

Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, Vol. 33, Issue 3, Serial No. 129, Autumn 2023, pp. 111-122

Original Research Paper

The origin of orthogonal vein network in Paleocene-Eocene flysch south of **Birjand**, eastern Iran

Mohammad Amir Alimi^{1*}

¹Department of Mining Engineering, Faculty of Mining, Civil and Chemistry Engineering, Birjand University of Technology, Birjand, Iran

ARTICLE INFO

Article history: Received: 2023 February 26 Accepted: 2023 July 09 Available online: 2023 September 23 Keywords: Vein Fluid pressure Inversion

ABSTRACT

This paper presents the results of a field study aiming to describe and to interpret origin of the vein network in the south of Birjand. Adjacent to Birjand ophiolite in eastern Iran, the Paleocene-Eocene flysch facies was deposited in the Birjand foreland area concomitant with the Alpine orogeny (Laramide). The sandstone unit of this facies contain two orthogonal sets of quartzite veins. The N310-340 striking veins (set 1) are arranged parallel to the Bagheran Kuh range front and perpendicular to the vein set 2 (N215-240). The paleostress reconstruction in the Paleocene-Eocene shows that the regional compression direction N240 is perpendicular to the Bagheran Kuh range front. Structurally, to create orthogonal veins, σ_1 should be perpendicular to the layering and σ_2 and σ_3 should be horizontal. This situation was created in the middle Eocene-Oligocene. The post-collision extensions of this period caused a decrease in regional pressure in the region. As a resault, the maximum principal stress (σ_1), was changed to a vertical state and intermediate stress (σ_2) was parallel to the orogenic pressure. In these conditions, orthogonal tensile openings (state I) were formed as a result of the local inversion of stress and fluid pressure in the flysch facies.

1. Introduction

Flysch

Eastern Iran

In the last hundred years, there have been many studies about joints and veins. The characteristics of the tectonic veins have been investigated as structures related to folds (Berghauer and Pollard, 2004; Maeder et al., 2014; Eckert et al., 2014), faulting (Petit and Laville, 1987; VanLoon, 2002), shear zones (Maltman, 1988; Fossen et al., 2017), and especially sigmoid veins (Ramsay and Huber, 1983; Bons et al., 2012; Lisle, 2013). The analysis of vein systems is important in revealing tectonic events. So that the direction and internal structure of the veins provides information about the paleostress field, deformation type (simple or pure shear) and fluid pressure. During the process of orogeny, joints caused by fluid pressure, faulting and folding are created. In these areas, the usual patterns of fracture systems are network or ladder-shaped, which in some cases appear as orthogonal veins (Rives et al., 1994). The sandstones of the flysch facies south of Birjand were studied, which include a system of almost orthogonal

* Corresponding author: Mohammad Amir Alimi; E-mail: malimi@birjandut.ac.ir

Citation:

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2023 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

doi: 10.22071/gsj.2023.387050.2065



(R) dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.15.6

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



Jook

Alimi, M.A., 2023. The origin of orthogonal vein network in Paleocene-Eocene flysch south of Birjand, eastern Iran. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 111-122. https://doi.org/10.22071/gsj.2023.387050.2065

The origin of orthogonal vein network in Paleocene-Eocene flysch south of Birjand, eastern Iran/Alimi / G.S.J. 2023, 33 (3): 111-122

quartzite veins of mode I fractures. Previously, sigmoidal veins in Zirooji, Bushad and Behlgerd shear zones located in the Birjand mélange ophiolite and Paleocene flysches have been used to calculate paleostress, determine stress variables and provide deformation patterns of the region. This study helps to know the pattern of vein formation and the dominant direction of the tension spaces created in the region. It can help in the identification and exploration of minerals.

2. Research methodology

In order to understand the formation of orthogonal planar veins and their geometrical relationship with the tectonic events of the region, Surg, Bushad, Jimabad, Esfahrud, Mezeg and Zirooji stations were selected in the Flysch units (Figure 4- a). In cases where the veins were measured in folded layers, the veins were returned to their approximate orientation before folding by rotating the limbs around the fold axis. In the sandstone unit of flysch facies, two sets of quartzite veins are oriented along N310-340 (set 1) and N215-240 (set 2). After drawing the stereo plot of the veins, their mean orientation was obtained at each station and for the entire region. This mean for the region is N335,53 (set 1) and N224,71 (set 2). In the field observations, attention has been paid to the features of the vein and the crosscutting relationships between them. Since the texture of the veins is often without crystal form and mass, it was not possible to confirm the left-handed cut at the time of the formation of the veins. In the field observations, fibres quartzes were rarely observed, and in all cases, opening perpendicular to the layer was detected.

In order to determine the role of local stress in the creation or deformation of veins, the paleostress has been reconstructed in south Birjand flysch. In 6 stations, orthogonal veins were selected and the directions of stress axes were determined using T-Tecto software. The intersection line of two sets of veins is considered parallel to the σ_1 axis. To achieve the initial state of the veins at the time of formation, the σ_1 axis was made vertical, and the σ_2 and σ_3 axes were rotated around the vertical axis as the complement of its inclination angle. In this way, the σ_2 and σ_3 axes approached the horizontal state. In the studied stations, the trend of σ_2 axis is between N228-244 and the trend of σ_3 axis is between N294-323.

3. Discussion

Two sets of orthogonal quartzite veins have been identified in the sandstones of the Flycsh facies located on the northern edge of Bagheran Mountain. During loading, the maximum stress due to the weight of sediments (σ_1) is considered perpendicular to the layer and $\sigma_{\!_2}$ and $\sigma_{\!_3}$ are considered horizontal. If it is assumed that two sets of joints are formed on the main surface perpendicular to σ_3 , then the orientation of the orthogonal veins can be explained by the small difference created between the values of the horizontal stresses σ_2 and σ_3 , during the local inversion of the stress. (Hancock and Bevan, 1987; Dunne and North, 1990; Rives et al., 1994; Van der Pluijm and Marschak, 2004; De Joussineau et al., 2005; Maeder et al., 2014). Most of the quartzite veins in the region have a mass texture and no crystal shape. This texture indicates that they were formed in the depths. Considering the high thickness of veins in some areas of the studied area, it seems that a high-pressure fluid caused their formation. The nature of quartz comb structure in the veins also indicates the sudden opening of the vein due to fluid pressure. The compressional tectonic regime has dominated the east of Iran from the late Cretaceous to the late Eocene - early Oligocene (Berberian and King, 1981). The formation of the eastern mountains of Iran is the result of this convergence and the collision of the continental part of the Lut block in the west and the Afghan block in the east. The result of collision in the studied area (foreland of Birjand), folding and faulting in Birjand mélange ophiolite, Shekarab Mountain and its uplift from the surrounding parts. A thick succession of flysch sediments of Paleocene-Early Eocene age was deposited in the subsiding basin on the edge of the orogenic belt of the region. In the studied from Paleocene to Oligocene, the direction of maximum tectonic horizontal stress (S_{hmax}), N240, has been estimated. Simultaneously with the sedimentation of flysch facies in Birjand foreland area, a fracture set (set 2) was formed in line with its regional pressure direction N240 and perpendicular to Baghran mountain. At this time, the local inversion of the horizontal stresses due to the stress drop caused another set of fracture (set 2). It seems that the first stage of propagation of the orthogonal system was in the direction of regional compression.

