

Paleostress analysis in the Shirshotor area (One of Northern Branches of Nehbandan fault)

Seyed Morteza Moussavi¹, Auoyb Sahimi^{1*}, Mohamad Mehdi Khatib¹

1- Department of Geology, University of Birjand, Birjand, Iran

Keywords: Sistan suture zone, Shirshotor area, Analysis of paleostress, veins and foliation, Clock rotation.

1- Introduction

Recent geological studies represent that the lithosphere is evolved by time and place. Hence, one of the essential ways for interpreting how structures and deformation are formed, it appeared in finding paleostress direction. Reconstruction of paleostress is performed by using analysis of tectonic data with conjugate fault (Anderson, 1951), moving surfaces of faults (Arthaud, 1969), two-sided perpendicular to each other (Carey and Brunnier, 1974; Angelier and Mechler, 1977; Angelir, 1990; Ramsey and Lisle, 2000) and inversion method (Yamaji, 2000). Analysis of the paleostress phases performed by the inversion method measured with using fault plane in southern Birjand city. Results indicate at least two stress phases have been operating in the study area. After changing the direction of phases trends; extension and deformation are observed and on the structural component (Moussavi et al., 2011).

The study area is located in the Sistan suture zone. This paper aims to investigate the variation of maximum stress axis (σ_1) along with the history of the tectonic regime with the use of structural markers, including faults, foliated structure, and veins. In order to investigate paleostress variations, have been used stress analysis methods on fault data with using the relevant software. The results indicate two stress trends during tectonic history based on the age of rock units. The initial direction of the maximum stress axis is acted NW – SE since Cretaceous to the before Eocene, after that the direction of stress has been changing toward NE- SW since Eocene to the present time. Furthermore, by combining between the results obtained from stress analysis with the results obtained from the kinematic of veins and foliation indicate the variations of directional stress field represent a clockwise rotation.

2-Methodology

In order to recognize the arrangement of the paleostress axis establish a relationship between main structures and direction of stress axis during the tectonic history, and based on the litho-stratigraphy unit (Fig.1).

2-1- Slickenlines analysis

Analysis of fault slickenline is the most reliable way to access the distribution of paleostress. Indeed, in term of structural form based on the same tectonic stress regime. Finding them in proportion to the age and type of rocks units forming the area seems logical and will result in the least error. In order to access this purpose is used, the slickenline data of fault plane (Fig. 2).

* Corresponding author: ayobsaahimi@gmail.com

DOI: 10.22055/AAG.2019.28201.1924

Received 2019-01-12

Accepted 2019-05-17

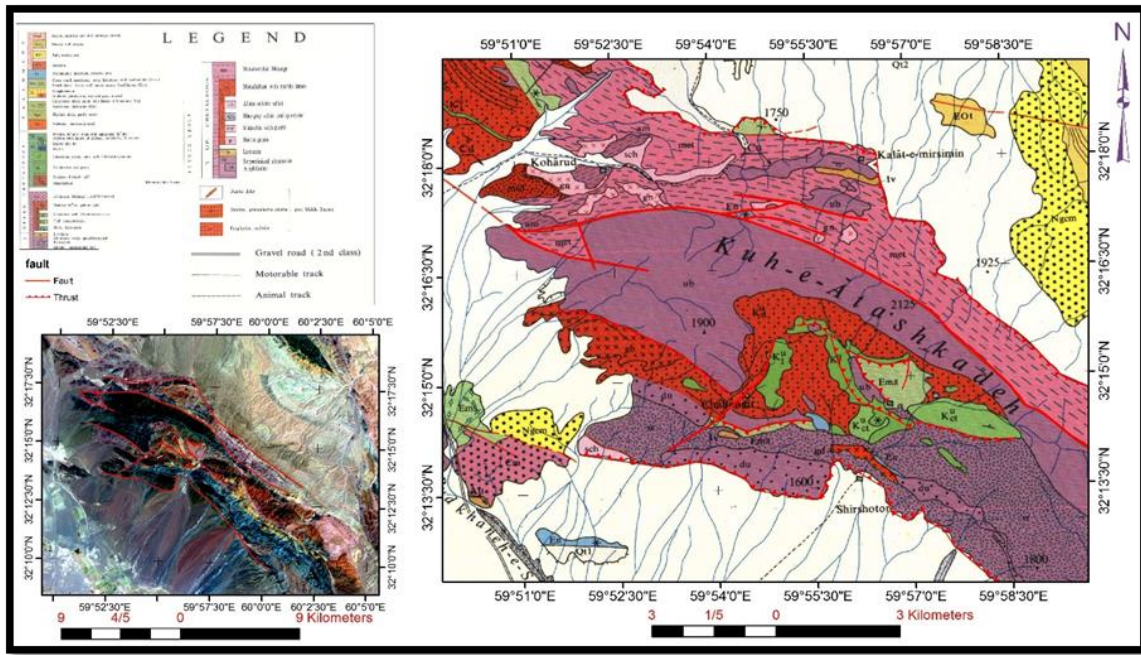


Figure 1. Geological map of the study area. Taken from Shall Abad 1/100000 map.

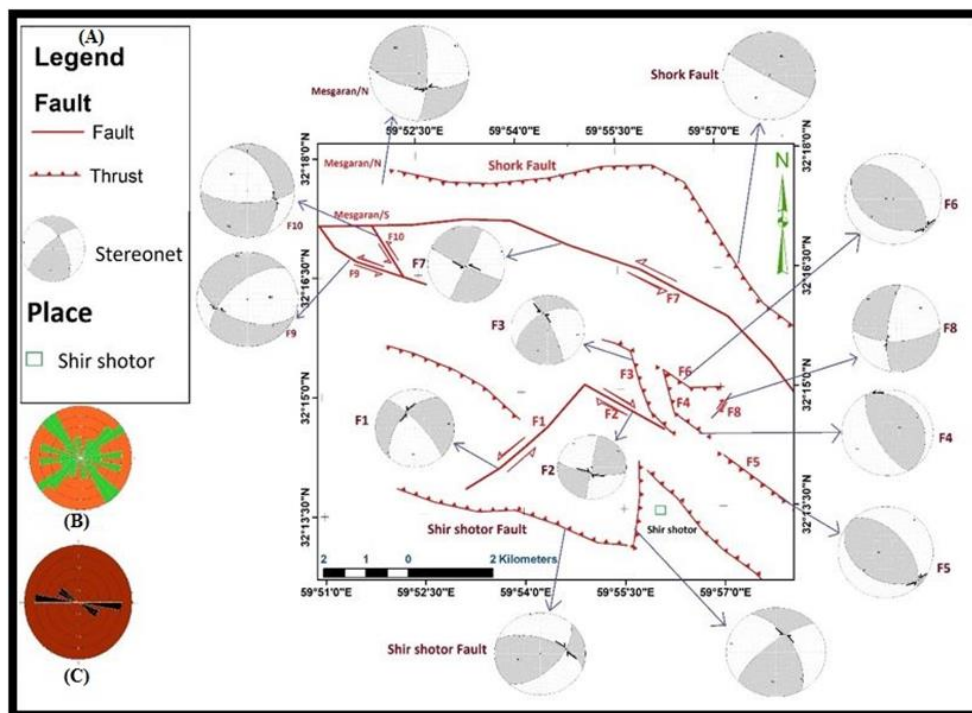


Figure 2. (a) Structural map of the study area, (b) Rose diagram of the area's veins (c) Rose diagram of the area's foliations.

