

Stress and pore pressure analyses using spatial pattern of quartz veins, SE Hamedan

Babak Samani^{1*}

1- Department of Geology, Faculty of Earth Science, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

Keywords: Mohr circle, Pore pressure, Stress ratio, Driving stress ratio, Driving pressure ratio

1-Introduction

The upper crust contains abundant joints and fractures that provide planar paths for fluids movement and mineralization. The role of fractures geometry in hydrocarbon reservoirs for route providing and increasing porosity and permeability are essential. Geometry and orientation of faults, fractures, and veins are mainly related to the relative amounts of principal stresses (σ_1 , σ_2 , σ_3) and fluid pressure (Pf). For example, in oil studies, mining, and economic geology, the geological distribution pattern of joints and veins depends on relative amounts of principal stresses and fluid pressure (Mondal and Mamtani, 2013). The effects of principal stresses and fluid pressure are not restricting on a distinct deformation phase. It means that in many cases, those effects cause to increase in porosity and permeability and even generation of new minerals by reactivation of older fractures and veins (McKeagney et al., 2004). In this paper, the quartz vein of Zaman Abad metamorphic rocks at the southeastern of Hamedan was used for determining the relative amounts of principal stresses and fluid pressure. For this goal, the pole, if quartz veins pattern, has been analyzed using stereographic projection and a constructional solution of Mohr circle.

2- Material and methods

In this paper, we have used the method proposed by Jolly and Sanderson (1997) to analyze the relative state of stress and Pf conditions that led to quartz veins emplacement in the Zaman Abad area (SE Hamedan). The methodology involves using a distribution pattern of poles of veins in the lower hemisphere equal-area projection. The orientations of principal stress axes (σ_1 , σ_2 , σ_3) can be obtained depending upon the type of distribution (clustered or girdle) of the poles. Also, the angle (θ) between veins and principal stresses can be determined. Here θ_1 is the angle between σ_2 and average poles to the range of veins that measured on the $\sigma_2\sigma_3$ plane. θ_2 is the angle between σ_1 and average poles to range of fractures lying on the $\sigma_1\sigma_3$ plane. θ_3 is the angle between σ_1 and the average range of poles to fractures measured on the $\sigma_1\sigma_2$ plane. According to Jolly and Sanderson (1997), a clustered distribution of pole to fractures is related to $Pf < \sigma_2$ condition. However, a girdle distribution results from $Pf > \sigma_2$ when the fluid pressure is higher than σ_2 , fractures and veins developed in the full range of orientations. Conversely, when the fluid pressure is smaller than σ_2 , veins are formed in limited orientations and small ranges. Bear et al. (1994) extended the work to 3D and introduced some equations that describe the state of stress and Pf as below:

$$R' = \frac{P_f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

$$\phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}$$

Here, R' is the driving pressure ratio, and ϕ is the stress ratio. R' describes the magnitude of the fluid pressure relative to the maximum and minimum principal stresses. There are two main principles in the distribution pattern of poles to fractures and veins in the lower hemisphere equal-area projection. 1) clustered distribution of

*Corresponding author: b.samani@scu.ac.ir

DOI: 10.22055/AAG.2020.32995.2104

Received 2020-03-20

Accepted 2020-06-12

poles to veins orientations is obtained when they have similar orientations, implying that only a limited range of veins can form; here, $Pf < \sigma_2$. 2) Girdle distribution of poles to veins is obtained when they have varied orientations, implying that a wide range of veins formed; here, $Pf > \sigma_2$. In a girdle distribution, empty elliptical space can be identified, the center of which defines σ_1 . That helps recognize $\sigma_1\sigma_2$ and $\sigma_1\sigma_3$ planes and the angles θ_2 and θ_3 on the respective two planes. In case of a clustered distribution, an ellipse enclosing the cluster maxima identify σ_3 and helps define the $\sigma_1\sigma_3$ and $\sigma_2\sigma_3$ planes along which the angles θ_1 and θ_2 can be respectively measured.

3- Results and discussion

Zagros Orogen formed by continental collision between Afro-Arabian continent and Iranian microcontinent, in Late Cretaceous to Tertiary time (Berberian and King, 1981). The orogenic belt is the result of closure of Neo-Tethys by consumption of oceanic crust at northeast-dipping subduction below the Iranian microcontinent and subsequent the Late Cretaceous continental collision between the Afro-Arabian continent and Iranian microcontinent (Stocklin, 1968; Ricou, 1971; Takin, 1972; Dewey et al., 1973; Berberian and King, 1981; Alavi, 1994, 2004; Mohajjel and Fergusson, 2000; Blanc et al., 2003; McQuarrie, 2004). The occurrence of polyphase metamorphism cases to form a wide range of metamorphic rocks in the study area. Slate and schist rocks are the most critical regional metamorphic rocks. Some minerals such as garnet, andalusite and silimanite are the evidence of the thermal Zagros Orogen formed by a continental collision between the Afro-Arabian continent and the Iranian microcontinent in Late Cretaceous to Tertiary time (Berberian and King, 1981). The orogenic belt is the result of the closure of Neo-Tethys by consumption of oceanic crust at northeast-dipping subduction below the Iranian microcontinent and subsequent the Late Cretaceous continental collision between the Afro-Arabian continent and Iranian microcontinent (Stocklin, 1968; Ricou, 1971; Takin, 1972; Dewey et al., 1973; Berberian and King, 1981; Alavi, 1994, 2004; Mohajjel and Fergusson, 2000; Blanc et al., 2003; McQuarrie, 2004). The occurrence of polyphase metamorphism cases to form a wide range of metamorphic rocks in the study area. Slate and schist rocks are the most critical regional metamorphic rocks. Some minerals such as garnet, andalusite, and silimanite are evidence of the thermal metamorphism effects. The evolution of the quartz veins is the most significant geological feature in the area. These quartz veins are used as geological markers to determine relative amounts of principal strain and fluid pressure in the area. The lack of mid growth lines in the quartz veins shows the evolution of the quartz veins in high-pressure fluid conditions, and the rose diagram analysis of quartz veins shows the wide ranges of quartz veins orientation. The stereography pole analysis of quartz veins also shows the full range of strike and dip. However, the N-S and NE-SW veins are the most dominant directions. According to the stereography pole patterns of quartz veins, the girdle distribution of quartz poles is visible. In this case, the girdle distribution of quartz veins pole data and empty elliptical space can be identified, the center of which defines σ_1 . According to the pole pattern of the quartz veins, the amounts of θ_2 and θ_3 were determined as $\theta_2 = 15^\circ$ to $\theta_2 = 25^\circ$ and $\theta_3 = 34^\circ$ to $\theta_3 = 72^\circ$. The pole distribution of quartz veins reveals the $Pf > \sigma_2$ condition. Also, the driving pressure ratio and stress ratio were calculated in the range of $R' = 0.82$ to 0.93 and $\phi = 0.77$ to 0.81 , respectively. According to the 3D Mohr diagram solution, the fluid pressure are determined to be between 885.7 and 1044.4, which shows that the fluid pressure is closed to σ_1 stress in the area. These quartz veins are used as geological markers to determine relative amounts of principal strain and fluid pressure in the area. The lack of a central growth line in the quartz veins shows the evolution of the quartz veins in high-pressure fluid conditions. The rose diagram analysis of quartz veins shows the wide ranges of quartz veins orientation. The stereography pole analysis of quartz veins also shows the wide range of strike and dip. However, the N-S and NE-SW veins are the most dominant directions. According to the stereography pole patterns of quartz veins, the girdle distribution of quartz poles is visible. In this case, the girdle distribution of quartz veins pole data and empty elliptical space can be identified, the center of which defines σ_1 . According to the pole pattern of the quartz veins, the amounts of θ_2 and θ_3 were determined as $\theta_2 = 15^\circ$ to $\theta_2 = 25^\circ$ and $\theta_3 = 34^\circ$ to $\theta_3 = 72^\circ$. The pole distribution of quartz veins reveals the $Pf > \sigma_2$ condition. Also, the driving pressure ratio and stress ratio were calculated in the range of $R' = 0.82$ to 0.93 and $\phi = 0.77$ to 0.81 , respectively. According to the 3D Mohr diagram solution, the fluid pressure were determined between 885.7 to 1044.4 that they are closed to σ_1 stress.