4. Conclusion

In this study, structural studies were carried out with the

112

<u>عاوي د.</u>

aim of obtaining the origin and structural relationship of tensile fractures in the flysch facies south of Birjand. The results of paleostress analysis using orthogonal veins and its validation with previous studies showed that from Paleocene to Oligocene, the direction of the maximum tectonic horizontal stress (S_{hmax}) in the region was N240. The results of structural analysis of veins also show two different stress directions; a) Veins of set 2 is almost aligned with the direction of maximum horizontal stress (N240) and perpendicular to the forehead of Bagheran mountain and b) Veins of set 1 is aligned with N335 and perpendicular to veins of set 2. The results of this research show that the following factors played a role in creating orthogonal veins:

a) Fluid pressure: the opening of type I fractures in the depths of the crust, b) Paleocene-Eocene compressive tectonic stress: creation of set 2 fractures, c) Local inversion of horizontal stresses: creating orthogonal veins of set 1, d) Stretching due to the bending of Birjand ophiolite: the development of veins in the direction perpendicular to Bagheran mountain e) Stress phases after the Miocene: sinistral shearing in direction veins of set 2.

فصلنامه علمی علوم زمین، پاییز ۱۴۰۲، دوره ۳۳، شماره ۳، پیاپی ۲۹۱، صفحه ۱۱۱ تا ۱۲۲

پیوند صفحہ نخست: www.gsjournal.ir

منشأ شبکه رگهای راست گوشه در فلیشهای پالئوسن-ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران

محمدامير عليمي"

اگروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، عمران و شیمی، دانشگاه صنعتی بیرجند، بیرجند، ایران

اطلاعات مقاله	چکیدہ
تاريخچە مقالە:	این مقاله نتایج یک مطالعه میدانی را با هدف توصیف و تفسیر منشا شبکه رگهای در جنوب بیرجند ارائه میدهد. در مجاورت افیولیت
تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۲/۰۷	بیرجند در خاور ایران، رخساره فلیشی پالئوسن – ائوسن در ناحیه پیش،وم بیرجند و همزمان با کوهزایی آلپی (لارامید) نهشته شده است.
تاريخ پذيرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۸	واحد ماسهسنگی این رخساره در برگیرنده دو دسته رگه کوارتزیتی راستگوشه است. دسته رگه ۱ با امتداد 340- N310، به موازات
تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱	پیشانی کوهستان باقران و دسته رگه ۲ (240- N215) عمود بر آن تشکیل شده است. بازسازی تنش دیرین در پالئوسن- انوسن، جهت
کلېدو اژ دها:	فشارش ناحیهای را N240 نشان میدهد که عمود بر پیشانی کوهستان باقران است. از لحاظ ساختاری، برای ایجاد رگههای راستگوشه
ي ور رگە	میبایست _۹ عمود بر لایهبندی و ₂ ^م و ₃ افقی باشند. این وضعیت در ائوسن میانی – الیگوسن ایجاد شده است. کششرهای پس از
و فشار سیال	برخوردی این دوره باعث کاهش فشار ناحیهای در منطقه شد. در نتیجه تنش اصلی بیشینه (σ٫) به وضعیت قائم تغییر یافت و تنش
وار و نگے	میانی (σ₂) موازی فشار کوهزایی قرار گرفت. در این شرایط بازشدگیهای کششی (حالت I) راستگوشه در نتیجه وارونگی محلی
فليش	تنش و فشار سیال در رخساره فلیشی تشکیل شدند و در فازهای بعدی دگرشکلی، دسته رگه ۱ در راستای دسته رگه ۲ متحمل برش
خاور ایران	چپبر شدند.

1- پیشنوشتار

رگهها در طبيعت به دليل تضاد رنگي با سنگ ميزبان به راحتي قابل تشخيص هستند. بيشتر رگەها با رشد بلورها در فضاهاي ايجاد شده در اثر شكستگي شكل مي گيرند. اين امر با شکستگی شروع و به دنبال آن با پرشدگی توسط کانیها و مواد معدنی توسعه می یابد (Bons and Montenari, 2005). در صد سال اخیر مطالعات فراوانی در مورد درزهها و رگهها صورت گرفته است. ویژگی رگههای وابسته به زمین ساخت به صورت ساختارهای همراه با چینخوردگی (;Berghauer and Pollard, 2004 Maeder et al., 2014; Eckert et al., 2014)، كسلش (Petit and Laville, 1987;) VanLoon, 2002)، پهنههای برشی (Maltman, 1988; Fossen et al., 2017) و Ramsay and Huber, 1983; Bons et al., 2012;) بەوىژە رگەھاى سىگمويىدى Lisle, 2013)، بررسی شده است. جهت و ساختار داخلی رگهها اطلاعاتی از میدان تنش دیرین، نوع دگرشکلی (برش ساده یا محض) و فشار سیال را ارائه میدهد. معمولاً فشار سیال بالا در رسوبات، باعث ایجاد شکستگیها و رگههای همزمان با تکاپوهای زمینساختی میشود و ممکن است در اثر عملکرد پهنههای برشی، تغيير شكل يابد (Guition et al., 2003; Bellahsen et al., 2006). در مناطق کو هزایی، الگوهای معمول سامانه های شکستگی، شبکه ای یا نر دبانی شکل است که در مواردی به صورت رگههای راست گوشه رخنمون دارند (Rives et al., 1994).