It is important to note that patterns of stress change over time, and it affects the fault-plates of several stresses that are the result of the effects of stresses generations in the area. In order to reach the acceptable results in studying the maximum stress direction changes during the tectonic history of the study area, we have considered slickenline, which has been created by given stress. For this purpose, stress analysis should first be applied to the slickenline data extracted from the unit of stone young (sandstone to Eocene age). At the next stage, by removing the stress field that creates it from the data

obtained from the older units that are to Cretaceous age, we will find the paleostress field old dominant governing the area.

2-2- Structures

By using the results of the analysis of the structural elements and combining them with the results of the analysis of the paleostress, helps in finding the development of deformation and its history. Among these elements, which have good abundance, one can mention the foliation and veins.

In order to determine the paleostress is collected from field data, especially outside and inside of the faults zone, and then processed in Win-Tensor, FaultKin, Tectonics FP and Dips software. Also, to determine the paleostress, several paleostress analysis methods used and compared together. Moreover, finally, a paleostress map was drawn for the study area.

3-Results and discussion

In order to extract the variation of tension regime, so the analysis of the structural elements initially investigated. Then, slicken lines data extracted from paleostress methods with an analysis of the primary faults. After that, the result processed in Win-Tensor and Tectonics FP software. Variation of maximum stress (σ_1) is based on the relative age of rock units in major faults during the tectonic history. Ultimately, the final result is coming in table 1 and the paleostress map (Fig.3).

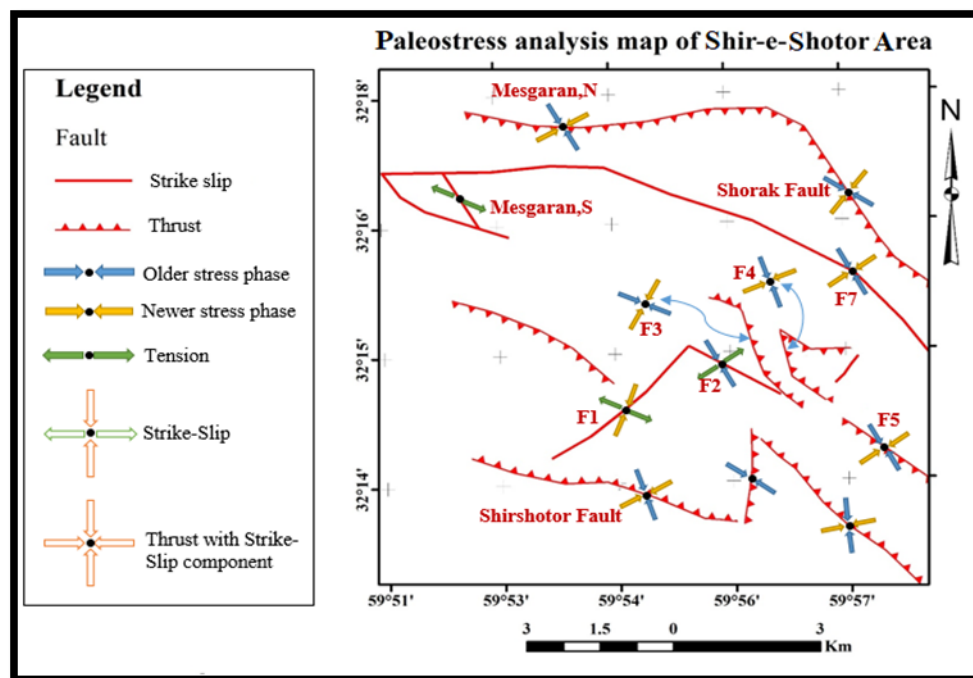


Figure 3. Paleostress analysis map of Shir-e-Shotor area.

4-Conclusions

In the study area, Result indicates at last two trends of NW-SE and NE-SW by using faults slicken line. The first trend formed under the NW - SE stress regime with an angle of 20 to 30 degrees and the next trend formed under the current NE-SW regime. Most of these faults represent strike-slip mechanism with the reverse component.

Among the other structural elements studied, we can mention the foliations with E-W to NW-SE direction, so it indicates the rule of an N-S to NE-SW stress regime. Also, the variation of foliations represents a unique feature that is affected by the clockwise rotation of maximum.

The dominant trends of veins indicate three directions (N310-330, N80-110, and N40-60). Veins are formed in different parts of the area under a particular regime, such that the N310 to N330 ranges under the contraction regime of the area and in relation to the main faults of the area, N80 to N110, are also affected by the shear-tensile regime and the N40 the N60 is also formed under the maximum stress rotation clockwise.

According to litho-stratigraphy, it has been predominant NW - SE maximum stress from Upper Cretaceous to Eocene and NE-SW direction has affected the old and new units (Paleogene), which corresponds to the present stress regime. Values have been set for every fault.

Table 1. The characteristics of the stress field in different areas.

Row	Recreation area name	σ_1 (Az/Pl)	σ_2 (Az/Pl)	σ_3 (Az/Pl)	Elliptical stress Φ	Tectonic regime	stony unit	Age of Unit
1	Shirshotor Fault	344/08	079/32	242/57	0.5	Compression-shear	Serpentine	Upper Cretaceous
2	Fault center Shirshotor	288/03	021/49	196/41	0.5	Compression-shear	Donitz and Serpentine	Upper Cretaceous
3	F1	208/19	049/70	301/07	0.7	Tension-Shear	Diabase and Lime	Cretaceous
4	F2	324/11	191/75	056/11	0.5	Shear	Diabase and Lime	Cretaceous
5	F3	136/11	227/05	342/78	0.5	Compression-shear	Lime	Cretaceous
6	F4	064/05	333/07	190/82	0.5	Compression-shear	Altorbazik	Cretaceous
7	F5	052/25	151/20	275/57	0.5	Compression-shear	Tuff and serpentine	Cretaceous
8	F7	067/14	167/35	319/51	0.4	Compression-shear	Serpentine altorbazik	Cretaceous
9	F8	052/20	194/65	317/14	0.5	Tension-Shear	Sandstone	Paleogene
10	North Mesgaran	220/15	312/08	071/73	0.5	Compression-shear	Albite and sericite schist	Cretaceous
11	South Mesgaran	125/63	234/09	329/25	0.3	Tension	Metamorphic	Cretaceous
12	Shorak Fault	212/33	302/01	034/57	0.5	Compression	Metamorphic	Cretaceous