4- Conclusion

Analyzing a polar pattern of fractures and veins with the application of Mohr circle construction methods helps us understand the relative amount of principal stresses and fluid pressure. The relative principal stresses state,

particularly the fluid pressure ratio regarding the σ_2 , has an essential role in developing and distributing veins pattern. This research shows the evolution of the quartz veins in the high fluid pressure, and almost near to the amounts of σ_1 stress. This high fluid pressure is probably the most crucial factor for generating some minerals, such as silimanite in metamorphic rocks. It can state that the intrusion of Alvand Batholith is the primary evidence for high amounts of fluid pressure in the study area. The amount of stress ratio reveals that the 3D shape of the stress ellipsoid is three axial oblate shapes.

References

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1-20.
- Bear, G., Beyth, M., Reches, Z., 1994. Dike emplaced into fractured basement, Timna Igneous Complex, Israel. *Journal of Geophysics Researches* 99, 24039-24051.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Blanc, E.J.P., Allen, M.B., Inger, S., Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros Simple Folded Zone, Iran. *Journal of the Geological Society of London* 160, 401-412.
- Dewey, J.F., Pitman III, W.C., Ryan, W.B.F., Bonnin, J., 1973. Plate tectonics and the evolution of the Alpine System. *Bulletin of Geological Society of America* 84, 3137-3180.
- Jolly, R.J.H., Sanderson, D.J., 1997. A Mohr circle reconstruction for the opening of a pre-existing fracture. *Journal of Structural Geology* 19, 887-892.
- McKeagney, C.J., Boulter, C.A., Jolly, R.J.H., Foster, R.P., 2004. 3D Mohr Circle analysis of vein opening, Indrama lode-gold deposit, Zimbabwe: implication for exploration. *Journal of Structural Geology* 26, 1275-1291.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 519-535.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22, 1125-1139.
- Mondal TK, Mamtani MA., 2013. 3D Mohr circle construction using vein orientation data from Gadag (southern India). *Journal of Structural Geology* 56, 45-56.
- Ricou, L.E., 1971. Le croissant ophiolitique pe'ri-arabe. Une ceinture de nappes mises en place au Cre'tace' supe'rieur. *Revue de Ge'ographie Physique et de Ge'ologie Dynamique* XIII, 327-350 (Paris).
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *Bulletin of American Association of Petroleum Geology* 52, 1229-1258.
- Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature* 235, 147-150.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:

Samani, B., 2021. Stress and pore pressure analyses using spatial pattern of quartz veins, SE Hamedan. *Adv. Appl. Geol.* 11(2), 238-249.

DOI: 10.22055/AAG.2020.32995.2104

url: https://aag.scu.ac.ir/article_15868.html?lang=en

تحلیل تنش و فشار منفذی با استفاده از الگوی مکانی رگه‌های کوارتز، جنوب شرق همدان

بابک سامانی*

گروه زمین شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۳/۲۳ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۱۰/۰۹

*b.samani@scu.ac.ir

چکیده

در این تحقیق با استفاده از الگوی پراکندگی رگه‌های کوارتزی در واحدهای سنگی زمان آباد واقع در جنوب شرق همدان و با بکارگیری تحلیل‌های استریوگرافی و ترسیم دایره مور سه بعدی به بررسی مقادیر نسبی تنش‌های اصلی ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) و فشار منفذی (P_f) پرداخته شده است. توزیع قطب رگه‌های کوارتزی در شبکه هم مساحت نشان‌دهنده محدوده وسیعی از جهت‌یابی‌ها بوده و حاکی از یک الگوی پراکنش وسیع در آنها می‌باشند. ترسیم نمودار مور سه بعدی برای رگه‌های کوارتزی نشان دهنده شرایط $P_f > \sigma_2$ و مقادیر بالای فشار منفذی $P_f = 885.7$ تا $P_f = 1044.4$ و نزدیک به تنش اصلی حداکثر (σ_1) می‌باشد. نسبت فشار محرک (R') و نسبت تنش (\emptyset) برای رگه‌های کوارتزی به ترتیب در محدوده $R' = 0.82$ تا $R' = 0.93$ و $\emptyset = 0.77$ تا $\emptyset = 0.81$ محاسبه گردید. نتایج نشان می‌دهد که شکل‌گیری و توسعه رگه‌های کوارتزی در ارتباط با عملکرد آخرین فازهای تنش حاصل از جایگیری توده باتولیت الوند می‌باشد. همچنین نتایج نشان می‌دهد که توسعه رگه‌های کوارتزی در شرایط استرین سه بعدی فشرده شده (Oblate) بوقوع پیوسته است.

کلمات کلیدی: دایره مور، فشار منفذی، نسبت تنش، نسبت تنش محرک، نسبت فشار محرک

مقدمه

آزمایش‌های بکار گرفته شده جهت دستیابی به مقادیر کمی پارامترهای فوق بسیار پرهزینه و زمان‌بر می‌باشد. بعلاوه اکثر روشهای دستگاهی، قادر به اندازه‌گیری مقادیر تنش و واتنش در شرایط کنونی پوسته زمین و زمان حال بوده و معمولاً در ارزیابی مقادیر دیرینه این پارامترها راهگشا نمی‌باشند. تاکنون روشهای مختلفی برای اندازه‌گیری نسبی مقادیر تنش دیرینه (Paleo-stress) و واتنش دیرینه (Paleo-strain) با استفاده از عناصر زمین شناسی و ساختاری توسط محققین مختلف ارائه شده است. به عنوان مثال روش وارون‌سازی (Inversion method) داده‌های مربوط به گسل‌ها و خش لغزهای گسلی یکی از روش‌های متداول در تحلیل مقادیر نسبی و جهت‌یابی تنش‌های دیرینه می‌باشد (Angelier, 1984). روشهای دیگر همچون استفاده از داده‌های C-axis کانی‌های کوارتز و کلسیت نیز در تحلیل مقادیر تنش دیرینه بوسیله محققین مختلف ارائه و مورد استفاده قرار گرفته است (Law, 1990; Kruhl, 1998; Law et al., 2004). همچنین روشهایی همچون روش فری، روش مرکز به مرکز و روش R_f/\emptyset برخی از مهمترین روشهای ارائه شده جهت اندازه‌گیری مقادیر نسبی واتنش می‌باشند (Dunet, 1969; Fry, 1979; Ramsay and Huber, 1983). در این پژوهش با استفاده از تصویر قطب رگه‌های کوارتزی و بکارگیری روشهای ترسیمی در حل دایره مور به تحلیل مقادیر نسبی تنش‌های اصلی