مطالعه اخیر، در ماسهسنگهای رخساره فلیشی واقع در جنوب بیرجند انجام شده است. از جمله ویژگیهای شاخص این رخساره وجود رگههای کوارتزیتی دوکی شکل، سیگموییدال و نیز صفحهای راست گوشه است. اگرچه پیش از این، در منطقه مورد مطالعه از رگههای سیگموییدال در محاسبه تنش دیرین، تعیین متغیرهای واتنش و ارائه الگوهای دگر شکلی در پهنههای برشی زیروجی، بوشاد و بهلگرد استفاده شده است (خطیب و زرین کوب، ۱۳۸۵؛ نعیمی قصابان و همکاران، ۱۳۹۵ نیگرفته است. هدف از این پژوهش، چگونگی شکل گیری رگههای عمود بر هم منطقه است. این مطالعه به شناخت الگوی رگهزایی و راستای غالب فضاهای منطقه است. این مطالعه به شناخت الگوی رگهزایی و راستای غالب فضاهای کششی ایجاد شده در منطقه کمک می کند و از آنجایی که این بازشد گیها، گذر سیالات کانهدار را تسهیل می بخشد می تواند در شناسایی و پی جویی مواد معدنی راهگشا باشد.

۲- جایگاه زمینشناسی و تکوین زمینساختی منطقه

گستره مورد مطالعه از لحاظ موقعیت زمین شناسی بخشی از خاور ایران است که در

* نويسنده مسئول: محمدامير عليمي؛ E-mail: malimi@birjandut.ac.ir

ماخذنگاری:

علیمی، م. ا.، ۱۴۰۲، منشأ شبکه رگهای راست گوشه در فلیش های پالئوسن –ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران، ۳۳ (۳)، ۱۲۹–۱۲۲. https://doi.org/10.22071/gsj.2023.387050.2065 . ۱۲۲–۱۲۲.

doi: 10.22071/gsj.2023.387050.2065

W dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.15.6

حقوق معنوى مقاله براي فصلنامه علوم زمين و نويسندگان مقاله محفوظ است.

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







منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲ (۳) (۳): ۱۱۱–۱۱۲

مجاورت بلوک لوت قرار دارد. خاور ایران، شامل رشته کوههایی با امتداد شمالی-جنوبی و شمال شمال باختری- جنوب جنوب خاوری است که به شکل سیگموییدی Z مانند است (شکل ۱). انتهای محدب شمال خاوری کوهزاد در ناحیه بیر جند به صورت بین انگشتی در بلوک لوت نفوذ کرده است در حالی که انحنای جنوب باختری آن، در ناحیه ایرانشهر، به سمت خاور ایران و باختر بلوچستان پاکستان ادامه می یابد. در این گستره، انباشته هایی ضخیم از نهشته های فلیش گونه (توالی ماسه سنگ و شیل) پی سنگ افیولیتی و ابسته به پوسته اقیانوسی تیس جوان را پوشانده است که این مجموعه فلیش – آمیزه افیولیتی را پهنه زمین درز سیستان (;Tirul et al., 1983 (Tirrul et al., 1983)

شدن تا برخورد: بازشدگی و گسترش کافت بین بلوکهای افغان و لوت در سنومانین، باعث ایجاد اقیانوس سیستان شده است که این پوسته اقیانوسی تا اواخر پالئوژن با فرورانش بین این دو بلوک مصرف می شود (;2083, 2084) Camp and Griffis, 1983; Karimpour et al., 2011; Arjmandzadeh et al., 2011 کمپلکس های راتوک و نه (فراوردههای ناشی از فرورانش) را در بخش وسیعی از منطقه برجای می گذارد (شکل ۱). ماگماتیسم گسترده کالکآلکان در ائوسن میانی- الیگوسن پیشین در منطقه نشان از کشش های پس برخوردی دارد (2013, 2013). تداوم این رژیم کششی باعث نازکشدگی سنگ کره و بالاآمدگی سست کره شده که نتیجه آن گستردگی بازالتهای آلکالن میوسن میانی تا کواترنری است (Walker et al., 2009; Pang et al., 2012).



در تکوین زمین ساختی خاور ایران، دو انگاره مطرح است: الف) انگاره کافتی

شکل ۱- نقشه ساختاری و زمینشناسی ساده شده بخش هایی از خاور ایران، با اصلاحاتی از نقشههای زمینشناسی ۱:۲۵۰۰۰ منطقه. گستره مورد مطالعه در جنوب بیرجند با مستطیل نمایش داده شده است.

Figure 1. Simplified structural and geological map of part of eastern Iran, modified after the 1: 250,000 scale geological map area. The case study in the south of Birjand is shown with a rectangle.

منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲، ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

ب) انگاره اوراکلاین که کوههای خاوری ایران را به عنوان یک کوهزاد ثانویه در نظر می گیرد. در این انگاره، کمانش سنگ کره خاور ایران حول محور قائم، در پاسخ به دو مرحله تغییر شکل اصلی عمود بر هم شکل گرفته است. مرحله نخست فشارش شمالي- جنوبي در كرتاسه بالايي-پالئوسن، ناشي از فرورانش به سمت شمال سنگ كره اقيانوسي تتيان به زير ابرقاره سيمرين (;Ghodsi et al., 2016) Bagheri and Damani Gol, 2020) و دیگری فشارش خاوری- باختری در ائوسن پسین-الیگوسن پیشین، ناشی از فرار بلو ک افغان به سمت باختر (در نتیجه فرورفتگی صفحه هند به درون صفحه اوراسيا) (Carey, 1955; Rezaei kahkhai et al., 2017). منطقه مورد مطالعه بخشی از کرانه باختری پهنه زمیندرز سیستان است که از نظر سنگشناسی شامل توالی افیولیت و مخلوط درهم رنگین، رسوبات نوع فلیش و سنگهای آذر آواری جوانتر از افیولیتها است (Eftekhar Nezhad et al., 1986). واحدهای یادشده در کوهستانهای باقران و شکراب به ترتیب در جنوب و شمال شهر بیرجند رخنمون دارند که توسط دشت آبرفتی بیرجند از یکدیگر جدا شدهاند. در پیشانی کوهستان باقران، گسل جنوب بیرجند و پهنههای برشی متعدد جداکننده توالی افیولیتی کرتاسه از رسویات آبرفتی کواترنری می باشند. گسل جنوب بیرجند به طول تقریبی ۸۰ کیلومتر، گسلی راستالغز چپبر است که امتداد کلی آن شمال شمالباختری بوده و در مناطقي با روند خاوري - باختري، از شکل خميده اريب افيوليت ملانژ بير جند تبعیت می کند (علیمی، ۱۴۰۱). در مرز کوهستان باقران و دشت بیرجند نهشتههای فلیش گونه در ناحیه پیش بوم بیرجند (Bagheri and Damani Gol, 2020) و همزمان با كوهزايي آلپي (لاراميد) نهشته شدهاند كه به زمان پالئوسن– ائوسن پاييني نسبت

داده میشود (Tirrul et al., 1983). بهطور کلی رخسارههای فلیشی به عنوان رخساره زمینساختی همزمان با کوهزایی و مرتبط با آبهای ژرف معرفی میشود (Mitchell and Reading, 1978; Brookfield and Andrews-Speed, 1984).