References

- Anderson, E. M., 1951. The Dynamics of Faulting. Edinburgh, Oliver and Boyd.
- Angelier, J., 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the areal stress. *Geophysic.Journal. International* 103, 363-376.
- Angelier, J., Mechler, P., 1977. Surune method graphique de recherche des constraints principes egalement utilisable en tecyonique et en seismologie: la method des diedrs droits. *Bull. Soc. Geol. Fr.* 19, 1309-1318.
- Arthaud, P., 1969. Method de deformation graphique des direction de raccourcissement, d' allongement ET intermediaire d'une population de failles. *Bull. Soc. Geol. De France* 7, 729-737.
- Carey, E., Brunier. B., 1974. Analyse theorique et numerique d'un modele mecanique elementaire applique a l'etude d'une population de failles. *Comptes Rendus de l'Academie des Sciences* 279, 891-894.
- Mousavi, M., 2011. Analysis of the paleostress phases by inversion method measured with using fault plane in south of Birjand. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, 200 pp.
- Ramsay, J.G., Lisle, R.J., 2000. The techniques of modern structural geology. Volume 3: Applications of continuum mechanics in structural geology. Academic, San Diego, Calif.
- Yamaji, A., 2000. The multiple inverse methods: A new technique separate stresses from heterogeneous fault slip data. *Journal of Structural Geology* 22, 441-45.

تحلیل تنش دیرینه در منطقه شیرشتر (یکی از شاخه‌های شمالی گسل نهبندان)

ایوب سهیمی*

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

سید مرتضی موسوی

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

محمد مهدی خطیب

گروه زمین‌شناسی، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۲/۲۷

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۱۰/۲۲

*ayobsaahimi@gmail.com

چکیده

از دیدگاه زمین ساخت منطقه مورد مطالعه در زون زمین‌درز سیستان واقع شده است. هدف این پژوهش بررسی تغییرات راستای تنش بیشینه (σ_1) در طول تاریخچه زمین ساخت منطقه با کمک نشانگرهای ساختاری موجود در منطقه شیرشتر (جنوب شرق سربیشه) می‌باشد که از جمله این نشانگرها می‌توان به گسل‌ها، برگوارگی‌ها و رگه‌ها اشاره کرد. برای بررسی تغییرات تنش دیرین منطقه از روش‌های مختلف تحلیل تنش دیرینه بر روی مشخصات هندسی حرکتی گسل‌های منطقه به کمک نرم افزارهای مربوطه استفاده شده است که نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که منطقه مورد پژوهش دو راستای رژیم تنشی را در طول تاریخچه زمین ساختی بر اساس سن واحدهای سنگی تجربه کرده است. راستای اولیه تنش بیشینه به صورت شمال باختری - جنوب خاوری از زمان کرتاسه تا قبل از ائوسن بر منطقه حاکم بوده و راستای تنش شمال خاوری - جنوب باختری از زمان ائوسن تا زمان کنونی حاکم بوده است که با راستای رژیم کنونی منطقه همخوانی دارد. همچنین با تلفیق نتایج بدست آمده از تحلیل تنش با نتایج بدست آمده از جنبش‌شناسی برگوارگی‌ها و رگه‌های منطقه مورد مطالعه، تغییرات راستای تنش بیشینه (σ_1) چرخش ساعتگرد را نشان می‌دهد.

کلمات کلیدی: زون زمین درز سیستان، منطقه شیرشتر، تحلیل تنش دیرین، جنبش‌شناسی برگوارگی‌ها و رگه‌ها، چرخش ساعتگرد

مقدمه

الگوهای زمین ساختی از ژوراسیک تا عهد حاضر در حوضه رسوبی کپه داغ با روش دو وجهی عمود بر هم (Navabpour, 2006) و بررسی تغییرات شکل میدان تنش در اطراف حفره‌های فروکش و محل فرار آب از زیر تاخ سد لار در البرز مرکزی با بهره‌گیری از روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای (Eliasi, 2009) انجام شده است. تفکیک فازهای تنش دیرین به روش برگشتی از صفحه گسلی در جنوب بیرجند نشان می‌دهد که در منطقه مورد نظر، حداقل دو راستای تنش عملکرد داشته است که با تغییر جهت این راستاها، باعث تغییر ساختاری و همچنین ایجاد محیط کششی شده است (Mousavi, 2011).

روش کار

به منظور شناخت آرایش محوره‌های تنش دیرین، از برقراری ارتباط بین ساختارهای اصلی و جهت‌گیری‌های تنش در طول تاریخچه زمین ساختی منطقه بر اساس سن واحد سنگی منطقه به دو صورت بهره گرفته‌ایم.

تحلیل خط‌خس‌های گسلی

تجزیه و تحلیل خط‌خس‌های گسلی مطمئن‌ترین روشی در دستیابی به توزیع تنش دیرین می‌باشد به شرط این که تحت‌تأثیر یک میدان تنش معین ایجاد شده باشند. بنابراین بهره‌گیری از آنها در منطقه متناسب با سن و نوع واحدهای سنگی تشکیل‌دهنده‌ای منطقه امری منطقی به نظر می‌رسد و کمترین خطا را در پی خواهد داشت. برای دستیابی به این منظور از داده‌های خط لغزی صفحات گسله گسل‌های منطقه استفاده شده است (شکل ۲).

مطالعات نوین زمین‌شناختی نشان می‌دهد که سنگ‌کره در زمان و مکان در حال فرگشت بوده است از این رو پی‌بردن به جهت تنش‌های دیرین برای تفسیر چگونگی پیدایش ساختارها و مراحل دگرریختی از اهمیت فراوانی برخوردار است. پیش از این بازسازی تنش دیرین بر مبنای تحلیل داده‌های زمین ساخت شکننده با استفاده از گسل‌های هم یوغ (Anderson, 1951)، سطوح حرکتی گسل‌ها (Arthaud, 1969)، روش دو وجهی عمود برهم (Angelier and Mechler, 1977)، روش دو وجهی عمود برهم (Angelier and Mechler, 1977)، روش برگشتی (Carey and Brunner, 1974; Angelir, 1990; Ramsey and Lisle, 2000) و روش وارون‌سازی چند مرتبه‌ای (Yamaji, 2000) صورت پذیرفته است. تیبالدی و همکاران (Tibaldi et al., 2010) یک تقسیم‌بندی در خصوص رابطه بین نفوذ توده‌های آتشفشانی و نیمه آتشفشانی با محیط‌های مختلف زمین‌ساختی، ارائه نموده‌اند. آنها معتقدند، پدیده خروج توده‌های آتشفشانی در مرزهای زمین ساخت برخوردی در طول گسل‌های امتدادلغز و شکستگی‌های کششی ایجاد شده در جهت σ_3 شکل می‌گیرند. در مرزهای فروانش خروج توده‌های آتشفشانی در اثر سازوکار فشاری و یا فشاری - برشی ایجاد می‌شوند و نهایتاً در مناطق داخل صفحات، این پدیده در راستای گسل‌های معکوس یا امتدادلغز مزدوج و در جهت موازی با σ_1 تشکیل می‌شوند. نمونه‌های از تعیین وضعیت تنش در ایران نیز با مطالعه تنش نوزمین ساختی لبه جنوبی البرز مرکزی به کمک روش برگشتی (Abbasi and Borojeni, 2004)، تعیین

