای ایجاد ترک‌های عریض و نیز ترک‌های کوتاه و بسیار بسته هستند و (f) ۸۵۰. خرده‌های بیوتیت که کاملاً در ریزترک‌ها پراکنده شده‌اند.

Fig 6. Images of thin sections of Marivan sample. The numbers after the name of the image indicate the shock temperature. (a) 650. Arrows indicate cracking of biotites and separation of the boundary between biotite and adjacent mineral. (b) 650. Wide cracks and cavities of more than 50 microns (circle range) are caused by the crushing and dispersion of biotites and the wall materials inside the crack. (c) 650. Created microcracks along with myrmekite quartz and connections of them to transgranular microcracks are visible. (d) 650. Intergranular microcracks that have been clarified or created. (e) 850. Cleavages are weaknesses in creating wide cracks as well as short and very closed cracks and (f) 850. Biotite fragments that are completely dispersed in microcracks.

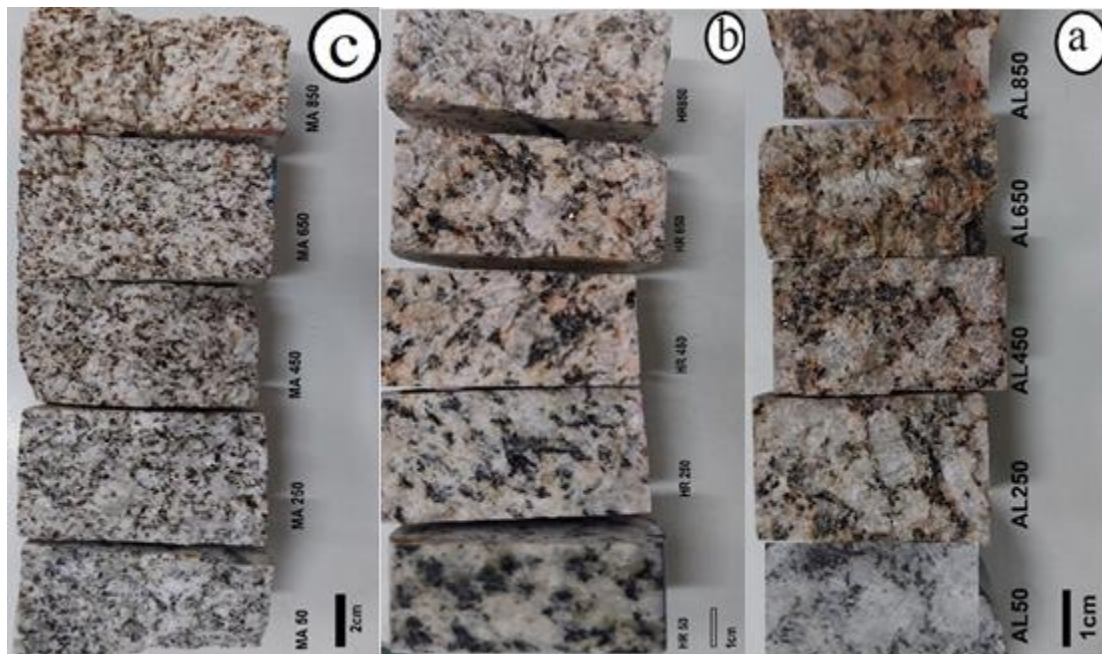
کانی‌های درشت‌تر حتی پیش از شوک با آب سرد از نمونه جدا می‌گردد (شکل ۷a). در نمونه‌های حسن رباط پس از شوک ۶۵۰ درجه ظاهری یکپارچه دیده می‌شود و ترک‌های زیادی مشاهده نمی‌شود در حالی که صدای ضربات وارده به سنگ کاملاً تغییر یافته و کانی‌های فلدسپاتی سنگ رنگ روشنی به خود گرفته‌اند. پس از شوک ۸۵۰ درجه نیز ظاهر سنگ ترک‌های باز شده و گسسته‌ای ندارد و در موارد معدودی کانی‌ها از نمونه جدا می‌گردند که کاملاً با نمونه الوند متفاوت است؛ اما صدای ضربه به نمونه نشانگر توسعه ریزترک‌ها در درون نمونه است (شکل ۷b). نمونه مریوان که کمترین میانگین اندازه دانه‌ها را

#### ۴-۷- بررسی نمونه ماکروسکپی نمونه‌های گرانیتوئید

در بررسی نمونه دستی گرانیتوئیدهای مورد مطالعه روند تغییرات با دانه‌بندی و میانگین اندازه دانه‌ها مرتبط بود. هر سه نمونه مورد مطالعه تا دمای ۴۵۰ درجه تغییر واضحی در نمونه دستی رخ نداده و فقط کمی تغییر رنگ در نمونه‌های شوک دیده ۴۵۰ درجه، به تشخیص این نمونه‌ها از نمونه تازه کمک می‌نماید؛ اما پس از شوک ۶۵۰ درجه در نمونه الوند ترک‌های ماکروسکپی دیده می‌شود اما گسستگی واضح بین کانی‌ها رخ نداده است اما با قدرت دست قابل شکستن هستند این در حالی است که پس از حرارت ۸۵۰ درجه قطعاتی از سنگ به‌ویژه

پس از شوک‌های ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه در هم قفل‌شدگی شدید کانی‌ها به دلیل کوچک بودن اندازه دانه‌هاست (شکل ۷c). تغییر رنگ واضح‌ترین تغییر در طی شوک‌های حرارتی در تمامی نمونه‌ها بود.