۳-روش پژوهش

به منظور شناخت چگونگی شکل گیری ر گههای صفحهای راست گوشه و ارتباط هندسی آنها با رخدادهای زمین ساختی منطقه، ایستگاههای سورگ، بوشاد، جیم آباد، اسفهرود، مزگ و زیروجی در واحد فلیشی واقع در پیشانی کوهستان باقران انتخاب شد (شکل۴–۵). در هر ایستگاه افزون بر برداشت موقعیت هندسی ر گهها، ریخت شناسی، روابط قطع شدگی و بافت ر گه (کوارتز رشته ای یا توده ای) بررسی شد. در مواردی که رگهها در لایههای چین خورده اندازه گیری شده است با چرخش یالها حول محور چین، رگهها به جهت تقریبی خود پیش از تا شدن باز گردانده شد. با استفاده از رگههای راست گوشه در ایجاد و دگر شکلی ر گهها، تنش دیرین با استفاده از رگههای راست گوشه در نرمافزار T-Tecto بازسازی شد (شکل۴–۵ و جدول ۱). بدین منظور خط تقاطع دو دسته رگه موازی با محور _ا σ در نظر گرفته شده است. برای دستیابی به حالت اولیه رگهها در زمان تشکیل، محور _ا σ قائم شد و به اندازه متمم زاویه میل آن، محورهای ₂ σ و ₈ حول محور قائم (مرکز استریونت) دوران داده شد. بدین ترتیب محورهای ₂ σ و ₈ به حالت افقی نزدیک شدند و راستای بیشینه تنش افقی زمین ساختی (میه ای تشکیل (پالئوسن– ائوسن)

جدول۱- جهت گیری دسته رگهها و محورهای تنش دیرین منطقه بر اساس بازسازی رگههای راست گوشه در فلیش های جنوب بیرجند.

Table 1. Orientation of the set of veins and paleostress axes of the region based on the reconstruction of orthogonal veins in the flysches of south Birjand.

				Stress axis			Initial situation		
Station	Set1	Set2	Rotation	σ3	σ2	σ_1	σ_1	σ2	σ3
Surg	320,60	230,80	29	139,10	234,27	029,61	000,90	238,02	319,08
Bushad	327,56	221,48	39	132,22	235.29	009,51	000,90	060,04	309,08
Jimabad	333,47	234,77	31	144,11	240,28	034,59	000,90	244,00	323,07
Esfahrud	331,48	213,70	46	129,19	236,40	020,44	000,90	244,00	309,17
Mezg	328,69	230,68	17	137,15	229,08	347,73	000,90	229,05	315,00
Zirooji	176,62	203,84	44	111,09	209,42	011,46	000,90	228,13	294,32
Total	335,53	224,71	41	133,22	237,32	014,49	000,90	061,13	310,09

۴- نتایج حاصل از برداشتهای صحرایی

۴-1- ریختشناسی رگهها

در پیشانی کوهستان باقران واقع در جنوب بیرجند، توالی از ماسهسنگهای نازک لایه تا لایه متوسط، ماسهسنگ آهکی به رنگ کرم تا قهوهای روشن، شیل و فیلیت به رنگ خاکستری روشن تا سبز روشن با تداخل هایی از رگههای کوارتزیتی رخنمون دارد. این رگهها از نظر ریختشناسی به صورت نامنظم، سیگموییدی و یا صفحهای شکل می باشد که نوع صفحهای آن نسبت به لایهبندی زاویه ۷۵ تا ۹۰ درجه می سازد. عرض رگهها از ۵ میلی متر تا ۱۵ سانتی متر متغیر است و طول آنها در مواردی به ۱۰ متر می رسد. غالب رگهها از کواتز سفید، بدون شکل بلوری پر شدهاند (شکل ۲–۵). کوارتزهای رشته اورهای کواتز سفید، بدون شکل بلوری پر شدهاند (شکل ۲–۵). ریختشناسی رشته بلورهای کوارتز در رگهها نشان می دهد که رشتهها عمود بر دیواره رگه رشد کردهاند. از آن جایی که رشتهها بردار جابه جایی در طول رگه را به دست می دهند (1983) and Huber (1983)، بازشدگی عمود بر لایه تایید

کوارتز با ساختار شانهای و به صورت بلورهای برجسته هگزاگونالی رشد کرده است (شکل۲–c).

۲-۴- الگوی شبکه رگهای و بازسازی تنش دیرین

در واحد ماسهسنگی رخساره فلیشی، دو دسته رگه کوارتزیتی با امتداد 340 N310 (دسته ۱) و 240 N215 (دسته ۲) جهت گیری شده است که الگوی شبکهای و راست گوشه دارد (شکل۲-f، ۵). فاصلهداری این رگهها بین ۴۰–۵ سانتیمتر و زاویه تقاطعی آنها بین ۷۰ تا ۹۰ درجه متغیر است. روابط قطع شدگی حاکی از اینست که رگههای دسته دوم، دسته اول را به صورت چپبر جابه جا کرده است (شکل۳–c). از آنجایی که بافت رگهها غالبا بدون شکل بلوری و تودهای است، امکان تایید برش در زمان تشکیل رگهها فراهم نشد.

بررسی استریو پلات ر گهها در ۶ ایستگاه در منطقه نشان میدهد که دسته ر گههای

منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲٬ ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

<u>المجاوعي</u>

۲) بهدست آمده است. همچنین با حذف اثر چینخوردگی در منطقه موقعیت رگهها در زمان تشکیل N312,73 و N220,78 بر آورد شد (شکل۴-b). ۱ و ۲، روندهای تقریبا واحدی در فلیشهای جنوب بیرجند دارند بهطوریکه میانگین جهتگیری رگهها برای کل منطقه N335, 53 (دسته ۱) و N224,71 (دسته



شکل۲- a) ر گههای راست گوشه از کوارتز سفید با بافت تودهای؛ b) ر گه کوارتز فیبری با رشد بلورها عمود بر دیواره؛ c) رشد بلورهای کوارتز با ساخت شانهای در فضاهای باز.

Figure 2. a) Orthogonal veins of white quartz with massive texture; b) Fibrous quartz vein with crystal growth perpendicular to the wall; c) The growth of quartz crystals by forming a comb structure in open spaces.