پوسته زمین حاوی شکستگی‌های فراوانی است که بسیاری از سیالات غنی از عناصر فلزی و غیر فلزی با نفوذ در بین آنها باعث کانه‌زایی می‌شوند. همچنین نقش و هندسه شکستگی‌ها در مخازن هیدروکربنی بواسطه مسیرهای بالاقوه در حرکت سیال و افزایش تراوایی بسیار با اهمیت می‌باشد. اما این موضوع با جهت‌یابی و مقدار نسبی تنشهای اصلی و میزان فشار منفذی حاصل از سیالها در ارتباط تنگاتنگ می‌باشد. بعنوان مثال در مفهوم معدن و زمین‌شناسی اقتصادی مقادیر نسبی تنشهای اصلی نسبت به فشار منفذی در چگونگی توزیع مکانی رگه‌ها و شکستگی‌های کانسار ساز نقشی اساسی ایفا می‌کند. همچنین در حوضه مطالعات نفتی، در بسیاری از مخازن هیدروکربنی مسیرهای مهاجرت سیال تحت تاثیر نسبت مقادیر تنش اصلی و فشار منفذی قرار می‌گیرد (Mondal and Mamtani, 2013). نقش تنشهای اصلی و فشار منفذی منحصر به شکستگی‌ها و درزه‌ها در یک فاز دگرشکلی معین نمی‌باشد. مفهوم این جمله این است که در برخی شرایط تنشهای اصلی و فشارهای منفذی می‌توانند باعث فعالیت مجدد شکستگیهای قدیمی و توسعه کانی‌سازی و یا افزایش تراوایی در راستای شکستگی‌ها و رگچه‌های قدیمی‌تر شوند (McKeagney et al., 2004). در مباحث زمین‌شناسی، اندازه‌گیری مقادیر مطلق برخی پارامترها همچون تنش و واتنش با استفاده از ابزارآلات مهندسی و گران قیمت صورت می‌پذیرد. در اکثر مواقع

Delaney و همکاران (۱۹۸۶) حاصل گردیده است. Delaney و همکاران (۱۹۸۶) معادلات زیر را جهت توضیح توسعه و بازشدگی شکستگی‌ها تحت شرایط $P_f > \sigma_n$ بصورت زیر ارائه نموده اند:

$$p_f \geq \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} + \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \cos 2\theta \quad (\text{رابطه ۱})$$

$$R = \frac{p_f - \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2}}{\frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2}} = \frac{p_f - \sigma_m}{\tau_{\max}} \geq \cos 2\theta \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن R نسبت تنش محرک، σ_{\max} و σ_{\min} تنشهای اصلی حداکثر و حداقل، τ_{\max} تنش برشی حداکثر و σ_m تنش میانگین می باشد. θ نشان دهنده زاویه بین عمود بر صفحه شکستگی و تنش اصلی حداکثر می باشد که نشان دهنده محدوده‌ای از جهت یابی شکستگی‌ها یا رگه‌ها است که می تواند تحت شرایط P_f دچار بازشدگی یا فعالیت مجدد شوند. در شرایط سه بعدی جهت نشان دادن وضعیت تنش و فشار منفذی معادلات فوق بصورت زیر تغییر می یابند (Baer et al., 1994).

$$R' = \frac{p_f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{رابطه ۳})$$

$$\phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad (\text{رابطه ۴})$$

که در آن R' نسبت فشار محرک و بیان کننده مقدار فشار منفذی نسبت به تنش های اصلی حداکثر و حداقل بوده و ϕ نسبت تنش می باشد که نشان دهنده نوع شکل بیضوی تنش است. شکستگی‌ها و رگه‌ها تنها می توانند در شرایط $R' > 0$ تشکیل یا دچار فعالیت مجدد شوند. اگر $P_f = \sigma_3$ باشد، $R' = 0$ خواهد شد و در این حالت هیچ شکستگی یا رگه‌ای تشکیل نمی شود و یا شکستگی‌های پیشین دچار فعالیت مجدد نخواهند شد. اگر $P_f = \sigma_1$ باشد، $R' = 1$ خواهد شد و نشان می دهد که شکستگی‌ها در جهات زیادی شکل خواهند گرفت و یا شکستگی‌های پیشین با جهت یافتگی‌های مختلف دچار تجدید فعالیت خواهند شد. در الگوی پراکندگی قطب شکستگی‌ها دو اصل وجود دارد: (۱) توزیع محدود قطب شکستگی‌ها نشان دهنده جهت یابی نسبتاً مشابه آنها بوده و نشان می دهد که شکستگی‌ها با محدوده جهت یابی محدودی شکل خواهند گرفت و یا شکستگی‌های پیشین با جهت یابی‌های اندک و محدودی تحت تأثیر فازهای سیال قرار خواهند گرفت. در این حالت تنش σ_2 بزرگتر از فشار منفذی می باشد ($P_f < \sigma_2$). (۲) درحالی که $P_f > \sigma_2$ باشد توزیع قطب شکستگی‌ها دارای الگوی پراکنده بوده و نشان می دهد که شکستگی‌ها با دامنه وسیعی از جهت یافتگی تشکیل می شوند و یا دامنه

و فشار منفذی که مهمترین کنترل کننده‌ها در توسعه، بازشدگی و نفوذ سیالات هستند پرداخته شده است. روش فوق اولین بار توسط Delaney و همکاران (۱۹۸۶) در تحلیل های دو بعدی ارائه گردید و سپس توسط سایر محققین در تحلیل های سه بعدی مورد استفاده قرار گرفت (Jouly and Sanderson, 1997; McKeagney et al., 2004). بمنظور تعیین مقادیر نسبی تنش های اصلی و فشار منفذی، رگه‌های کوارتزی در منطقه زمان آباد واقع در جنوب شرق همدان مورد بررسی قرار گرفته است.

روش کار

روش پیشنهادی Jouly و Sanderson (۱۹۹۷) جهت تحلیل شرایط نسبی تنش های اصلی و مقدار فشار منفذی مورد استفاده قرار گرفته است. این روش شامل استفاده از تصویر قطب رگه‌ها و شکستگی‌ها در شبکه هم مساحت و بکارگیری روشهای ترسیمی حل دایره مور می باشد. در این روش بر اساس الگوی توزیع قطب شکستگی‌ها (پراکنده یا متمرکز) جهت یابی محورهای اصلی تنش ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$) تعیین می شود. همچنین زوایای θ بین شکستگی‌ها و رگه‌ها و راستای تنش های اصلی تعیین می شود. θ_1 زاویه بین σ_2 و σ_3 و θ_2 زاویه بین σ_1 و σ_3 و θ_3 زاویه بین σ_1 و σ_2 اندازه گیری می شود. θ_2 زاویه بین σ_1 و σ_3 و θ_3 زاویه بین σ_1 و σ_2 اندازه گیری می شود. بر اساس Jouly و Sanderson (۱۹۹۷) توزیع پراکنده قطب مجموعه شکستگی‌ها در شرایطی حاصل می شود که فشار منفذی بزرگتر از تنش میانگین باشد ($P_f > \sigma_2$). در صورتیکه فشار منفذی کمتر از تنش میانگین باشد ($P_f < \sigma_2$) قطب مجموعه شکستگی‌ها جهت یابی محدودی را نشان خواهد داد. در حالت اول به دلیل بزرگتر بودن فشار منفذی نسبت به تنش σ_2 ، شکستگی‌ها در محدوده وسیعی از جهات توسعه می یابند و مجموعه وسیعی از شکستگی‌های پیشین و قدیمی، مستعد تجدید فعالیت شده و از دیدگاه معدن و زمین شناسی اقتصادی، امکان توسعه کانسارهای مرتبط با فشار منفذی، در محدوده وسیعی از جهات بوقوع می پیوندد. از این رو در چنین شرایطی می توان عملیات اکتشاف را در محدوده وسیعی از جهات مورد ارزیابی قرار داد. در حالت دوم به دلیل کوچکتر بودن فشار منفذی نسبت به تنش σ_2 شکستگی‌ها تنها در محدوده جهت-یابی محدودی تشکیل شده و در ارتباط با شکستگی‌های مستعد جهت نفوذ سیالات کانی ساز، کانسارزایی در محدوده جهت یابی محدودی بوقوع خواهد پیوست و بنابراین تنها جهت های خاصی وجود دارد که پتانسیل زایش عناصر معدنی باید مورد توجه قرار گیرد. روش ارائه شده توسط McKeagney و همکاران (۲۰۰۴) و نیز Jouly و Sanderson (۱۹۹۷) در تحلیل سه بعدی ترسیمی دایره مور بمنظور ارزیابی مقادیر نسبی تنش های اصلی و فشار منفذی، در نتیجه تغییر و اصلاحات صورت گرفته در مطالعات دو بعدی

قابلیت فعالیت مجدد خواهند یافت و نفوذ سیال در حجم وسیعی از شکستگی‌ها رخ می‌دهد.