دارد پس از شوک ۶۵۰ درجه، علیرغم انتظار ترک‌های متعدد و بزرگ ماکروسکپی دارد. قطعات بین ترک‌ها به هم پیوسته هستند اما با فشار دست به راحتی خرد می‌شوند. این در حالی است که پس از شوک ۸۵۰ درجه ذرات ریز کانی‌ها به راحتی از نمونه‌ها جدا می‌گردند. در نمونه مریوان تنها نیروی اتصال ذرات



شکل ۷- نمونه گرانیتوئیدی حالت تازه و پس از شوک ۲۵۰ و ۴۵۰ و ۶۵۰ و ۸۵۰ درجه. (a) گرانیتوئید حسن رباط، (b) گرانیتوئید الوند و (c) گرانیتوئید مریوان.

Fig 7. Image of granitic sample fresh state and after 250, 450, 650 and 850 centigrade shock. (a) Alvand. (b) Hasan Robot and (c) Marivan.

خالی‌شدگی‌های مثلثی شکلی، در محل تلاقی بیضی‌ها مشاهده می‌گردد. در نمونه حسن رباط تخلخل وضوح بسیاری یافته (محدوده‌های مربع) و ترک‌های ریز درون کانی‌ها فراوانی بیشتری یافته‌اند (محدوده‌های بیضی) که در مقاطع نازک نیز مشهود بود. درحالی که در نمونه مریوان تخلخل‌ها دیگر وضوح قبل را ندارند و بافت یکنواختی بیشتری نشان می‌دهد. محدوده بیضی‌ها روی تصویر دو ریزترک بسته را نشان می‌دهند.

#### ۴-۸-۳- تصاویر ۴۵۰ درجه

در نمونه الوند در محل تلاقی ریزترک‌ها خردشدگی و خالی‌شدگی دیده می‌شود یک نمونه از خالی‌شدگی در حد ۲۰ تا ۳۰ میکرون گوشه پایین سمت چپ تصویر دیده می‌شود که از همین نمونه‌ها در مقطع نازک نیز مشاهده گردید. در نمونه حسن رباط این حالت همراه با کمی بازشدگی و نیز خردشدگی

#### ۴-۸-۱- بررسی تصاویر SEM نمونه‌های گرانیتوئید

در شکل ۸ تصاویر SEM نمونه‌ها قابل مشاهده است با دقت در این تصاویر نکات زیر قابل مشاهده است.

#### ۴-۸-۱- تصاویر ۵۰ درجه

در تصاویر ارائه شده از نمونه‌های تازه دواپر در نمونه الوند و مریوان ریزترک‌های بسته را نشان می‌دهد و مربع‌ها تخلخل موجود در گرانیت‌ها را نشان می‌دهند. تخلخل موجود در نمونه مریوان در محدوده بیضی به شکل نقاط تیره در اطراف کانی میکا نیز مشخص می‌باشد.

#### ۴-۸-۲- تصاویر ۲۵۰ درجه

محدوده‌های بیضوی در نمونه الوند نشان می‌دهد که ریزترک‌ها طولیل‌تر شده‌اند و در نتیجه نقاط تلاقی بیشتر شده و