شکل۳- نمونههایی از دسته رگههای راست گوشه در ایستگاههای a) سورگ؛ b) بوشاد؛ c) جیم آباد؛ b) اسفهرود؛ c) مزگ؛ f) زیروجی. رگههای با امتداد ۲۶۰-۲۱۵ (دسته ۲) به مقدار ناچیزی رگههای با امتداد ۳۴۵– ۳۱۵ (دسته ۱) را بریده و با مولفه برشی چپبر جابهجا کردهاند.

Figure 3. Examples of Orthogonal vein sets in stations. a) Surg; b) Bushad; c) Jimabad; d) Esfahrud; e) Mezg; f) Zirooji. The 215- 260°-striking veins (set 2) to a small amount cut and displacement 315 -345°-striking veins (set 1) with sinistral shearing component.

Jeojesk

منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲، ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

با استفاده از رگههای راستگوشه، وضعیت محورهای تنش دیرین در ۶ ایستگاه بازسازی شد (شکل۴–c و جدول۱). در گذشته نیز تنش دیرین با استفاده از تحلیل جنبشی گسلها در افیولیتهای منطقه بهدست آمده است. بر این اساس، راستای میانگین بیشینه تنش افقی برای پالئوسن و ائوسن در رشته کوههای باقران، N243

(موسوی و همکاران، ۱۳۸۹) و در رشته کوههای شکراب N241 تعیین شده است (عزتی و همکاران، ۱۳۹۸) که همروند بانتایج این پژوهش است. میانگین روند محورهای σ₂ و σ₃ برای کل منطقه، بهترتیب (N361(241 و N310 بهدست آمد (شکل ۴-c). این روندها بهترتیب به جهت دسته رگههای ۲ (N224) و ۱ (N335) نزدیک است.



شکل۴– a) نقشه زمین شناسی ساده شده منطقه بیرجند با اصلاحاتی از نقشه زمین شناسی ۱:۲۵۰۰۰۰ بیرجند (Vahdati Daneshmand et al., 1991) به همراه موقعیت ایستگاههای برداشت دادههای ساختاری؛ b) استریوپلاتها جهت گیری میانگین دسته رگههای راست گوشه را در رخساره فلیشی جنوب بیرجند برای ۶ ایستگاه نشان میدهد؛ c) بازسازی تنش دیرین با استفاده از رگههای راست گوشه در این مطالعه.

Figure 4. a) Simplified geological map of the Birjand area modified after the 1: 250,000 scale geological map of Birjand (Vahdati Daneshmand et al., 1991) with location of structural data collection stations; b) Stereoplats for 6 stations showing the mean orientations of Orthogonal vein sets in the flysch facies in the southern parts of the Birjand; c) Palaeostress reconstructions by Orthogonal veins in this study.

منشأ شبكه رگهای ر استگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲ (۳) (۳): ۱۱۱–۱۲۲

۵- بحث

1-4- منشا شبکه رگهای راستگوشه

در ماسه سنگ های رخساره فلیشی واقع در حاشیه شمالی کوهستان باقران، دو دسته رگه کوارتزیتی راست گوشه شناسایی شده است. غالب رگههای کوارتزیتی منطقه، بافت تودهای و بدون شکل بلوری دارند (شکل ۲–۵) این بافت نشانگر این ست که در ژرفا شکل گرفتهاند (Taylor, 2009). همچنین ماهیت ساخت شانهای کوارتز در رگهها (شکل ۲–۵)، نشان دهنده بازشدگی ناگهانی رگه ناشی از فشار سیال است. بنابراین می بایست شکل گیری رگهها در منطقه را در نقش فشار سیال جستجو کرد. اگرچه در ژرفاهای زیاد فشار محصور کننده بالاست اما وجود سیال یا فشار بالا باعث ایحاد شکستگیهای کششی می شود. این موضوع در شکل ۵ نشان داده شده است.

دایره مور سمت راست نشانگر حالتی از تنش است که در آن تنش برشی کوچک تر از مقداری است که موجب گسیختگی شود. فشار سیال منفذی (P) با کاهش تنش عمودی، دایره را به سمت چپ جابهجا کرده و با قطع پوش گسیختگی در نقطه ۵ شکستگیهای کششی ایجاد میشود. بنابراین اولین دسته از رگهها زمانی ایجاد شدهاند که دایره مور در اثر یک پالس فشار مایع به میدان شکست کششی منتقل شده

مشاهدات صحرایی در رخساره فلیشی جنوب بیرجند نشان می دهد که رگهها تنها در واحد ماسهسنگی نمود دارند و واحد شیل همراه آن فاقد رگه است. همانطوری که درشکل ۵ ملاحظه می شود پوش گسیختگی ماسهسنگ نسبت به شیل متفاوت است و تنش تفاضلی بالاتری دارد. از این رو در شرایط یکسان ماسهسنگ زودتر گسیخته می شود و متعاقب آن اتساع می یابد.



شکل۵- نمودار گسیختگی مور-گریفیث-کولمب (Bons et al., 2012). فشار سیال (P_f) دایره مور را به سمت پوش گسیختگی جابهجا میکند و تنش موثر (σ_n-P_f) باعث شکست سنگ میشود. شکستگیهای کششی (حالت I)، زمانی ایجاد میگردد که دایره مور پوش گسیختگی را در نقطه a لمس کند. ماسهسنگ نسبت به شیل تنش تفاضلی بالاتری دارد در نتیجه در توالی فلیشی، شکستگی کششی اغلب در ماسهسنگ ایجاد میشود.

Figure 5. Mohre-Griffithe-Coulomb failure (Bons et al., 2012). The fluid pressure (P_i) shifts the Mohr circle to failure envelope and effective stress ($\sigma_n - P_i$) causes rock failure. Tensile fractures (mode I) are created when the Moorevs circle touches the failure envelope at point a. In the flysch sequence, the sandstone has a higher differential stress than the shale, as a result, tensile fracture often occurs in the sandstone.

منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰،۲ ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

0.000 Co.Lo

5-2- ارتباط زمینساخت منطقه با الگوی شبکه رگهای

رژیم زمین ساخت فشاری از اوایل کامپانین (کرتاسه پسین) تا ائوسن پسین-الیگوسن پیشین بر خاور ایران حاکم بوده است (Rerberian and King, 1981). شکل گیری کوههای خاوری ایران نتیجه این همگرایی و برخورد بخش قاره ای بلو ک لوت در باختر و بلوک افغان درخاور می باشد. نتیجه برخورد در منطقه مورد مطالعه (ناحیه پیش بوم بیرجند)، چین خورد گی و گسلش در افیولیت ملائز بیرجند، کوهستان شکراب و فرایش آن از بخشهای پیرامونی بود. در حوضه فرونشسته حاشیه کمربند کوهزایی منطقه، توالی ستبری از رسوبات فلیش به سن پالئوسن- ائوسن پیشین نهشته شد. پژوهش ها در حوضههای پیش بوم و بین کوهی نشان داده است که در این مناطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این مناطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این مناطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در جهت امتداد و دیگری در جهت شیب حوضه این ماطق یک دسته شکستگی در به می موازی با جهت فشار منطقهای است (Point در این این خاصی در لبه های حوضه را عامل ایجاد شکستگی می دانند (Narr and Currie, 1982).