جایگاه زمین‌شناسی

کمرند چین‌خورده زاگرس جزیی از کمرند کوهزایی آلپ-همالیای به شمار می‌آید (Berberian and King, 1981, Allen et al., 2004). فعالیت‌های تکتونیکی در این ناحیه قابل دسترس‌ترین شواهد را راجع به رفتار قاره‌ها در زمان برخورد فراهم می‌سازد. اگر چه در این کمرند، برخورد قاره‌ها قبلاً صورت گرفته است، اما همگرایی و نزدیک شدن قاره‌ها هنوز هم ادامه دارد، به نحوی که نرخ این همگرایی در گستره‌ای از حدود ۱ سانتیمتر در سال در غرب و تا حدود ۵ سانتیمتر در سال در شرق تغییر می‌کند (Tunini et al, 2015). با توجه به این که پوسته‌های اقیانوسی قدیمی‌تر از ۲۰۰ میلیون سال قبل (ژوراسیک تحتانی) در اثر فرورانش از بین رفته‌اند، کمرندهای کوهزایی مهم‌ترین منبع اطلاعاتی ما راجع به نحوه عملکرد فعالیت‌های تکتونیک صفحه‌ای در تاریخ عمر زمین می‌باشند. مطالعه و بررسی نقشه‌ها و مقاطع عرضی کمرندهای کوهزایی گوناگون نشان می‌دهد که هیچ یک از آنها را نمی‌توان به تنهایی به عنوان یک مدل جهانی برای یک کمرند کوهزایی شاخص ارائه نمود. علیرغم این که مقطع عرضی این کمرندها از یکدیگر متفاوت است یک سری از خصوصیات آنها مشترک می‌باشد. تکامل ساختاری و تکتونیکی کمرند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی: الف) فرورانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس به زیر پوسته قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، ب) جایگیری، نفوذ و فرارانش پوسته اقیانوسی نئوتتیس درون و بر روی صفحه آفرو-عربی و توسعه افیولیت‌های زاگرس در اواخر کرتاسه، ج) برخورد قاره‌ای-قاره‌ای صفحه آفرو-عربی با صفحه ایران در اواخر کرتاسه به بعد صورت گرفته است (Alavi, 1994, 2004). این کمرند کوهزایی ۸ تا ۱۴ کیلومتر ضخامت دارد و شامل نهشته‌های کامبرین تا عهد حاضر می‌باشد (McQuarrie, 2004; Yang et al, 2018). کمرند کوهزایی زاگرس در راستای شمال شرق به جنوب غرب شامل سه بخش اصلی: ۱) کمرند ماگمایی ارومیه- دختر، ۲) کمرند دگرگونی سندانج-سیرجان و ۳) کمرند چین و تراست خورده زاگرس با راستاهای شمال غرب - جنوب شرق می‌باشد. سنگ‌های کمرند دگرگونی سندانج - سیرجان چندین فاز دگرشکلی را در خود ثبت کرده‌اند که آخرین فاز دگرشکلی نشان دهنده فرآیند برخورد قاره‌ای بین صفحات عربستان و ایران می‌باشد (Mohajjel and Fergusson, 2000; Mc Quarie, 2004)

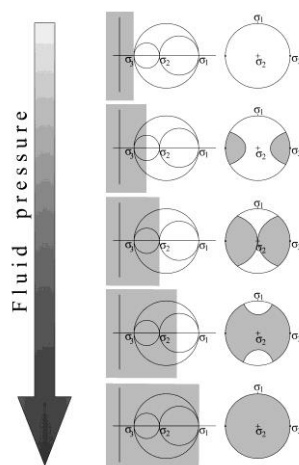
وسیی از شکستگی‌های پیشین تحت تاثیر عملکرد فاز سیال قرار خواهند گرفت. بر این اساس در تحلیل استریوگرافی در حالتی که قطب شکستگی‌ها دارای توزیع پراکنده باشد یک فضای خالی بیضی شکل قابل تشخیص خواهد بود که مرکز آن نشان دهنده موقعیت σ_1 می‌باشد. این الگوی قطب شکستگی‌ها به یافتن موقعیت صفحات اصلی $\sigma_1\sigma_2$ ، $\sigma_1\sigma_3$ و زوایای θ_2 و θ_3 بر روی صفحات مذکور کمک خواهد نمود. در حالت توزیع قطب شکستگی‌ها با الگوی محدود مرکز بیضی پوشش دهنده قطب شکستگی‌ها موقعیت σ_3 را ارائه می‌دهد و براساس آن می‌توان موقعیت صفحات اصلی تنش ($\sigma_1\sigma_3$ و $\sigma_2\sigma_3$) و مقادیر زوایای θ_1 و θ_2 را بر روی آنها تعیین نمود. با مشخص شدن مقادیر زوایای θ امکان ترسیم دایره مور و تعیین مقادیر نسبی تنش‌های اصلی و فشار منفذی امکان پذیر خواهد بود (Jouly and Sanderson, 1997; Bear et al., 1994). همچنین براساس معادلات ارائه شده توسط McKeageny و همکاران (۲۰۰۴) مقادیر نسبت فشار محرک (R') و نسبت تنش (\emptyset) بصورت زیر قابل محاسبه خواهد بود:

$$\phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1 + \cos 2\theta_2}{1 + \cos 2\theta_1} \quad (\text{رابطه ۵})$$

$$\phi = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = 1 - \frac{1 - \cos 2\theta_2}{1 - \cos 2\theta_3} \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$R' = \frac{P_f - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} = \frac{1 + \cos 2\theta_2}{2} \quad (\text{رابطه ۷})$$

معادلات ۶ و ۷ جهت تعیین مقادیر نسبت تنش (\emptyset) بترتیب در حالت توزیع محدود قطب داده‌های شکستگی ($P_f < \sigma_2$) و توزیع پراکنده قطب شکستگی‌ها ($P_f > \sigma_2$) مورد استفاده قرار می‌گیرد. شکل ۱ محدوده‌ای از جهت‌یابی‌های مختلف شکستگی‌ها که با افزایش فشار منفذی امکان شکل‌گیری و یا فعالیت مجدد شکستگی‌های پیشین را خواهند داشت نشان می‌دهد. در فشار منفذی پائین (فشار منفذی نزدیک به σ_3) یک توزیع محدود از قطب شکستگی‌ها و رگه‌ها بوجود می‌آید. در فشار منفذی بالاتر (فشار منفذی نزدیک به σ_2) قطب سطوح شکستگی نشان دهنده توزیع تقریباً پراکنده می‌باشد. هنگامی که فشار منفذی برابر با تنش اصلی حداکثر (σ_1) شود شکستگی‌ها با تمام جهات قادر به تشکیل می‌باشند و یا شکستگی‌های پیشین با تمام جهت‌گیرها



شکل ۱- تغییرات فشار منفذی (افزایش تدریجی فشار منفذی) و تغییر در الگوی پراکندگی قطب شکستگی‌ها و رگه‌ها (از الگوی محدود به الگوی پراکنده). بخشهای تیره در تحلیل‌های استریوگرافی، الگوی توزیع قطب رگه‌ها را نشان می‌دهد (Jolly and Sanderson, 1997).