لیستونیتی، شیل‌های ارغوانی رنگ رادیولردار و آهک‌های ماسه‌ای رخنمون دارند.

۲- رسوبات رخساره فلیش، که درکل منطقه پراکندگی داشته ولی در بخش‌های باختری و جبهه شمالی نسبت به بقیه مناطق، آمیزه‌های رنگین را بیشتر همراهی می‌کنند. واحد‌های مذکور به دو دسته با سن متفاوت کرتاسه پسین و پالئوس تقسیم‌بندی می‌شوند. بخشی از آن‌ها که در برگیرنده شیل، ماسه سنگ، شیل ماسه‌ای و تداخل‌هایی از آهک‌های نازک لایه می‌باشد و همراه با سنگ‌های بازیک و الترابازیک، آمیزه‌های رنگین منطقه را تشکیل می‌دهند و در اثر دگرگونی ناحیه‌ای در بیشتر بخش‌ها تا حد فیلیت و اسلیت دگرگون شده‌اند. بخش دیگر شامل شیل‌های فیلیتی - ماسه‌ای، گاه ارغوانی رنگ به همراه آهک‌های ماسه‌ای رنگ روشن (کرم تا قهوه‌ای) می‌باشند، که کمتر تحت تأثیر دگرگونی قرار گرفته‌اند و سن آن‌ها را به پالئوسن نسبت می‌دهند (Stocklin et al., 1972).

۳- سنگ‌های آتشفشانی حد واسط که بیشتر ترکیب داسیتی و آندزیت - داسیتی داشته و دارای سن ائوسن بالایی می‌باشند (Stocklin et al., 1972) این سنگ‌ها در بخش‌های مرکزی و باختری منطقه، رخنمون بیشتری دارند.

بحث

برای پی بردن به نحوی تغییرات رژیم تنش‌ی منطقه مورد مطالعه ابتداء به تجزیه و تحلیل عناصر ساختار منطقه پرداخته می‌شود و در ادامه آن با استفاده از داده‌های خش لغز برداشته شده از گسل‌های اصلی منطقه توسط روش‌های تعیین تنش دیرین به کمک نرم افزارهای مربوطه (Win-Tensor و Tectonics FP)، نحوی تغییرات راستای تنش بیشینه (σ_1) بر اساس سن نسبی واحدهای سنگی در برگیرنده گسل‌های اصلی در طول تاریخچه زمین ساختی محدوده مورد مطالعه پرداخته می‌شود که نتیجه نهایی آن تدوین جدول ۵ و رسم نقشه تنش دیرین (شکل ۱۴) برای محدوده مورد مطالعه می‌باشد.

گسل‌ها

گسل‌های منطقه مورد مطالعه دو دسته‌ای کلی تراستی و امتداد لغز با مؤلفه‌های شیئی معکوس و نرمال تقسیم می‌شوند. گسل‌های با امتداد شمال باختری - جنوب شرقی، گسل‌های اصلی منطقه هستند که می‌توان به گسل تراستی شورک در شمال منطقه با راستای N300/87SW و گسل شیر شتر در حد جنوب منطقه با هندسه N110-160/60NE اشاره کرد. گسل‌های فرعی گسل‌های هستند که در اثر تغییرات رژیم تنش‌ی به صورت محلی ایجاد شده‌اند که در بازدید صحرایی دارای امتداد شمال خاوری - جنوب باختری (مانند F1 و F8) در منطقه مورد مطالعه می‌باشند (شکل ۳ و ۲).

توجه به این نکته که الگوهای تنش در طی زمان تغییر می‌کنند و بر روی صفحات گسلی چندین خش لغز که نتیجه اثر نسل‌های تنش‌ی در منطقه است نقش می‌بندد، حائز اهمیت است. برای رسیدن به نتایج قابل قبول در بررسی تغییرات راستای تنش بیشینه در طول تاریخچه زمین ساختی منطقه مطالعاتی، خش لغزهای را در نظر گرفته‌ایم که در اثر یک تنش معین ایجاد شده باشند به این منظور ابتداء باید تحلیل تنش بر روی داده‌های خش لغزی برداشت شده از واحد سنگی جوان (ماسه سنگ به سن ائوسن) صورت گیرد و در مرحله بعدی با حذف میدان تنش‌ی ایجاد کننده آن از داده‌های بدست آمده از واحدهای قدیمی تر که به سن کرتاسه هستند، به میدان تنش دیرین حاکم بر منطقه پی خواهیم برد.

ساختارها

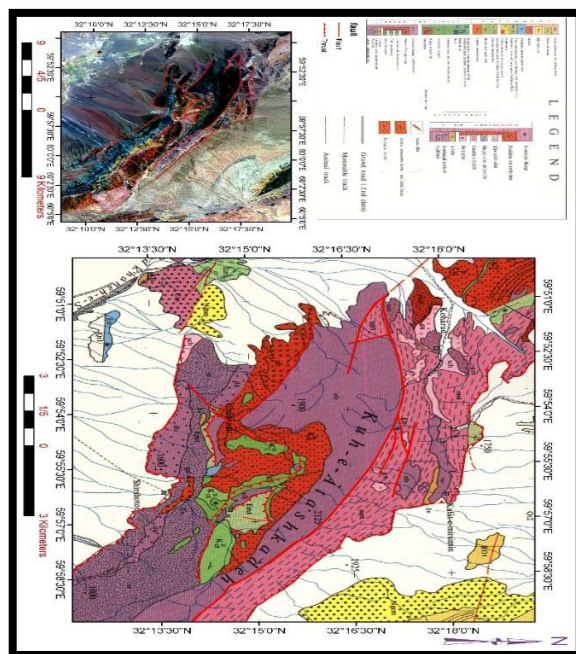
استفاده از نتایج حاصل از تجزیه و تحلیل عناصر ساختاری موجود در منطقه و تلفیق نتایج آن با نتایج حاصل از تحلیل تنش دیرین، کمک شایان در جهت پی بردن به نحوی پیشروی دگربرختی و تاریخچه آن می‌کند. از جمله این عناصر که از فراوانی خوبی در منطقه برخوردارند می‌توان به برگراری‌ها و رگه‌ها اشاره کرد.