ریزترک‌ها، متأثر از شوک‌های دمایی متفاوت، اثر گذاشته است. روند افزایش دانسیته ترک در نمونه حسن‌رباط روند یکنواخت-تری دارد که می‌تواند ناشی از یکنواختی اندازه کانی‌ها باشد. عامل دیگر مورد بررسی، تخلخل مؤثر موجود در گرانیتوئید تازه بود. در گرانیتوئید تازه الوند کمترین تخلخل مؤثر به دست آمد این موضوع با دانسیته ترک‌های سراسری و نیز پرشدگی ریزترک‌ها از مسکویت در این نمونه مطابقت داشت اما بیشترین دانسیته ترک‌ها در بین تمام شوک‌ها در نمونه الوند مشاهده گردید که می‌تواند به دلیل سرعت توسعه ترک‌ها در این نمونه باشد. این سرعت توسعه ناشی از دو موضوع است یکی ترک‌های درون‌دانه‌ای که می‌توانند توسعه یافته و به ترک‌های سراسری تبدیل شوند دیگری اینکه پرشدگی ریزترک‌ها و ترک‌ها از مسکویت به دلیل ویژگی‌های حرارتی مسکویت باعث توسعه آن‌ها گردیده باشد. تخلخل تا حدی نقش خنثی‌کننده انبساط حرارتی کانی‌ها را دارد که در مورد نمونه الوند عدم وجود تخلخل باعث تأثیرپذیری بیشتر سنگ از انبساط ناشی از حرارت کانی‌ها می‌گردد و به سرعت ریزترک‌ها توسعه می‌یابند در نمونه‌های گرانیتوئیدی مورد مطالعه، نوع مرزها به دقت بررسی شدند و تأثیر نوع مرزها بر نحوه تشکیل و نیز توسعه ریزترک‌ها روشن گردید. نمونه مریوان در مقاطع نازک بیشترین مرزهای مضرس و الوند بیشترین مرزهای صاف داشتند. یکی از مهم‌ترین نکاتی که در مقاطع نازک دیده شد ایجاد ریزترک‌های ناشی از شوک در نقاطی است که کانی‌ها ریزدانه بوده و درعین حال به دلیل مرز مضرس در هم قفل‌شدگی شدید داشتند. این موارد در گرانیتوئیدهای دیگر به دلیل تضرس کمتر مرزها، کمتر بود. از طرفی چون ابعاد کانی‌ها در نمونه مریوان کم بود حتی اگر تضرس باعث در هم تنیدگی تنش حرارتی و ایجاد ترک‌های درون‌دانه‌ای می‌گردید، طول ترک‌ها بسیار کوتاه بود. حضور کانی‌هایی مانند بیوتیت، مسکویت، کلریت و هورنبلند در گرانیتوئیدها به دلیل خصوصیات حرارتی خاصی که دارند بر توسعه ترک‌ها مؤثر است. بیوتیت با مقدار مودال کمی بیش از ۱۰ درصد و بقیه این کانی‌ها با کمتر از ۱۰ درصد (کانی فرعی)، حضور مؤثری می‌توانند داشته باشند. چنانکه در مقاطع مشاهده گردید بسیاری از ریزترک‌ها در شوک‌های دمایی پایین‌تر، در این کانی‌ها مخصوصاً بیوتیت مستهلک می‌گردند.

به‌طور واضح در اطراف کانی میکای موجود در مرکز تصویر دیده می‌شود. در نمونه تصویر مریوان ریزترک‌های طویل (محدوده-های بیضی) و نیز ریزترک‌هایی همراه با کمی خردشدگی (محدوده دایره) دیده می‌شود.

#### ۴-۸-۴- تصاویر ۶۵۰ درجه

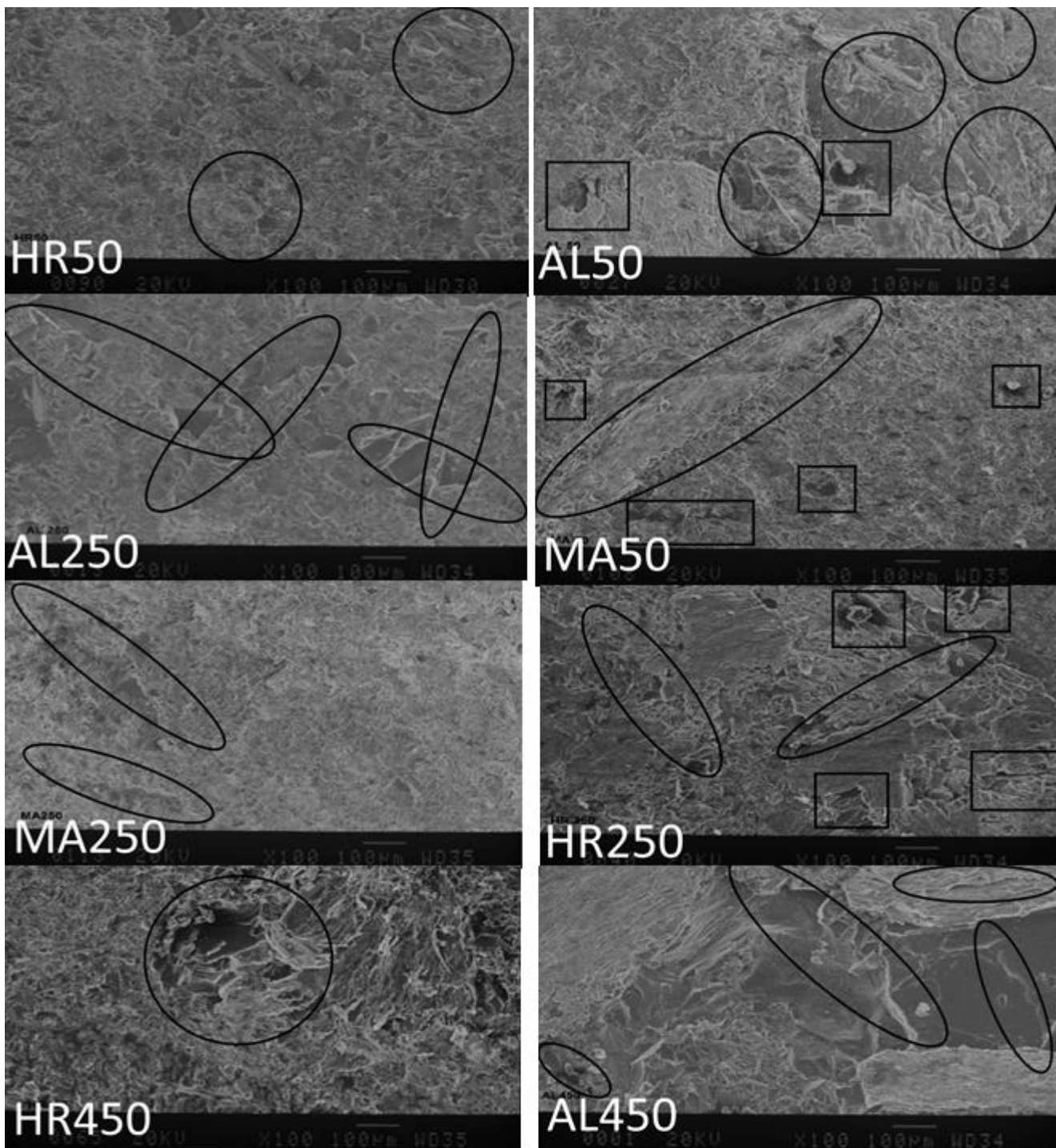
در هر سه ایستگاه بازشدگی نسبی ریزترک‌ها دیده می‌شود. نمونه الوند به‌وضوح ریزترک‌های منطبق بر کلیواژ به رنگ کمی روشن‌تر از زمینه (محدوده‌های مستطیل) مشاهده می‌گردد. در تصویر نمونه حسن رباط ریزترک‌های طویل (محدوده بیضی) و منشاگیری ریزترک از ادخال‌های درون کانی (محدوده دایره) دیده می‌شود، کانی موجود در تصویر اورتوکلز درشت دانه‌ای است که ادخالهایی از کانی‌های دیگر در آنها دیده می‌شود. در تصویر نمونه مریوان محدوده‌های بیضی جداشدگی یک کانی از کانی‌های مجاور و تشکیل فضای خالی در مرز بین دو کانی را نشان می‌دهند و نیز بازشدگی کلیواژ در کانی مرکز تصویر قابل رؤیت است.