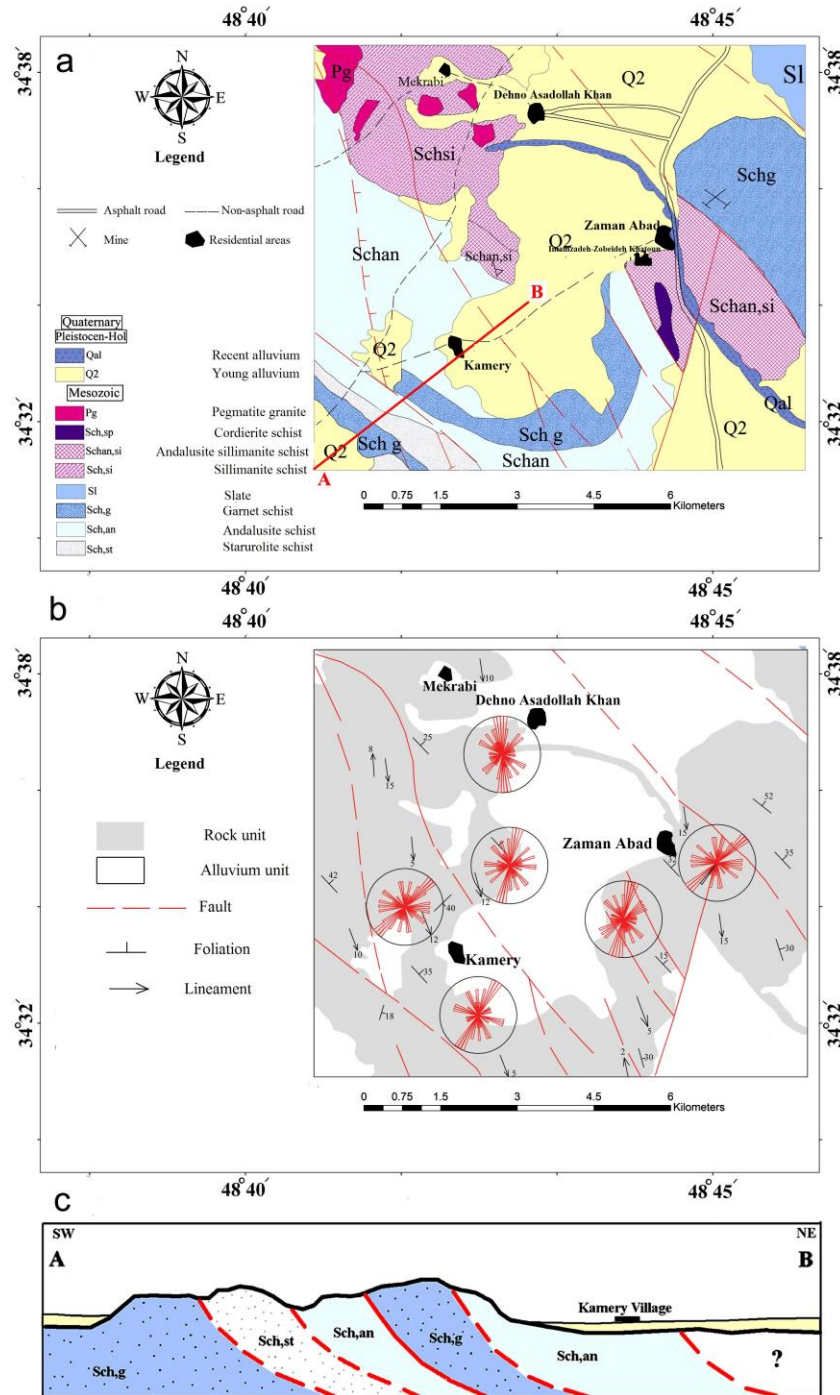
Fig.1. Changes of fluid pressure (gradual increase of fluid pressure) and change in spatial pattern of poles of joints and veins (from concentrate to scattered). The dark parts show the pole pattern of the veins (Jolly and Sanderson, 1997).

(Taghizadeh, 2017). (۳) آندالوزیت شیست‌ها (Sch_{an})، این واحدهای سنگی در مناطق جنوبی و غربی منطقه و حوالی روستای کمری دچار بیرون زدگی شده‌اند. وجود شیستوزینه کامل مشخص و کانیهای درشت آندالوزیت از ویژگیهای بارز این سنگها می‌باشد. جهت‌یافتگی محور طویل کانیهای آندالوزیت یک خطوارگی مشخص در این سنگها ایجاد کرده است. (۴) سیلیمانیت-آندالوزیت شیست‌ها (Sch_{an,si})، این واحدهای سنگی در بخش‌های شرقی و شمال غربی منطقه و حوالی روستاهای مکرپی، دهنو اسداله خان و زمان آباد دارای رخنمون می‌باشند. این واحدهای سنگی بخشی از مجموعه دگرگونی زمان آباد - منگاو می‌باشند (Ezadykiyan et al., 2009). رشد کانیهای طویل و خیارلی شکل آندالوزیت و کانی‌های سوزنی شکل سیلیمانیت بر روی سطوح شیست‌ها از مهمترین ویژگی‌های این مجموعه سنگی می‌باشد. یکی از سیماهای بارز در این منطقه تراکم بالای رگه‌های کوارتزی می‌باشد. بر اساس نقشه زمین شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان، تهیه شده توسط سازمان زمین-شناسی کشور اکثر واحدهای سنگی در این محدوده متعلق به مزوزوئیک می‌باشند و توده باتولیت الوند در فاصله ۱۰ کیلومتری از محدوده مطالعاتی مهمترین توده نفوذی در غرب و شمال غرب منطقه می‌باشد. کمپلکس آذرین الوند یکی از مهمترین توده‌های آذرین در بخش شمالی سنندج - سیرجان محسوب می‌شود. این کمپلکس عمدتاً از سنگ‌های گرانیتوئیدی به همراه مقداری سنگ-های حد واسط و مافیک ساخته شده است که در طی فرورانش ورقه اقیانوسی نئوتتیس به زیر پوسته ایران در طی تریاس پایانی تا کرتاسه آغازین شکل گرفته است (Shahbazi et al., 2010; Yang et al., 2018). بیشتر گرانیت‌های کمپلکس الوند از نوع S می‌باشند که با مقداری گرانیت نوع I و A همراهی می‌شوند