جهت تعیین تنش دیرین، از دورن و بیرون پهنه‌های گسل‌ها منطقه برداشت‌های ساختاری به شیوه مستقیم صحرایی صورت پذیرفته و سپس در نرم افزارهای win-Tensor, FaultKin, Tectonics FP و Dips پردازش شده است. همچنین جهت تعیین تنش دیرین از چند روش تحلیل تنش استفاده و با هم مقایسه شده‌اند و در آخر نقشه تنش دیرین برای منطقه مورد مطالعه ترسیم گردید.

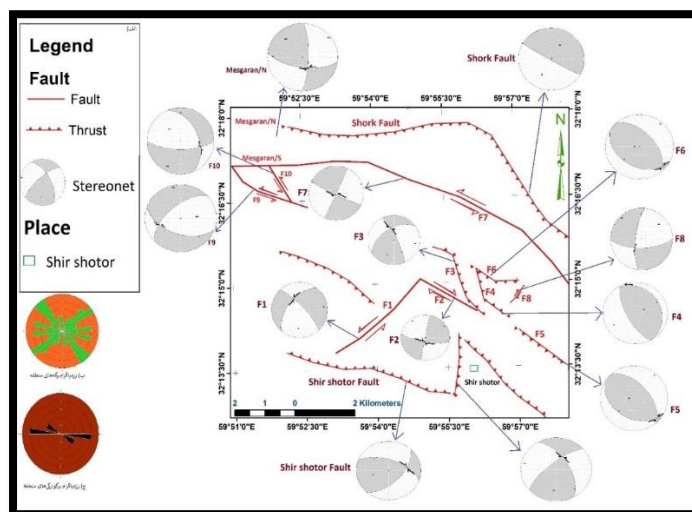
موقعیت زمین شناسی و زمین ساختی منطقه

محدوده مورد مطالعه در خاور ایران، در عرض جغرافیایی ۱۲' ۳۲° تا ۱۷' ۳۲° و طول جغرافیایی ۵۴' ۵۹° تا ۶۰° در فاصله ۶۰ کیلومتری جنوب شرق شهرستان سریشه واقع شده است. این بخش از ایران در تقسیم‌بندی‌های زمین ساختی - رسوبی که توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده با نام‌های مختلفی معرفی شده است که از جمله آنها می‌توان به منطقه فلیش و آمیزه رنگین (اشتوکلین و همکاران، ۱۳۵۲)، زمین چاک سیستان (بربریان، ۱۳۶۲)، پهنه زمین‌درز سیستان (Tirru et al., 1983) و ... اشاره نمود (شکل ۱). مهم-ترین مجموعه‌های سنگی منطقه با تکیه بر ویژگی‌های خاص زمین ساختی، به سه گروه اصلی زیر تقسیم می‌شوند (شکل ۱).

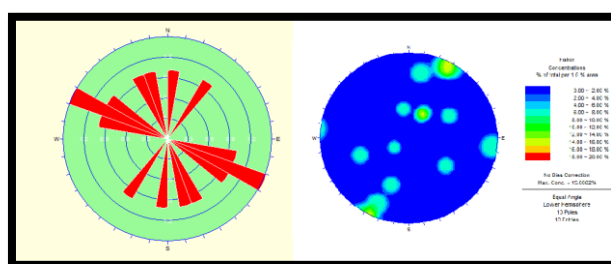
۱ - واحدهای افیولیتی و آمیزه رنگین با سن کرتاسه بالایی که درکل منطقه پراکندگی داشته و تحت تأثیر یک دگرگونی ناحیه‌ای - حرکتی درجه پایین به همراه رخساره فلیش قرار گرفته‌اند (Stocklin et al., 1972). این بخش مهم‌ترین قسمت واحدهای سنگی را از نظر حجم بیرون زدگی تشکیل داده و به صورت مجموعه درهمی از سنگ‌های الترابازیک (پریدوتیت‌ها و سرپانتینیت‌ها)، بازیک (گابروها، دایک‌های دیابازی و بالالت‌های اسپیلیتی شده)، رگه‌های



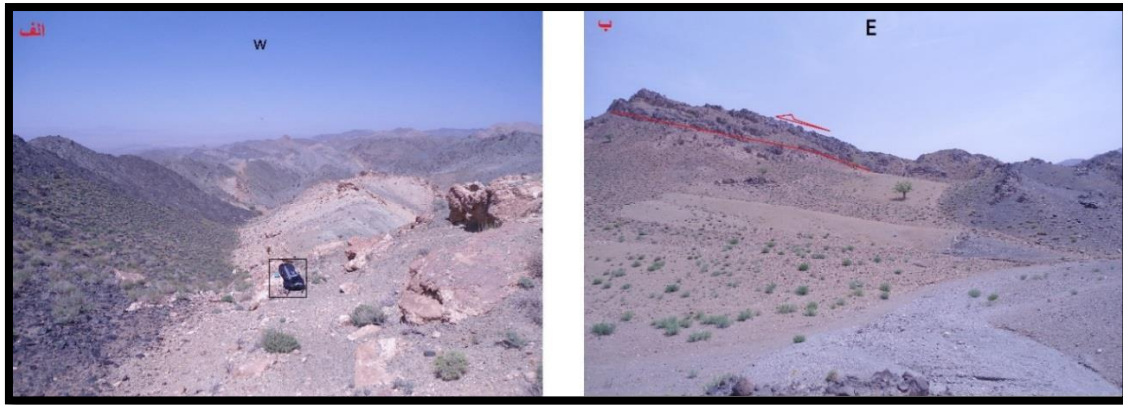
شکل ۱- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه (برگرفته شده از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ سهل آباد).
 Fig. 1. Geological map of the study area. Taken from Sahlabad Geological map 1/100000).



شکل ۲- (a) نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه، (b) روزدیگرام رگه‌های منطقه (c) روزدیگرام برگوارگی منطقه (کوه آتشدکه، روستای شیرشتر جنوب شرق سریشه).
 Fig. 2 (a) Structural map of the study area (b), Rose diagram of area veins (c), Rose diagram of area foliation (Mount Atashkade, Shirshotor village, southeast of Sarbisheh).



شکل ۳- نمودار روزدیگرام و کنتور دیگرام گسل‌های برداشت شده.
 Fig. 3. Rose diagram and contour diagram of the faults.