#### ۴-۸-۵- تصاویر ۸۵۰ درجه

محدوده‌های مشخص شده در تصویر نمونه الوند بازشدگی واضح ریزترک‌ها در حد ۲۰ میکرون را نشان می‌دهند و بازشدگی کلیواژها و ترک‌خوردگی در میکا و شکل‌گیری جدایش بین میکا و کانی‌های مجاور کاملاً واضح است. در تصویر نمونه حسن رباط ریزترک‌ها کاملاً باز شده (حدود ۱۰ میکرون) و در محدوده بیضی خردشدگی و بازشدگی در اطراف کانی‌های میکا و هورنبلند مشاهده گردید. در تصویر نمونه مریوان ترک‌های باز شده به‌ویژه به شکل کاملاً مرزی را می‌توان دید (محدوده‌های بیضی) که در محل تلاقی ریزترک‌ها حفره ۴۰ تا ۵۰ میکرونی شکل گرفته و نکته قابل ذکر آنکه غیر از ریزترک‌های سراسری، دیگر نمی‌توان ریزترک‌های درونی زیادی را مشاهده کرد و بافت سنگ یکپارچگی فراوانی را نشان می‌دهد. این یکپارچگی تقریباً با تصویر ۲۵۰ درجه این نمونه شباهت دارد.