این کمربند دگرگونی دارای پهنایی در حدود ۱۵۰ تا ۲۰۰ کیلومتر و درازایی در حدود ۱۵۰۰ کیلومتر می‌باشد که از منطقه سنندج در شمال غرب تا منطقه سیرجان در جنوب شرق کشیده شده است (Alavi, 2004). منطقه مورد مطالعه در ۴۰ کیلومتری جنوب شرق همدان و حوالی روستای زمان آباد قرار گرفته است. سنگهای دگرگون و دگرشکل شده این منطقه بخشی از سنگهای کمربند دگرگونی سنندج - سیرجان می‌باشند. واحدهای سنگی منطقه عمدتاً سنگهای اسلیتی و شیستی بوده که شامل کانیهای آندالوزیت، سیلیمانیت، گارنت، مسکوویت و بیوتیت می‌باشند. تفکیک واحدهای سنگ چینه‌ای در منطقه ساده نبوده و در بیشتر موارد ارتباط آنها بصورت کمپلکس و پیچیده می‌باشد. در بسیاری موارد مرز بین واحدهای سنگی بصورت گسلی بوده و به دلیل فراوانی واحدهای اسلیتی و شیستی ردیابی گسل‌ها در مطالعات صحرایی دشوار می‌باشد. با این وجود چند روند گسلی در نقشه زمین شناسی ارائه شده توسط سازمان زمین‌شناسی کشور مشخص شده است. مهمترین واحدهای سنگی قابل مشاهده در منطقه مورد مطالعه عبارتند از: (۱) گارنت شیست‌ها (Sch_g)، بیرون‌زدگی این سنگها بیشتر در بخش-های جنوب غربی و شمال شرقی منطقه قابل مشاهده می‌باشد. وجود پورفایروبلاستهای گرونا و عدم وجود سیلیکات‌های آلومنیوم‌دار از ویژگیهای بارز این واحدهای سنگی می‌باشد. بررسی‌های میکروسکوپی نشان داده است که تبلور کانیهای گارنت در ارتباط با دو فاز پیش از شیستوزیته و پس از شیستوزیته می‌باشد (Taghizadeh, 2017). (۲) استارولیت شیست‌ها (Sch_{st})، این واحدهای سنگی در بخش‌های جنوب غربی منطقه دارای رخنمون می‌باشند. رشد کانی استارولیت عموماً بعد از تشکیل شیستوزیته بوده و سیمایی لکه‌ای در این واحد سنگی ایجاد کرده است

متفاوت بوده است (Yang et al., 2018). شکل a2 نقشه زمین شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. همچنین شکل b2 و c2 به ترتیب نقشه ساختاری و نیمرخ زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهند.

(Aliani et al., 2012). سنگ‌های حدواسط و مافیک نیز به ترتیب شامل کوارتز دیوریت و انواع مختلف گابرو می‌باشند (Shahbazi et al., 2010). مطالعات اخیر آشکار ساخته‌اند که تزریق بخش‌های مختلف این توده در طی حدود ۷۰ میلیون سال به وقوع پیوسته و در هر مرحله ترکیب ماگماها و تا حدی منشاء آنها



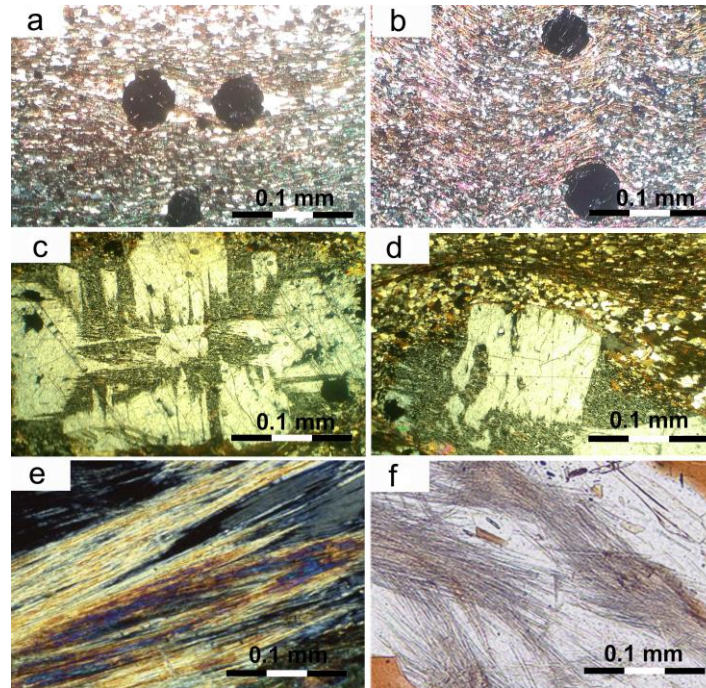
شکل ۲- (a) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه، (b) نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه به همراه نمودار گل سرخی پراکندگی رگه‌های کوارتزی در شش محدوده متفاوت و (c) نیمرخ زمین‌شناسی شماتیک از توالی واحدهای سنگی (برگرفته از نقشه زمین‌شناسی ۱/۱۰۰۰۰۰ همدان، سازمان زمین‌شناسی کشور).

Fig. 2. (a) Geological map of the study area, (b) structural map of the study area with the rose diagram of quartz veins in the six different positions, and (c) schematic geological cross section from rock units (taken from 1:100000 geological map of Hamedan, Geological Survey of Iran).

بحث

وقوع رخدادهای چند دگرگونی باعث شکل‌گیری تنوعی از سنگهای دگرگونی ناحیه‌ای و مجاورتی در منطقه مورد مطالعه گشته است (Shahbazi et al., 2010; Yang et al., 2018). اسلیت‌ها و شیست‌ها از مهمترین واحدهای سنگی دگرگونی مجاورتی در منطقه می‌باشند. شیست‌ها عموماً با آثاری از دگرگونی مجاورتی همراه بوده که بوسیله رشد کانی‌هایی همچون کوردیریت، گارنت، آندالوزیت و سیلیمانیت در بسیاری از نقاط قابل مشاهده می‌باشند (شکل ۳). همان گونه که ذکر گردید توسعه فراوان رگه‌های کوارتزی یکی از سیماهای مهم ساختاری در این منطقه می‌باشد (شکل ۴). توسعه رگه‌های کوارتزی با روندهای مختلف در واحدهای دگرگونی مهمترین ابزار جهت بررسی ماهیت نسبی تنش و فشار منفذی در مناطق مختلف می‌باشد (Akawy, 2007; Nüchter and Stöckhert, 2008; Wilson et al., 2008; Otsubo et al., 2016). در شکل b۲ نمودارهای گل سرخی مربوط به امتداد رگه-

های کوارتزی در شش محدوده از منطقه نشان داده شده است. همان گونه که مشخص است رگه‌های کوارتزی دارای محدوده وسیعی از پراکندگی فضایی بوده اما بطور نسبی رگه‌هایی با امتداد شمالی-جنوبی تا شمال شرقی- جنوب غربی دارای غلبه بیشتری نسبت به سایر راستاها می‌باشند. ارتباط ساختاری معناداری بین پراکندگی هندسی رگه‌های کوارتزی و سطوح غالب شیستوزیته در منطقه مشاهده نمی‌شود. به گونه‌ای که رگه‌های کوارتزی در راستاهای متفاوت سطوح شیستوزیته را قطع می‌کنند. عدم وجود خط رشد میانی در رگه‌های کوارتزی حاکی از آن است که شکل‌گیری آنها در ارتباط با فرآیندهای ثانویه و بخصوص محلول‌های ثانویه و تحت شرایط فشار منفذی پایین نمی‌باشد (Passchier and Trouw, 2006). از این رو در این پژوهش سعی گردیده است تا با استفاده از الگوی پراکندگی فضایی رگه‌های کوارتزی و به کارگیری تحلیل‌های دایره مور مقادیر نسبی تنش‌های اصلی و فشار منفذی بصورت کمی مورد ارزیابی قرار گیرد.



شکل ۳- مقاطع میکروسکوپی از مهمترین واحدهای سنگی شیستی؛ (a-b) گارنت شیست، (c-d) آندالوزیت شیست و (e-f) سیلیمانیت شیست.