شکل ۴- نمای از پهنه گسله گسل شیرشتر (a) پهنه گسله قسمت شرقی گسل شیرشتر (b) نمای از راندگی بخش مرکزی گسل شیرشتر.

Fig. 4. A view of Shirshotor fault zone (a), East part of Shirshotor fault zone, (b) A view of thrusting the central part of the Shirasht fault.

برگوارگی‌های

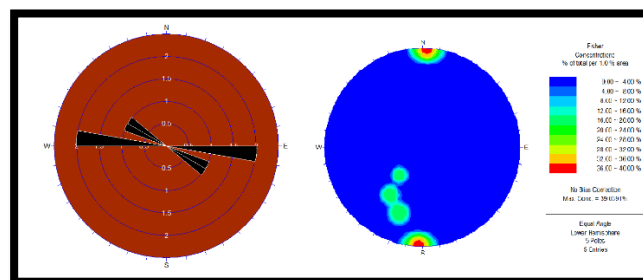
می‌باشد، ویژگی اول این است که برگوارگی دارای روند شرقی- غربی می‌باشد که عمود بر این روند رگه مزدوج کوارتز شکل گرفته است (شکل ۷). ویژگی دوم برگوارگی این قسمت از منطقه در قسمت شمالی‌تر، دارای حالت پلکانی می‌باشد و نشانه‌ای از جابجایی چپگرد را نشان می‌دهد (شکل ۸). در قسمت شمالی منطقه برگوارگی‌ها دارای هندسه N130/40NE در واحد شیل و در ارتباط با گسل F7 می‌باشند. این ویژگی‌های برگواره‌ها در قسمت‌های مختلف منطقه، متناسب با تغییرات ساعتگرد راستای تنش بیشینه (σ_1) در منطقه مطالعاتی می‌باشد.

برگوارگی‌های موجود در محدوده‌ی مورد مطالعه در بخش‌های مختلف ویژگی خاصی دارند. روند کلی آنها بیشتر شرقی- غربی، که نشان دهنده یک رژیم فشاری N-S حاکم بر منطقه می‌باشد. در قسمت جنوب منطقه، در واحد سرپانتینیتی، دارای هندسه N275-290/70-90NE و دارای حالت زیگموئیدال می‌باشد که دلیل زیگموئیدال بودن آن وجود خم فشاری در قسمت مرکزی گسل شیرشتر می‌باشد (شکل ۶). در قسمت مرکزی منطقه در واحد ماسه سنگی ائوسن، برگوارگی‌ها دارای دو ویژگی

جدول ۱- موقعیت هندسی برگوارگی‌ها و جنس واحد تشکیل دهنده‌های آنها در محدود مورد مطالعه.

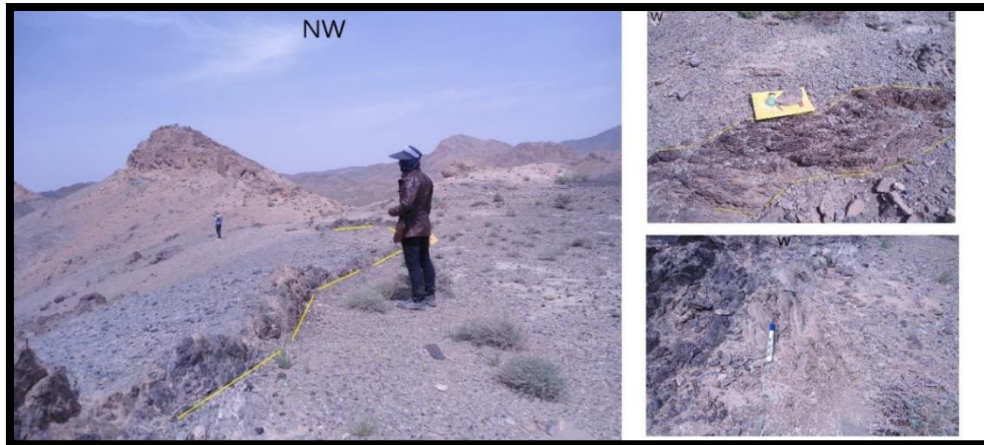
Table 1. The geometrical position of the foliation.

Lithology	Geometry position	Type of structure
Serpantinite	N290/70NE	Foliation
Sandstone	N125/60NE	Foliation
Serpantinite	N275/90	Foliation
Shale	N270/90	Foliation
Sandstone	N130/40NE	Foliation
Sandstone	N270/90	Foliation



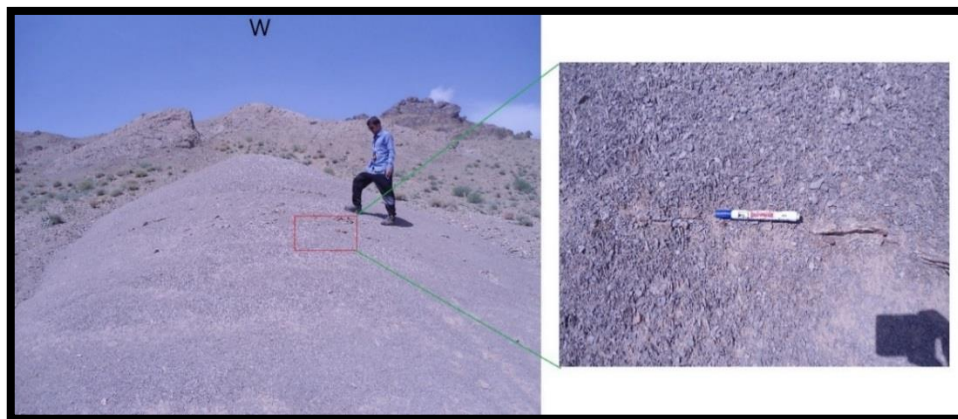
شکل ۵- رز دیاگرام و کنتور دیاگرام قطب برگوارگی منطقه مورد مطالعه.

Fig.5 Rose diagram and contour diagram of the foliations' pole.



شکل ۶- برگوارگی ایجاد شده در واحد سرپانتینیتی در قسمت جنوبی منطقه و حالت زیگموئیدال برگوارگی‌ها.

Fig. 6 Foliation created in the serpentinite unit in the southern part of the region and sigmoidal foliation state.



شکل ۷- برگوارگی در واحد ماسه سنگ و ایجاد رگه مزدوج کوارتز عمود بر برگوارگی.

Fig. 7 Foliation in sandstone units and create a quartz conjugate vein perpendicular to foliation.



شکل ۸- برگوارگی در واحد ماسه سنگ و جابه‌جایی چپگرد.

Fig.8. Foliation in sandstone unit and left-lateral displacement.