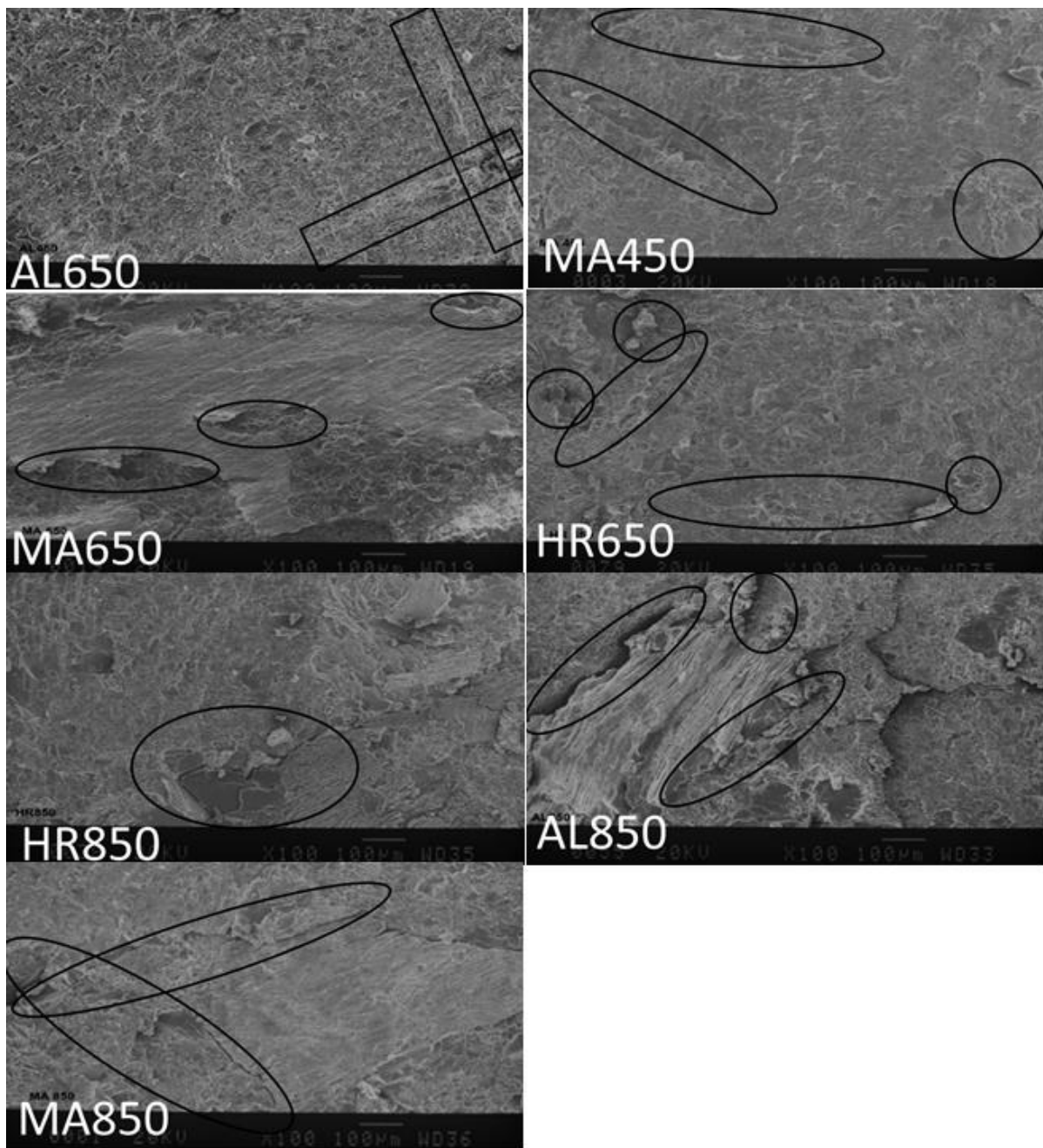
#### ۵- بحث

نمونه‌های مورد مطالعه همه گرانیتوئید درشت‌دانه بودند اما میانگین اندازه دانه‌ها از حدود ۳ تا ۷ متغیر بود و در بین نمونه‌ها حسن رباط در میانه این گستره بوده و نیز یکنواختی اندازه دانه‌ها در این نمونه بیشتر بود. این موضوع بر نحوه گسترش



شکل ۸- تصاویری از نمونه‌های تازه و شوک دیده توسط میکروسکوپ الکترونی. (نمونه الوند: AL، نمونه حسن رباط: HR، نمونه مریوان: MA) اعداد ۵۰، ۲۵۰، ۴۵۰ و ۶۵۰ در کنار نام، نشان‌دهنده حداکثر حرارت تحمل شده توسط نمونه پیش از شوک با آب سرد می‌باشد.

Fig 8. Images of fresh and shocked samples by electron microscope. (Alvand sample: AL, Hassan Rabat sample: HR, Marivan sample: MA) The numbers 50, 250, 450, 650 and 850 next to the name indicate the maximum heat tolerated by the sample before the shock with cold water.



ادامه شکل ۸  
Fig 8 continued.

به صورت تیرگی کامل و خردشدگی ساختار ورقه‌ای و موارد متعددی کاملاً به شکل کانی اپک درمی‌آیند. در این گرانیتوئیدها که همگی ساب هدرال گرانولار بودند، بافت غالب دیگری مشاهده گردید که در مریوان و الوند میرمیکیت و پرتیت بود و در نمونه حسن رباط پوئی کلیتیک بود. از آنجا دو نمونه الوند و مریوان علیرغم تفاوت میانگین ابعاد دانه‌ها، دانسیته ترک نزدیک به هم نشان می‌دهند ناشی از این بافت نیز می‌باشد.

در دماهای بالاتر به وضوح از کانی‌های مجاور جدایش حاصل می‌نمایند که این موضوع در فلدسپات‌های سریسیتی شده هم مکرر دیده شد. پس از شوک ۸۵۰ درجه بود که کانی‌های مذکور خود دچار شکستگی شده‌اند. نکته دیگر در مورد این کانی‌ها آبگیری شدید این کانی‌ها در اثر حرارت است که پس از دمای ۴۵۰ درجه به صورت لکه‌های پراکنده دیده می‌شود و پس از ۶۵۰ درجه به صورت تغییر رنگ کلی کانی‌ها و بعد از ۸۵۰ درجه



۳) ادخال‌های درون کانی‌های درشت به‌ویژه از نوع میکا (مسکویت و بیوتیت) و کوارتز باعث تشکیل ریزترک‌های درون‌دانه‌ای می‌گردد.

۴) به‌طور کل کانی پلاژیوکلاز بسیار کم دچار ریزترک گردیده و کانی ارتوز بیش از سایر کانی‌ها دچار ریزترک می‌گردد.