روابط هندسی بهدست آمده از ساختارها در این پژوهش، نشان می دهد که می بایست ارتباط مستقیمی بین ریخت شناسی کوهستان، تنش زمین ساختی حاکم بر منطقه و رگهها وجود داشته باشد. خمیدگی روند پیشانی کوهستان باقران در منطقه نیز بین 315-N270 تغییر می کند. در گستره مورد مطالعه از پالئوسن تا الیگوسن، راستای بیشینه تنش افقی زمین ساختی (_{۲۰سم}S)، N240 بر آورد شده است. به نظر می رسد همزمان با رسوب گذاری رخساره فلیشی در ناحیه پیش بوم بیر جند، یک دسته شکستگی (دسته ۲) هم راستا با جهت فشارش ناحیه ای (N240) و عمود بر پیشانی کوهستان باقران شکل گرفته است. تنش حاصل از بارگذاری و باربرداری در حوضه به همراه فشار سیالات به دام افتاده در منافذ ماسه سنگ و شیل باعث اتساع شکستگی ها

و ایجاد رگههای کششی (حالت I) شد. در این زمان وارونگی محلی تنشهای افقی در اثر افت تنش، دسته دیگر شکستگی (دسته ۱) را ایجاد کرد. پیشنهاد می شود اولین مرحله انتشار سامانه راست گوشه در جهت فشردگی ناحیهای بوده است. با وجود این در شواهد صحرایی، تقدم و تأخر رگههای ۱ و ۲ با قطعیت مشخص نیست.

با وجود این که رگههای راستگوشه در اثر بیشینه فشار قائم ایجاد می شوند اما در الگوی بالا راستای بیشینه تنش افقی زمین ساختی موازی دسته رگه ۲ در نظر گرفته شده است. دلیل آن این است که اگرچه رژیم زمین ساختی حاکم بر منطقه عموما فشاری-ترافشارشی بوده است اما کشش.های پس از برخوردی در ائوسن میانی– الیگوسن از مقدار تنش بیشینه افقی (o₁) در منطقه کاسته است. در طول این فشردهسازی کاهشی، سیستم راستگوشه زمانی ایجاد میشود که تنش افقی به اندازه کافی کاهش یابد تا بیشینه فشار به وضعیت قائم تغییر کند. در این زمان تنش میانی (σ₂) افقی و به موازات فشار کوهزایی قرار می گیرد (Dunne and North, 1990). بنابراین در طول شکل گیری رگههای راست گوشه، تنش اصلی بیشینه (٫σ)، قائم باقیمانده و تنش های میانی (٫σ) و کمینه (σ₃) نیز به ترتیب موازی و عمود بر فشار کوهزایی تنظیم می شوند (شکل b-۶). به نظر میرسد کشش ناشی از خمش افیولیت بیرجند و فازهای بعدی تنش از میوسن تا به امروز (N30-60) در توسعه رگهها در راستای عمود بر پیشانی کوهستان باقران نیز نقش داشته است. نبود فابریک برشی و یا سنگهای شکسته شده همراه کوارتز و نیز ر شد کوار تز رشتهای عمود بر دیواره رگه، گواه شکل گیری شکستگی های کششی بدون عملکرد برش در منطقه است. اگرچه در راستای دسته رگه ۲، برش راستالغز چپبر اندکی دیده میشود اما این برش ثانویه و ناشی از فازهای بعدی حاکم بر منطقه يو ده است (شکل ۳).



شکل ۶-الگوی تکامل زمینساختی حوضه فلیشی جنوب بیرجند. الف) جایگیری افیولیت ملانژ بیرجند در کرتاسه پسین؛ ب) رسوب گذاری رخساره فلیشی همزمان با کوهزایی و ایجاد رگههای راست گوشه در پالئوسن-ائوسن.

Figure 6. The pattern of tectonic evolution of the flysch basin in south Birjand. a) Emplavement of Birjand Ophiolite mélange in late Cretaceous; b) Syn-orogenic flysch deposits and initiation of orthogonal veins in Paleocene-Eocene.

منشأ شبكه رگهای ر استگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایر ان/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰۲، ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

309 jost

6- نتیجهگیری

در این مطالعه با هدف دستیابی به منشا و ارتباط ساختاری شکستگی های کششی در رخساره فلیشی جنوب بیرجند، مطالعات دقیق ساختاری انجام شد. نتایج تحلیل تنش دیرین با استفاده از رگههای راستگوشه و صحتسنجی آن با مطالعات پیشین نشان داد که از زمان پالئوسن تا الیگوسن، راستای بیشینه تنش افقی زمین ساختی (S_{hmax}) در منطقه، N240 بوده است. در طی این زمان، تنش وارده باعث کوتاه شدگی پیش بوم بیرجند در راستای شمال خاوری- جنوب باختری

و کشش جانبی در جهت عمود بر این راستا شده است. نتایج تحلیل ساختاری رگهها نیز نشان میدهد که الف) دسته رگه ۲ تقریبا همراستا با جهت بیشینه تنش افقی (N240) و عمود بر پیشانی کوهستان باقران ایجاد شده و کشش ناشی از خمش افیولیت بیرجند نیز در توسعه آن نقش داشته است؛ ب) دسته رگه ۱ در راستای N335 و عمود بر دسته رگه ۲ در نتیجه وارونگی تنش های افقی شکل گرفته است.