رگه‌ها

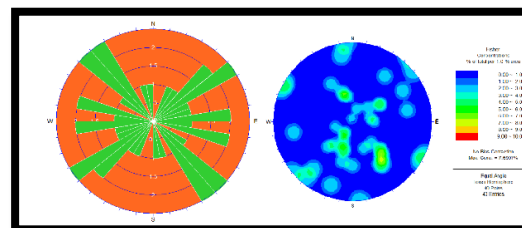
کششی هستند که تحت تأثیر رژیم تنش اولیه حاکم بر منطقه شکل گرفته‌اند. راستا N80 تا N110 رگه‌های کششی - برشی هستند که در جای که گسل‌ها تغییر سازوکار داده‌اند، تشکیل شده‌اند (مانند گسل F7). و راستا N40 تا N60 رگه‌های کششی هستند که تحت تأثیر رژیم تنش کنونی تشکیل شده‌اند (شکل ۱۰). بیشتر جنس رگه‌های برداشته شده، از سرپانتین، کلسیت و کوارتز تشکیل شده‌اند (جدول ۲).

در منطقه مورد مطالعه اندازه‌گیری رگه‌ها در قسمت‌های مختلف انجام شد. ترسیم رزدیگرام رگه‌ها بر اساس راستا، نشان داد که روند غالب رگه‌ها در سه راستا N310-330، N80-110 و N40-60 قرار دارند (شکل ۹). شکل ۱۰ نشان می‌دهد که رگه‌ها در قسمت‌های مختلف منطقه تحت رژیم خاصی تشکیل شده‌اند. به این صورت که راستا N310 تا N330 رگه‌های

جدول ۲- مشخصات رگه‌های برداشته شده از منطقه.

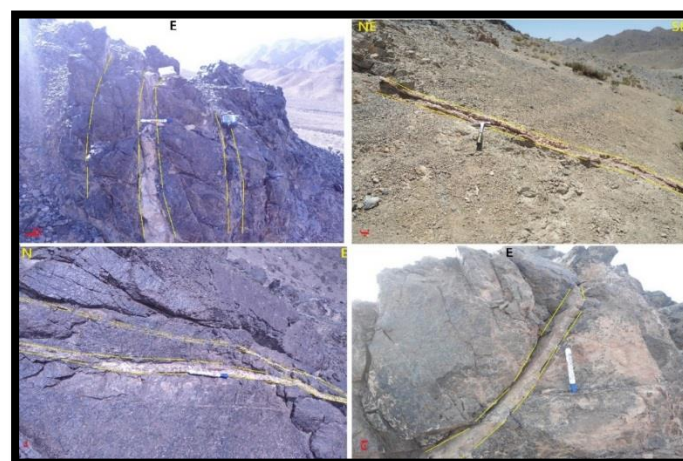
Table 2. The position of the measured veins.

Lithology vein	Geometry position	Lithology vein	Geometry position
Serpentine	N125/22NE	Serpentine	N305/70SW
Serpentine	N090/58N	Serpentine	N310/75NE
Serpentine	N205/90	Serpentine	N310/85NE
Serpentine	N328/45SW	Serpentine	N286/40NE
Serpentine	N135/48NE	Serpentine	N310/40NE
Serpentine	N048/38NW	Quartz	N295/30SW
Serpentine	N328/73SW	Quartz	N140/90
Calcite	N050/60NW	Quartz	N210/90
Quartz	N348/70SW	Quartz	N325/43SW
Serpentine	N000/30W	Quartz	N345/25SW
Serpentine	N055/67NW	Quartz	N068/40NW
Calcite	N260/36SE	Quartz	N260/80SE
Quartz	N287/20SW	Quartz	N250/38SE
Quartz	N105/55NE	Quartz	N250/05SE
Calcite	N058/64NW	Serpentine	N250/45SE
Serpentine	N047/55NW	Serpentine	N289/80NE
Serpentine	N240/58SE	Serpentine	N265/90
Serpentine	N110/42NE	Calcite	N129/18NE
Calcite	N135/30SW	Calcite	N170/74NE
Serpentine	N165/26NE	Serpentine	N045/51NW



شکل ۹- رزداگرام رگه‌ها به همراه کنکور دیاگرام قطب آنها.

Fig.9. Rose diagram veins and contour diagram of the veins' pole.



شکل ۱۰- تصاویر از رگه‌های منطقه مورد مطالعه. (a) سه رگه هم محور سرپانتین با امتداد یکسان و شیب متغییر. (b) رگه کششی نامحور کلسیت به صورت آنتی تکسیال در واحد دیاباز. (c-d) رگه‌های هم محور سرپانتین.

Fig 10. Images from the veins of the study area, (a) Three coaxial serpentine veins with similar strike and variable slope (b), Antitaxial calcitic vein in diabasic unit (c- d), Coaxial veins of serpentine.

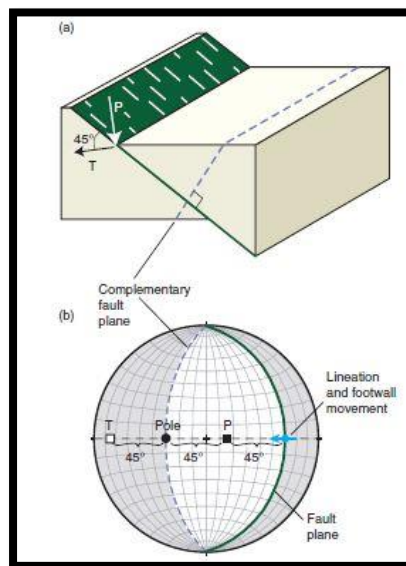
روش های تعیین موقعیت محورهای اصلی تنش

برای این پژوهش از ۱۳۰ داده های خش لغز گسلی برداشت شده از گسل های منطقه، پس از همگن کردن وارد برنامه اصلی شده و با کمک روش های مختلف تحلیل تنش دیرین، پردازش و محاسبات روی آنها صورت گرفته شد و در آخر نقشه تنش دیرین رسم گردید. این روش ها به صورت زیر می باشند:

روش دو وجهی عمود بر هم

اساس روش دو وجهی همان است که در تحلیل سازوکار کانونی زمین لرزه ها بکار میرود. شکل ۱۱ نشان می دهد که

می توان دو صفحه کمکی رسم نمود. یکی موازی صفحه گسل و دیگری عمود بر آن بطوری که خش لغزش نیز قطب آن باشد دو صفحه کمکی را در نیمکره پایین شبکه اشمیت رسم مینمایم. با توجه به نوع گسل که در اینجا نرمال است بخش محور فشارش (P) را برنگ سفید و بخش محور کشش (T) را برنگ خاکستری نشان دادیم. طبیعی است محور σ_1 به بخش تراکمی و محور σ_3 به بخش کششی دو وجهی بدست آمده تعلق دارد (Pfiffer, 1987).