۵) ارتوز در محل‌های کلیواژ و پرتیتی دچار ریزترک‌های درونی می‌گردد و این نقاط، محل ضعف در کانی ارتوز هستند.

۶) مرزهای صاف فراوان و یا مضرس فراوان تأثیر مثبتی بر توسعه ریزترک‌ها دارند.

۷) افزایش فراوانی کانی‌های بسیار درشت یا بسیار ریز در گرانیتوئیدهای درشت‌دانه باعث تسریع توسعه ریزترک‌ها می‌گردند.

۸) با توجه به میانگین ابعاد دانه‌ها انتظار می‌رود که نمونه حسن رباط نسبت به دو نمونه دیگر در حالت بینابینی قرار داشته باشد. درحالی‌که در نمونه‌های الوند و مریوان نرخ توسعه ریزترک‌های ناشی از شوک حرارتی از نوع درونی و سراسری و مرزی مشابه هم هستند و نمونه حسن رباط رفتار کاملاً متفاوتی در سرعت توسعه ریزترک‌ها در شوک‌های حرارتی مختلف نشان می‌دهد که سن مطلق گرانیتوئید به‌عنوان یک عامل مهم در این مورد قابل توجه است.

با توجه به بررسی‌های انجام‌شده در گرانیتوئیدها به نظر می‌رسد عامل سن مطلق در شیوه پاسخ گرانیتوئیدها به شوک حرارتی مهم باشد و از آنجاکه بررسی‌های تأثیر شوک حرارتی بر گرانیتوئیدها کاربرد بسیاری در محل مدفن‌های اتمی و سمی و نیز سیستم‌های استخراج زمین‌گرمایی دارد و به‌طورمعمول سپر گرانیتوئیدی (با سن مطلق بالا) برای موارد این‌چنینی در نظر گرفته می‌شود، انجام پژوهش‌های بیشتر و دقیق‌تر ریزترک‌ها القایی ناشی از شوک حرارتی (با در نظر گرفتن تازه بودن و عدم هوازدگی نمونه) در این نوع گرانیتوئیدها می‌تواند نکات مفیدی در این خصوص آشکار نماید. این مطالعه نشان داد مشاهده بافت‌های پرتیتی و میرمیکیتی می‌تواند نشانگری برای شکل‌گیری نوع خاصی از ریزترک‌ها باشد و البته این نوع بافت در کنار اندازه ذرات تشکیل دهنده سنگ که در یک بررسی میکروسکوپی مشخص می‌گردد، پیش‌بینی رفتار سنگ در برابر حرارت را آسان‌تر می‌نماید. انواع رگه‌های مسکویت یا سرسیستی از نقاط حساس در برابر شوک حرارتی است و در

به دلیل ایجاد تشابه هر چه بیشتر این نمونه‌ها از زون ساختاری سندانج - سیرجان برداشت شدند و گرانیتوئید تازه حسن رباط با سن ۲۸۸ میلیون سال علی‌رغم انتظار نسبت به دو نمونه دیگر دارای ریزترک‌های کمتری بوده و در طی اعمال شوک حرارتی در دماهای مختلف در برابر تنش حرارتی مقاوم‌تر ظاهر شد و نمونه‌های جوان‌تر الوند (۱۶۴ میلیون سال) و مریوان (۳۸ میلیون سال) چه در نمونه تازه و چه در برابر شوک‌های حرارتی مختلف دچار ریزترک‌های بسیار بیشتری گردیدند. به نظر می‌رسد عامل سن در ایجاد انسجام درون‌دانه‌ای و بالا بردن استحکام ساختار درون‌دانه‌ای مؤثر بوده و حداکثر ریزترک‌های درون‌دانه‌ای در دمای ۴۵۰ درجه در نمونه حسن رباط دیده می‌شود، درحالی‌که شوک‌های بعدی باعث افزایش چشمگیر ترک‌های مرزی و سراسری و کاهش ریزترک‌های درون‌دانه‌ای می‌گردند. نمونه‌های الوند و مریوان حداکثر ریزترک‌های درون‌دانه‌ای و مرزی را در ۶۵۰ درجه نشان می‌دهند و پس از آن دچار کاهش می‌گردند و اما در شوک‌های دما بالاتر ریزترک‌های سراسری در این نمونه‌ها افزایش فراوانی نشان می‌دهد. این تفاوت رفتار به دلیل تشابه فراوانی و ساختار کانی‌های موجود در سنگ فقط می‌تواند با گذر زمان بر پیوندهای درون ساختاری کانی‌ها مرتبط باشد. قابل توجه است که این تأثیر (استحکام پیوندهای درون ساختاری کانی‌ها) با وجود مرزها منقطع گردیده و تشکیل ریزترک‌های مرزی سرعت فراوانی در این نمونه دارد گویا کانی‌ها با گذر زمان طولانی به‌صورت درونی واجد چنان استحکامی می‌گردند که عملاً مرز با کانی‌های مجاور دچار جدایش می‌گردد و با القا شوک حرارتی در حرارت‌های بالاتر از ۴۵۰ نقاط ضعف مرزها هستند، نکته‌ای که در دیگر نمونه‌ها دیده نشد.