كتابنگاري

- خطیب، م. م. و زرین کوب، م. ح.، ۱۳۸۵، تحلیل پارینه تنش در پهنه برشی زیروجی بر اساس نسبت طول به پهنای شکستگیهای کششی (جنوب بیرجند)، دهمین همایش انجمن زمین شناسی ایران. https://civilica.com/doc/28478
- عزتی، م.، غلامی، ا. و موسوی، س. م.، ۱۳۹۸، بازسازی مراحل اعمال تنش دیرین درکوههای شکراب واقع در زون زمیندرز سیستان. فصلنامه زمینساخت، تابستان ۱۳۹۸، سال سوم، شماره ۱۰، ص http://dx.doi.org/10.22077/jt.2020.1434
- علیمی، م. ا.، ۱۴۰۱، تحلیل الگوهای دگرشکلی بر اساس آرایههای رگهای سیگموییدال در پهنه برشی بهلگرد. فصلنامه علوم زمین، بهار ۱۴۰۱، سال سی و دوم، شماره ۱۲۳، ص. ۱۹-۸۹ https://doi.org/10.22071/gsj.2021.277344.1895
- موسوی، س.م.، علوی، س.ا. و خطیب، م.م.، ۱۳۸۹، تفکیک فازهای تنش دیرین به روش برگشتی از صفحههای گسلی در منطقه جنوب بیرجند. فصلنامه زمین شناسی ایران، بهار ۱۳۸۹، سال چهارم، شماره ۱۳، ص ۳۸–۲۷. https://sid.ir/paper/129294/fa
- نعیمیقصابان، ن.، خطیب، م. م.، قاسمی رزوه، ط.، نظری، ح. و هیهات، م. ر.، ۱۳۹۵، تحلیل هندسی، جنبشی و تعیین متغیرهای واتنش بر پایه رگههای کششی سیگموییدال در پهنه برشی بوشاد. فصلنامه علوم زمین، تابستان ۱۳۹۵، سال بیست و پنجم، شماره ۱۰۰، ص۴۶–۳۷. https://doi.org/10.22071/gsj.2016.40687

References

- Alimi, M.A., 2022. Analysis of deformation models based on sigmoidal vein arrays in the Bahlgerd shear, Scientific Quarterly Journal of Geosciences. Spring 2022, Year 32(123), 89-102. doi: 10.22071/gsj.2021.277344.1895. (In Persian)
- Arjmandzadeh, R., Karimpour, M.H., Mazaheri, S.A., Santos, J.F., Medina, J.M., and Homam, S.M., 2011. Sr-Nd isotope geochemistry and petrogenesis of the Chah-Shaljami granitoids (Lut Block, Eastern Iran): Journal of Asian Earth Sciences, 41(3), 283-296. http://dx.doi.org/10.1016/j. jseaes.2011.02.014.
- Bagheri, S., and Damani Gol, S., 2020. The Eastern Iranian Orocline, Earth Science Reviews, 210, 1-42. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103322.
- Bellahsen, N., Fiore, P., and Pollard, D.D., 2006. The role of fractures in the structural interpretation of Sheep Mountain Anticline, Wyoming, Journal of Structural Geology, 28, 850-867. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.01.013.
- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran, Canadian Journal of Earth Sciences, 18(2), 210-265. https://doi.org/10.1139/e81-019.
- Berghauer, S., and Pollard, D.D., 2004. A new conceptual fold-fracture model including prefolding joints, based on the Emigrant Gap anticline, Wyoming, Bulletin of the Geological Society of America, 116 (3-4), 294-307. https://doi.org/10.1130/B25225.1.
- Bons, P.D., and Montenari, M., 2005. The formation of antitaxial calcite veins with well-developed fibres, Oppaminda Creek, South Australia, Journal of Structural Geology 27, 231-248. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.08.009.
- Bons, P.D., Marlina, A.E., and Rivas, E.G., 2012. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures, Journal of Structural Geology, 43, 33-62. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.07.005.
- Brookfield, M.E., and Andrews-Speed, C.P., 1984. Sedimentology, petrography and tectonic significance of the shelf, flysch and molasse clastic deposits across the Indus Suture Zone, Ladakh, NW India, Sedimentary Geology, 40(4), 249-286. https://doi.org/10.1016/0037-0738(84)90011-3.
- Camp, V.E., and Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran, Lithos, 15, 221–239, https://doi.org/10.1016/0024-4937(82)90014-7.
- Carey, S.W., 1955. The orocline concept in geotectonics- Part I, Papers and Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 89, 255–288. https://eprints. utas.edu.au/13965.
- De Joussineau, G., Bazalgette, L., Petit, J.P., and Lopez, M., 2005. Morphology, intersections, and syn/late-diagenetic origin of vein networks in pelites of the Lodève Permian Basin, Southern France, Journal of Structural Geology, 27(1), 67-87. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2004.06.016.
- Dunne, W. M., and North, C. P., 1990. Orthogonal fracture systems at the limits of thrusting: an example from southwestern Wales, Journal of Structural Geology, 12(2), 207-215. https://doi.org/10.1016/0191-8141(90)90005-J.
- Eckert, A., Connolly, P., and Liu, X., 2014. Large-scale mechanical buckle fold development and the initiation of tensile fractures, Geochemistry, Geophysics, Geosystems, 15(11), 4570–4587, https://doi.org/10.1002/2014GC005502.
- Eftekhar Nezhad, J., Ohanian, T., Tatevosian, S., Manouchehri, M., Afaghi, A., Hosseini, Z., Qomashi, A., Afsharian Zadeh, A., and Etemadi, N., 1986. Geological Map of Birjand, Scale: 1:100,000, Geological Survey of Iran.http://dge.mshdiau.ac.ir/images/download/geologymap/Downlodmap/ birjand%20map.jpg.
- Engelder, T., and Geiser, P., 1980. On the use of regional joint sets as trajectories of paleostress fields during the development of the Appalachian Plateau, New York, Journal of Geophysical Research, 85, 6319-6341. https://doi.org/10.1029/JB085iB11p06319.

منشأ شبكه رگهای راستگوشه در فلیشهای پالئوسن–ائوسن جنوب بیرجند، خاور ایران/محمدامیر علیمی/علوم زمین ۱۴۰،۲ ۳۳ (۳): ۱۱۱–۱۲۲