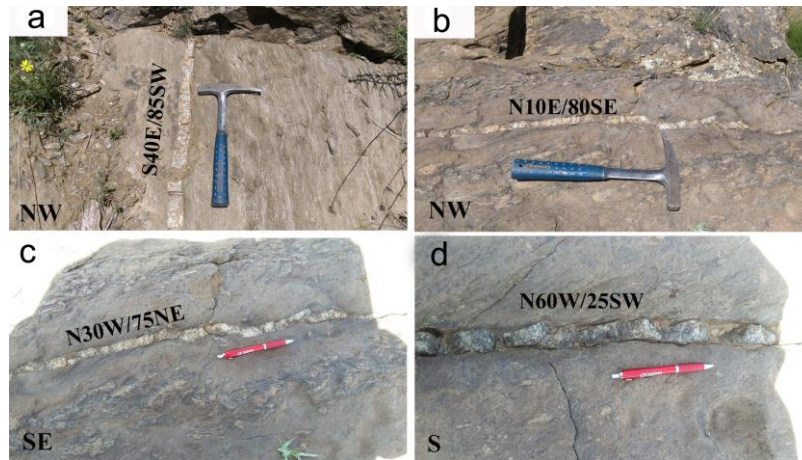
Fig. 3. Microscopic view of the most important of the schists rocks; (a-b) garnet schist, (c-d) andalusite schist, and (e-f) silimanite schist.

باشد که در شناخت جهت یابی محورهای σ_1 , σ_2 , σ_3 و زوایای θ_2 و θ_3 کمک خواهد نمود (شکل ۵). براساس الگوی توزیع قطب رگه-های کوارتزی مقادیر زوایای θ_2 و θ_3 در محدوده‌ای بین $(\theta_2 = 15^\circ)$ تا $(\theta_2 = 25^\circ)$ و $(\theta_3 = 34^\circ)$ تا $(\theta_3 = 72^\circ)$ اندازه‌گیری شد. توزیع پراکنده قطب رگه‌های کوارتزی نشان دهنده شرایط $P_f > \sigma_2$ می‌باشد. همچنین براساس معادله های ۵ و ۷ مقدار فشار محرک و نسبت تنش بترتیب در محدوده‌ای بین $R' = 0.82$ تا $R' = 0.93$

به‌منظور برآورد نسبت تنش‌های اصلی و میزان فشار منفذی مؤثر در جایگیری و توسعه رگه‌های کوارتزی در منطقه مورد مطالعه مشخصات آنها برداشت گردید و بوسیله نرم افزار T-tecto مورد تحلیل قرار گرفت. توزیع قطب رگه‌های کوارتزی بطور غالب نشان دهنده یک الگوی پراکنده بوده و محدوده وسیعی از جهت‌یابی رگه-های کوارتزی را نشان می‌دهد (شکل ۵). در الگوی پراکنده قطب رگه‌های کوارتزی یک فضای خالی بیضی شکل قابل تشخیص می-

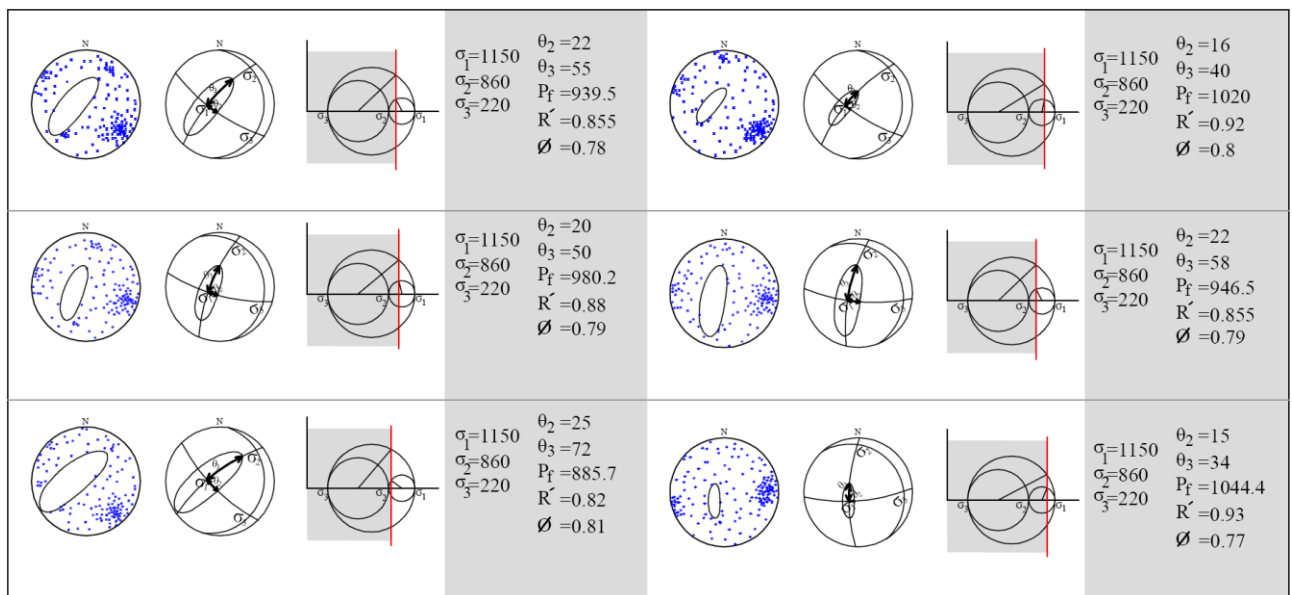
منفذی در محدوده $P_f = 885.7$ تا $P_f = 1044.4$ نزدیک به تنش اصلی σ_1 (1150) می‌باشد.

ترسیم سه بعدی داده‌ها بوده که بیان کننده مقدار بالای فشار $\varnothing = 0.77$ تا $\varnothing = 0.81$ محاسبه گردید. شکل (۵) نشان دهنده



شکل ۴- (a-d) توسعه رگه‌های کوارتزی با جهت‌یابی‌های متفاوت در واحدهای سنگی آندالوزیت شیستی در محدوده مورد مطالعه. جهت دید عکس‌ها در آنها ذکر شده است.

Fig. 4. (a-d) Evolution of quartz veins with different orientations in the andalusite schist rocks of the study area. The view directions have been shown in photographs.



شکل ۵- استریوگرام قطب پراکندگی رگه‌های کوارتزی، تعیین راستای تنش‌های اصلی و زوایای θ_2 و θ_3 ، تحلیل سه بعدی نمودار مور و تعیین مقادیر نسبی تنش‌های اصلی، فشار منفذی، فشار محرک و نسبت تنش در شش محدوده از منطقه مورد مطالعه.

Fig. 5. The stereographic projection of pole of quartz veins, determination the orientation of principal stresses and θ_2 and θ_3 angles, 3D analysis of Mohr diagram and determination of relative value of principal stresses, fluid pressure, driving pressure and stress ratio in the six different parts of the study area.