## ۶- نتیجه‌گیری

این پژوهش نشان داد با بررسی میکروسکوپی بر روی مقطع نازک نمونه‌های تازه می‌توان ارزیابی کرد که واکنش نمونه در برابر حرارت چگونه است. به‌طور خلاصه می‌توان گفت:

۱) در گرانیتوئیدهای مورد مطالعه میانگین ابعاد دانه‌ها در حد متوسط و بافت یکنواخت‌تر و نیز وجود مرزهای متنوع (صاف و مضرس) مقاومت گرانیتوئید را در برابر تشکیل ریزترک بالا می‌برد.

۲) وجود بافت میرمیکیتی سنگ گرانیتوئید را مستعد تشکیل ریزترک‌های سراسری می‌نماید.

کانی بیوتیت و هورنبلند، ترک خوردگی و چین خوردگی ورقه-های کانی بیوتیت، بازشدگی سطوح کلیواژ درون ارتوزکلازها بدون آثار هوازدگی و یا رنگ گرفتگی را برای تشخیص تاثیر شوک حرارتی بر گرانیتهای معرفی نمود که می‌توانند مبنای مطالعات آینده باشند.

این مطالعه واکنش آنها در برابر به تصویر در آمد. جدایش محیطی کانی بیوتیت از کانی‌های مجاور در اثر حرارت به راحتی در مطالعات میکروسکوپی قابل تشخیص است. این پژوهش نشانگرهای پتروگرافیکی مختلفی مانند تیره شدن رنگ

## مراجع

- Alirezaei, S., Hassanzadeh, J., 2012. Geochemistry and zircon geochronology of the Permian A-type Hasanrobat granite, Sanandaj-Sirjan belt: A new record of the Gondwana break-up in Iran. *Lithos* 151, 122-134. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.11.015>
- Bauer, S.J., Johnson, B., 1979. Effects of slow uniform heating on the physical properties of the Westerly and Charcoal granites. 20th US symposium on rock mechanics (USRMS). OnePetro.
- Benson, P.M., Thompson, B.D., Meredith, P.G., Vinciguerra, S., Young, R.P., 2007. Imaging slow failure in triaxially deformed Etna basalt using 3D acoustic-emission location and X-ray computed tomography. *Geophysical Research Letters* 34(3). <https://doi.org/10.1029/2006GL028721>
- Browning, J., Meredith, P., Gudmundsson, A., 2016. Cooling-dominated cracking in thermally stressed volcanic rocks. *Geophysical Research Letters* 43, 8417-8425. <https://doi.org/10.1002/2016GL070532>
- Browning, J., Meredith, P., Mitchell, T., Daoud, A., Karaoglu, O., Oskouei, S., Bayer, O., 2021. Microstructural Controls on Thermally-Induced Crack Damage in Rocks. AGU Fall Meeting Abstracts, pp. EP54B-02. 2021AGUFMEP54B.02B <https://doi.org/10.1029/2020GL088693>
- Den'gina, N. I., Kazak, V.N., Pristash, V.V., 1993. Changes in rocks at high temperatures. *Journal of mining science* 29, 472-477. <https://doi.org/10.1007/BF00733026>
- Dwivedi, R.D., Goel, R.K., Prasad, V.V.R., Sinha, A., 2008. Thermo-mechanical properties of Indian and other granites. *International Journal of Rock mechanics and mining Sciences* 45, 303-315. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2007.05.008>
- Feng, Z.J., Zhao, Y.S., Liu, D.N., 2021. Permeability evolution of thermally cracked granite with different grain sizes. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 54, 1953-1967. <https://doi.org/10.1007/s00603-020-02361-3>
- Fuchs, S., Förster, A., 2010. Rock thermal conductivity of Mesozoic geothermal aquifers in the Northeast German Basin. *Geochemistry* 70, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2010.05.010>
- Glover, P.W., Baud, P., Darot, M., Meredith, P., Boon, S.A., LeRavalec, M., Reuschlé, T., 1995. Alpha/beta phase transition in quartz monitored using acoustic emissions. *Geophysical Journal International* 120, 775-782. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1995.tb01852.x>
- Görgülü, K., Durutürk, Y.S., Demirci, A., Poyraz, B., 2008. Influences of uniaxial stress and moisture content on the thermal conductivity of rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 45, 1439-1445. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2008.02.004>
- Guo, P., Wu, S., Zhang, G., Chu, C., 2021. Effects of thermally-induced cracks on acoustic emission characteristics of granite under tensile conditions. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 144, 104820. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104820>
- Ide, J.M., 1937. The velocity of sound in rocks and glasses as a function of temperature. *The Journal of Geology* 45, 689-716. <https://doi.org/10.1086/624595>
- Hatheway, A.W., 2009. The complete ISRM suggested methods for rock characterization, testing and monitoring; 1974-2006.
- Kang, F., Li, Y., 2021. Grain size heterogeneity controls strengthening to weakening of granite over high-temperature treatment. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 145, 104848. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2021.104848>
- Liu, W., Zhu, X., Lv, Y., Tong, H., 2021. On the mechanism of thermally induced micro-cracking assisted rock cutting in hard formation. *Journal of Petroleum Science and Engineering* 196, 107666. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2020.107666>