- Ezati, M., Gholami, E., and Moussavi, S.M., 2019. Reconstruction of the steps of applied paleostress in Shekarab Mountains located in Sistan suture zone, Tectonics Journal, 10, 57-69. doi: 10.22077/jt.2020.1434. (In Persian)
- Fossen, H., Carolina, G., and Cavalcante, G., 2017. Shear zones A review, Earth-Science Reviews 171 (2017) 434-455. https://doi.org/10.1016/j. earscirev.2017.05.002.
- Ghodsi, M.R., Boomeri, M., Bagheri, S., and Ishiyama, D., 2016. Geochemistry, zircon U-Pb age, and tectonic constraints on the Bazman granitoid complex, Southeast Iran, Turkish journal of earth sciences, 25(4), 311–340. https://doi.org/10.3906/yer-1509-3.
- Guition, M., Sassi, W., Leroy, Y., and Gauthier, B., 2003. Mechanical constraints on the chronology of fracture activation in the folded Devonian sandstone of the western Moroccan Anti-Atlas, Journal of Structural Geology, 25(8), 1317-1330. https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00155-4.
- Hancock, P.L., and Bevan, T.G., 1987. Brittle modes of foreland extension, Geological Society, London, Special Publications, 28, 127-137. https://doi. org/10.1144/GSL.SP.1987.028.01.10.
- Karimpour, M.H., Stern, C.R., Farmer, L., Saadat, S., and Malekezadeh, A., 2011. Review of age, Rb-Sr geochemistry and petrogenesis of Jurassic to Quaternary igneous rocks in Lut Block, Eastern Iran, Geopersia 1, 19–36. https://doi.org/10.22059/JGEOPE.2011.22162.
- Khatib, M.M., and Zarrinkoub, M.H., 2006. Analysis of paleostress in Zirooji shear zone based on the ratio of length to width of tensile fractures (south of Birjand), 10th Conference of Geological Society of Iran (In Persian)
- Lisle, R. J., 2013. Shear zone deformation determined from sigmoidal tension gashes, Journal of Structural Geology, 50, 35-43, https://doi.org/10.1016/j. jsg.2012.08.002.
- Lorenz, J.C., Teufel, L.W., and Warpinski, N.R., 1991. Regional fractures I: A mechanism for the formation of regional fractures at depth in flat-lying reservoirs, American Association of Petroleum Geology Bulletin, 75(11), 1714-1737. https://doi.org/10.1306/0C9B29E3-1710-11D7-8645000102C1865D.
- Maeder, X., Passchier, C.W., and Trouw, R.A.J., 2014. Complex vein systems as a data source in tectonics: An example from the Ugab Valley, NW Namibia, Journal of Structural Geology, 62, 125-140. https://doi.org/10.1016/j.jsg.2014.01.011.
- Maltman, A.J., 1988. The importance of shear zones in naturally deformed wet sediments, Tectonophysics. 145(1-2), 163-175. https://doi.org/10.1016/0040-1951(88)90324-1.
- Mitchell, A.H.G., and Reading, H.G., 1978. Sedimentation and tectonics. In: H.G. Reading (Editor), Sedimentary Environments and Facies. Cambridge University Press, 439-476. https://doi.org/10.1017/S0016756800044113.
- Moussavi, S.M., Alavi, S.A., and Khatib, M.M., 2010. Segregation of paleostress phases by reverse method from fault planes in south Birjand region, quarterly Iranian Journal of Geology. Spring 2022, Year 4(13), 27-38. (In Persian)
- Naimi-ghassabian, N., Khatib, M.M., Ghasemi Rozveh, T., Nazari, H., and Heyhat, M.R., 2016. Analysis of geometric and kinematic parameters of strain on the open gash veins with in the Boushad shear zone (Birjand Ophiolithic Melange, Eastern Iran), Scientific Quarterly Journal of Geosciences. Summer 2016, Year 25(100), 37-46. doi: 10.22071/gsj.2016.40687. (In Persian)
- Narr, W., and J.B., Currie, 1982. Origin of Fracture Porosity-Example from Altamont Field, Utah, American Association of Petroleum Geology Bulletin, 66(9), 1231–1247. https://doi.org/10.1306/03B5A782-16D1-11D7-8645000102C1865D.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Lin, Y.C., Lee, H.Y., Lo, C.H., and Khatib, M.M., 2013. Iranian ultrapotassic volcanism at 11 Ma signifies the initiation of post collisional magmatism in the Arabia–Eurasia collision zone, Terra Nova, https://doi.org/10.1111/ter.12050.
- Pang, K.N., Chung, S.L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Yang, H.M., Chu, C.H., Lee, H.Y., and Lo, C.H., 2012. Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut–Sistan region, eastern Iran, Chemical Geology, 306–307, 40–53, https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2012.02.020.
- Petit, J.P., and Laville, E., 1987. Morphology and microstructures of hydroplastic slickensides in sandstone, Geological Society Special Publication, 29, 107–121. https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1987.029.01.10
- Ramsay, J.G., and Huber, M.I., 1983. The techniques of modern structural geology. Volume1: Strain analysis. Academic Press, London, 307 p, https://ir1lib.org/dl/3169418/63e0dd?dsource=recommend.
- Rezaei-Kahkhaei, M., Rahbar, R., and Qasemi, H.A., 2017. Dating of Lakhshak intrusive assemblage through the U-Pb method on zircon and titanite, East Iran, Iranian Journal of Crystallography and Mineralogy, 25, 111–122.http://refhub.elsevier.com/S0012-8252(20)30368-8/rf1005.
- Rives, T., Rawnsley, T.D., and Petit, J.-P., 1994. Analogue simulation of natural orthogonal joint set formation in brittle varnish, Journal of Structural Geology, 16(3), 419-429. https://doi.org/10.1016/0191-8141(94)90045-0.
- Taylor, R., 2009. Ore textures -Recognition and Interpretation. Springer press. 282 p. https://doi.org/10.1007/978-3-642-01783-4.
- Tirrul, R., Bell, I.R., Griffis, R.J., and Camp, V.E., 1983. The Sistan suture zone of eastern Iran, Geological Society of America Bulletin, 94, 134–150, https://doi.org/10.1130/0016-7606(1983)94<134:TSSZOE>2.0.CO;2.
- Vahdati Daneshmand, F., Kholghi, M. H., Ohanian, T., Tatevosian, S., Shah Beig, A., Salehi Rad, R., Vassigh, H., Soheil, M., Movahhed avval, H., Emami, M. H., Navai. I., and Arzhang Ravesh, B., 1991. Geological Quadrangle map of Birjand, scale 1:250,000, Geological Survey of Iran. http://www.gsi.ir/fa/map.
- Van der Pluijm, B.A., and Marschak, S., 2004. Earth Structure. Norton and Compagny Ltd, New York, 656 p. https://wwnorton.com/books/9780393924671.
- Van Loon, A.J., 2002. Soft-sediment deformations in the Kleszczow graben (central Poland), Sedimentary Geology 147, 57–70. https://doi.org/10.1016/ S0037-0738(01)00187-7.
- Walker, R., Gans, P., Allen, M.B., Jackson, J., Khatib, M., Marsh, N., and Zarrinkoub, M., 2009. Late Cenozoic volcanism and rates of active faulting in eastern Iran. Geophysical Journal International, 177, 783–805. http://refhub.elsevier.com/S0024-4937(13)00170-9/rf0430.