مقادیر نسبی تنش‌های اصلی و مقدار فشار منفذی می‌نماید. با توجه به اهمیت نسبت تنش‌های اصلی و بطور ویژه‌ای نسبت فشار منفذی به تنش σ_2 در توسعه و نحوه توزیع بسیاری از کانسارهای رگه‌ای، استفاده از روش‌های موجود، بخصوص در مبانی زمین‌شناسی اقتصادی

نتیجه‌گیری

الگوی حاصل از داده‌های مربوط به قطب رگه‌های کوارتزی و بکارگیری روش‌های ترسیمی در حل دایره مور کمک شایانی در فهم

بالای مرتبط با این توده عظیم را بتوان مهمترین عامل در فشار منفذی بالای موجود در منطقه دانست. از آنجا که دامنه تغییرات نسبت تنش بین صفر و یک بوده ($0 \leq \emptyset \leq 1$) و مقدار $\emptyset = 0$ نشان دهنده شرایط بیضوی تنش کشیده (Prolate) و $\emptyset = 1$ نشان دهنده شرایط بیضوی تنش فشرده یا پخ (Oblate) می‌باشد در خصوص رگه‌های کوارتزی با $\emptyset = 0.77$ تا $\emptyset = 0.81$ می‌توان چنین استنباط کرد که ماهیت بیضوی تنش در زمان تشکیل رگه‌های کوارتزی نشان دهنده شرایط بیضوی تنش فشرده سه محوری (Three axial oblate shape) بوده است.

قدردانی

بدین وسیله از حمایت‌های صورت گرفته توسط معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.SG99.216) درانجام این پژوه کمال تشکر و قدردانی بعمل می‌آید.

در شناخت و فهم رگه‌های با اهمیت در توسعه کانسارزایی و الگوی پراکندگی مکانی آنها بسیار با اهمیت می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که توسعه رگه‌های کوارتزی در شرایط فشار منفذی بالا $P_f > \sigma_2$ و نزدیک به تنش اصلی حداکثر بوقوع پیوسته است. مقدار فشار محرک در خصوص رگه‌های کوارتزی حاکی از شکل‌گیری این رگه‌ها در شرایط فشار منفذی و اعماق زیاد و در شرایط پویای ژئودینامیکی می‌باشد. نتایج نشان دهنده پراکندگی بیشتر الگوی مکانی رگه‌های کوارتزی در سیلیمانیت شیست‌های موجود در منطقه می‌باشد. این پراکندگی مکانی بیشتر در ارتباط با فشار سیال بالاتر در این توده‌های سنگی بوده و احتمالاً شکل‌گیری کانیه‌های فشار بالا همچون سیلیمانیت را بتوان با فشار بالای سیال موجود در این نواحی مرتبط دانست. رشد سطحی کانیه‌های سیلیمانیت بر روی سنگهای شیستی منطقه و عدم قرارگیری آنها بصورت نافذ در بدنه سنگ می‌تواند گواهی بر این ادعا باشد. احتمالاً جایگیری توده باتولیت الوند در شمال غرب منطقه و عملکرد سیالات داغ و فشار

- Akawy, A., 2007. Geometry and texture of quartz veins in Wadi Atalla area, Central Eastern Desert, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 47(2), 73-87.
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. *Tectonophysics* 229, 211-238.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1-20.
- Aliani, F., Maanijou, M., Sabouri, Z., Sepahi, A.A., 2012. Petrology, geochemistry and geotectonic environment of the Alvand Intrusive Complex, Hamedan, Iran. *Chemie der Erde* 72, 363-383.
- Allen, M.B., Jackson, J., Walker, R., 2004. Late Cenozoic reorganization of the Arabia-Eurasia collision and comparison of the short-term and long-term deformation rates. *Tectonics* 23, TC2008.
- Angelier, J. 1984. Tectonic analysis of fault slip data sets. *Journal of Geophysics Researches* 89, 5835-5848.
- Bear, G., Beyth, M., Reches, Z., 1994. Dike emplaced into fractured basement, Timna Igneous Complex, Israel. *Journal of Geophysics Researches* 99, 24039-24051.
- Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210-265.
- Delaney, P.T., Pollard, D.D., Zioney, J.I., McKee, E.H., 1986. Field relations between dikes and joints: emplacement processes and palaeostress analysis. *Journal of Geophysics Researches* 91 (B5), 4920-4938.
- Dunnet, D., 1969. A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics* 7 (2), 117-136.
- Ezadykiyan, L., Mohajjel, M., Sepahyharo, A.A., Rahgoshay, M., 2009. Polyphase deformation and porphyroblast growth in the Kamery-Noasadolahkhan area, Southeastern Hamedan. *Iranian Geology Journal* 11, 17-26.
- Fossen, H., 2016. *Structural geology second edition*, Cambridge University Press, 520p.
- Fry, N., 1979. Random point distributions and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* 60, 89-105.
- Jolly, R.J.H., Sanderson, D.J., 1997. A Mohr circle reconstruction for the opening of a pre-existing fracture. *Journal of Structural Geology* 19, 887-892.
- Kruhl, J.H., 1998. Reply: prism- and basal-plane parallel subgrain boundaries in quartz: a microstructural geothermobarometer. *Journal of Metamorphic Geology* 16, 142-146.
- Law, R.D., 1990. Crystallographic fabrics. A selective review of their applications to research in structural geology. In: Knipe, R.J., Rutter, E.H. (Eds.), *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics*. Geological Society of London, Special, Publication No. 54, pp. 335-52.

- Law, R.D., Searle, M.P., Simpson, R.L., 2004. Strain, deformation temperatures and vorticity of flow at the top of the Greater Himalayan Slab, Everest Massif, Tibet. *Journal of Geological Society of London* 161, 305–320.
- McKeagney, C.J., Boulter, C.A., Jolly, R.J.H., Foster, R.P., 2004. 3D Mohr Circle analysis of vein opening, Indrama lode-gold deposit, Zimbabwe: implication for exploration. *Journal of Structural Geology* 26, 1275-1291.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 519–535.
- Mohajjel, M., Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj–Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Structural Geology* 22, 1125–1139.
- Mondal, T.K., Mamtani, M.A., 2013. 3D Mohr circle construction using vein orientation data from Gadag (southern India). *Journal of Structural Geology* 56, 45-56.
- Nüchter, J.A., Stöckhert, B., 2008. Coupled stress and pore fluid pressure changes in the middle crust: Vein record of coseismic loading and postseismic stress relaxation. *Tectonics* 27, 1-23.
- Otsubo, M., Miyakawa, A., Kawasaki, R., Sato, K., Yamaguchi, A., Kimura, A., 2016. Variations in stress and driving pore fluid pressure ratio using vein orientations along megasplay faults : Example from the Nobeoka Thrust, Southwest Japan. *Island Arc* 25, 421-432.
- Passchier, C.W., Trouw, R.A.J., 2006. *Microtectonics*. Springer Verlag, Berlin-Heidelberg– New York,
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology. Strain Analysis*, Academic Press, London, 307p.
- Shahbazi, H., Siebel, W., Pourmoafee, M., Ghorbani, M., Sepahi, A., Shang, C., 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.
- Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, p. 366.
- Taghizadeh, S., 2017. Petrofabric and finite strain analysis in the Zaman abad schists. M.Sc. Thesis, Shahid Chamran University of Ahvaz.
- Tunini, L., Munt, I., Fernandez, M., Verges, J., Villasenor, A., 2015. Lithospheric mantle heterogeneities beneath the Zagros Mountains and the Iranian Plateau: a petrological-geophysical study. *Geophys Journal International* 200, 596-614.
- Wilson, C.J.L., Robinson, J.A., Dugdale, A.L., 2008. Quartz vein fabrics coupled to elevated fluid pressures in the Stawell gold deposit, south-eastern Australia. *Mineralium Deposita* 44(2), 245-263.
- Yang, T.N., Chen, J.L., Liang, M.J., Xin, D., Aghazadeh, M., Hou, Z.Q., Zhang, H.R., 2018. Two plutonic complexes of the Sanandaj-Sirjan magmatic-metamorphic belt record Jurassic to Early Cretaceous subduction of an old Neotethys beneath the Iran microplate. *Gondwana Research* 62, 246-268.