- Lu, C., Jackson, I., 1998. Seismic-frequency laboratory measurements of shear mode viscoelasticity in crustal rocks II: thermally stressed quartzite and granite. In *Q of the Earth: Global, Regional, and Laboratory Studies* 441-473. [https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8711-3\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-0348-8711-3_10)
- Meredith, P., Daoud, A., Browning, J., Mitchell, T., 2019. Microstructural controls on thermal crack damage during temperature-cycling experiments on volcanic rocks. In *Geophysical Research Abstracts* 21.
- Mo, C., Zhao, J., Zhang, D., 2022. Real-Time Measurement of Mechanical Behaviour of Granite During Heating–Cooling Cycle: A Mineralogical Perspective. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 55, 4404-4422. <https://doi.org/10.1007/s00603-022-02867-y>
- Qin, Y., Tian, H., Xu, N.X., Chen, Y., 2020. Physical and mechanical properties of granite after high-temperature treatment. *Rock Mechanics and Rock Engineering* 53, 305-322. <https://doi.org/10.1007/s00603-019-01919-0>
- Rathnaweera, T.D., Ranjith, P.G., Gu, X., Perera, M.S.A., Kumari, W.G.P., Wanniarachchi, W.A.M., Li, J.C., 2018. Experimental investigation of thermomechanical behaviour of clay-rich sandstone at extreme temperatures followed by cooling treatments. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences* 107, 208-223. <https://doi.org/10.1016/j.ijrmms.2018.04.048>
- Ray, L., Chopra, N., Hiloidari, S., Naidu, N.N., Kumar, V., 2021. Thermal conductivity of granitoids of varying composition up to 300° C and implications for crustal thermal models. *Geophysical Journal International* 227, 316-332. <https://doi.org/10.1093/gji/ggab191>
- Richter, D., Simmons, G., 1974. Thermal expansion behaviour of igneous rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 11, 403-411. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(74\)91111-5](https://doi.org/10.1016/0148-9062(74)91111-5)
- Sepahi, A.A., Shahbazi, H., Siebel, W., Ranin, A., 2014. Geochronology of plutonic rocks from the Sanandaj-Sirjan zone, Iran and new zircon and titanite U-Th-Pb ages for granitoids from the Marivan pluton. *Geochronometria* 41, 207-215. <https://doi.org/10.2478/s13386-013-0156-z>
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A.A., Shang, C. K., 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, 668-683. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2010.04.014>
- Siegesmund, S., Snethlage, R., 2011. *Stone in architecture: properties, durability*. Springer Science & Business Media. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-14475-2>
- Simmons, G., Cooper, H.W., 1978. Thermal cycling cracks in three igneous rocks. In *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts* 15, 145-148. [https://doi.org/10.1016/0148-9062\(78\)91220-2](https://doi.org/10.1016/0148-9062(78)91220-2)
- Swanson, E., Wilson, J., Broome, S., Sussman, A., 2020. The complicated link between material properties and microfracture density for an underground explosion in granite. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 125(11), e2020JB019894. <https://doi.org/10.1029/2020JB019894>
- Tian, H., Kempka, T., Xu, N.X., Ziegler, M., 2012. Physical properties of sandstones after high temperature treatment. *Rock mechanics and rock engineering* 45, 1113-1117. <https://doi.org/10.1007/s00603-012-0228-z>
- Underwood, E.E. 1973. *Quantitative Stereology for Microstructural Analysis*. In: McCall, J.L., Mueller, W.M. (Eds) *Microstructural Analysis*. Springer, Boston, MA. [https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8693-7\\_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4615-8693-7_3)
- Wilson, J.E., Chester, J.S., Chester, F.M., 2003. Microfracture analysis of fault growth and wear processes, Punchbowl Fault, San Andreas system, California. *Journal of Structural Geology* 25, 1855-1873. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(03\)00036-1](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(03)00036-1)
- Wong, L.N.Y., Zhang, Y., Wu, Z., 2020. Rock strengthening or weakening upon heating in the mild temperature range? *Engineering Geology* 272, 105619. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2020.105619>
- Yang, S.Q., Ranjith, P.G., Jing, H.W., Tian, W.L., Ju, Y., 2017. An experimental investigation on thermal damage and failure mechanical behaviour of granite after exposure to different high temperature treatments. *Geothermics* 65, 180-197. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.09.008>
- Ye, X., Yu, Z., Zhang, Y., Kang, J., Wu, S., Yang, T., Gao, P., 2022. Mineral Composition Impact on the Thermal Conductivity of Granites Based on Geothermal Field Experiments in the Songliao and Gonghe Basins, China. *Minerals* 12, 247. <https://doi.org/10.3390/min12020247>