شکل ۱۱- هندسه گسل و دو وجهی آن.

Fig.11. Geometry fault and dihedral Method.

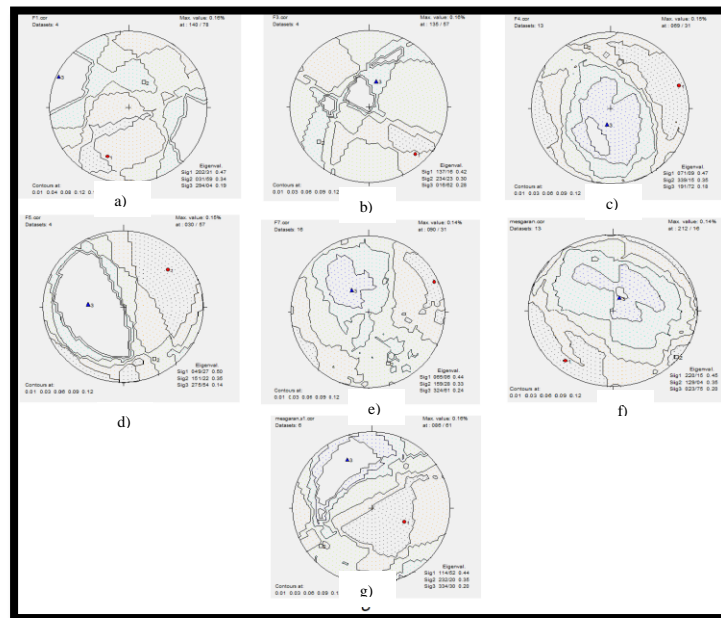
بایستی به بخش ای محوری P دو وجهی و محور σ_3 به بخش موقعیت-های T دو وجهی تعلق داشته است. (Angelier and Mechler, 1977) بر اساس روش فوق با کمک نرم افزار Tectonics FP، موقعیت محورهای اصلی تنش برای گسل های منطقه محاسبه گردید که موقعیت آنها در جدول زیر بدست آمده است:

به این ترتیب زمانی که دو یا چند گسل تحت یک رژیم تنشی کاملاً مشخص قرار گیرند (بعبارت دیگر موقعیت محورهای اصلی تنش معلوم و فاکتور شکل نیز مشخص می باشد) با توجه به تئوری Wallace Bott محورهای اصلی تنش برای کلیه سازوکارهای گسل های برداشت شده میبایستی متعلق به یک دو وجهی مشترک باشد. به عبارت دیگر σ_1 می-

جدول ۳- موقعیت محورهای تنش دیرین محاسبه شده به روش دو وجهی عمود بر هم بر روی گسل های منطقه.

Tabel.3. Location of paleostress stress axes to Right dihedral method.

Faults	σ_1 (Az/Pl)	σ_2 (Az/Pl)	σ_3 (Az/Pl)
F1	202/31	031/59	294/04
F3	137/16	234/23	016/62
F4	071/09	339/15	191/72
F5	049/27	151/22	275/74
F7	065/06	159/28	324/61
Mesgaran/N	220/15	129/04	023/79
Mesgaran/S	114/52	232/20	334/30



شکل ۱۲- موقعیت محوره‌های تنش دیرین محاسبه شده به روش دو وجهی عمود بر هم بر روی گسل‌های منطقه: (a) گسل F1، (b) گسل F3، (c) گسل F3، (d) F4، (e) گسل F5، (f) مسگران شمالی، (g) مسگران جنوبی.

Fig.12. Location of paleo stress axes to right dihedral method (a), Fault F1 (b), Fault F2 (c), Fault F3 (d), Fault F4 (e), Fault F5 (f), Fault F6 (g), Fault F7 (I), North Mesgaran (J), South Mesgaran.

رژیم‌ها، مقدار تنش از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$R = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3} \quad \text{رابطه ۱}$$

که مقادیری R نوسانی از صفر تا یک است. زمانی که مقدار نزدیک به ۰.۵ (صفحه تنش)، رژیم تنش کششی/ امتدادلغز/ فشاری محض هستند. تغییر از یک حالت به حالت دیگر از سه رژیم‌ها، با مقدار R مخالف است. هنگامی که رژیم کششی به $R=1$ معادل رژیم امتدادلغز با $R=1$ می‌باشد. مشابه با رژیم امتدادلغز با $R=0$ معادل رژیم فشاری با $R=0$ است. دامنه‌ای از رژیم‌های تنش که توسط Delvaux et al; 1997 به شاخص رژیم تنش R' با توصیف عددی به صورت زیر می‌باشد:

$$\diamond R' = R \quad \text{زمانی که } \sigma_1 \text{ قائم است (رژیم تنش کششی).}$$

$$\diamond R' = 2 - R \quad \text{زمانی که } \sigma_2 \text{ قائم است (رژیم تنش امتدادلغز).}$$

$$\diamond R' = 2 + R \quad \text{زمانی که } \sigma_3 \text{ قائم است (رژیم تنش فشاری).}$$

R' با مقادیر از ۰.۵ برای کشش محض، ۱ برای کشش امتدادلغز، ۱.۵ برای امتدادلغز محض، ۲ برای امتدادلغز فشاری و ۲.۵ برای فشاری محض را دارد. رژیم تنش میانگین گاهی با نام تراکشش برای گذر بین کشش و امتدادلغز و ترافشارش برای گذر بین امتدادلغز و فشارش هستند.

در ناحیه مورد مطالعه ضروی است تا جهت رژیم تنش ناحیه‌ای اصلی بدست آید. این بر روی محاسبه‌ی SH_{max} , SH_{min} و محور تنش σ_v بوسیله جمع برداری، بحساب آوردن تعدادی از داده‌های لغزش گسلی برای وارن سازی تنش از هر تنسور باشد. مشابه میزان تنش محاسبه شده از میانگین میزان شاخص تنش R' که در بالا تعریف شده است. در این روش، موقعیت محوره‌های σ_1 , σ_2 و σ_3

روش تعیین موقعیت محوره‌های فشار (P)، محوره‌های

کشش (T) و دو وجهی راست

در این روش از رسم موقعیت گسل و قطب آن را بر روی استریونت با رسم دایره بزرگی که قطب و خش لغزش گسلس عبور می کند، موقعیت محوره‌های P و T مشخص می شوند (Marret and Allmendinger, 1990). با این روش در منطقه مورد مطالعه توزیع محوره‌های P و T تعیین گردید. (شکل ۱۳) و همچنین با مقایسه موقعیت محوره‌های P و T با موقعیت محوره‌های اصلی تنش بدست آمده از روش دو وجهی راست، موقعیت تنش دیرین تعیین گردیده است.

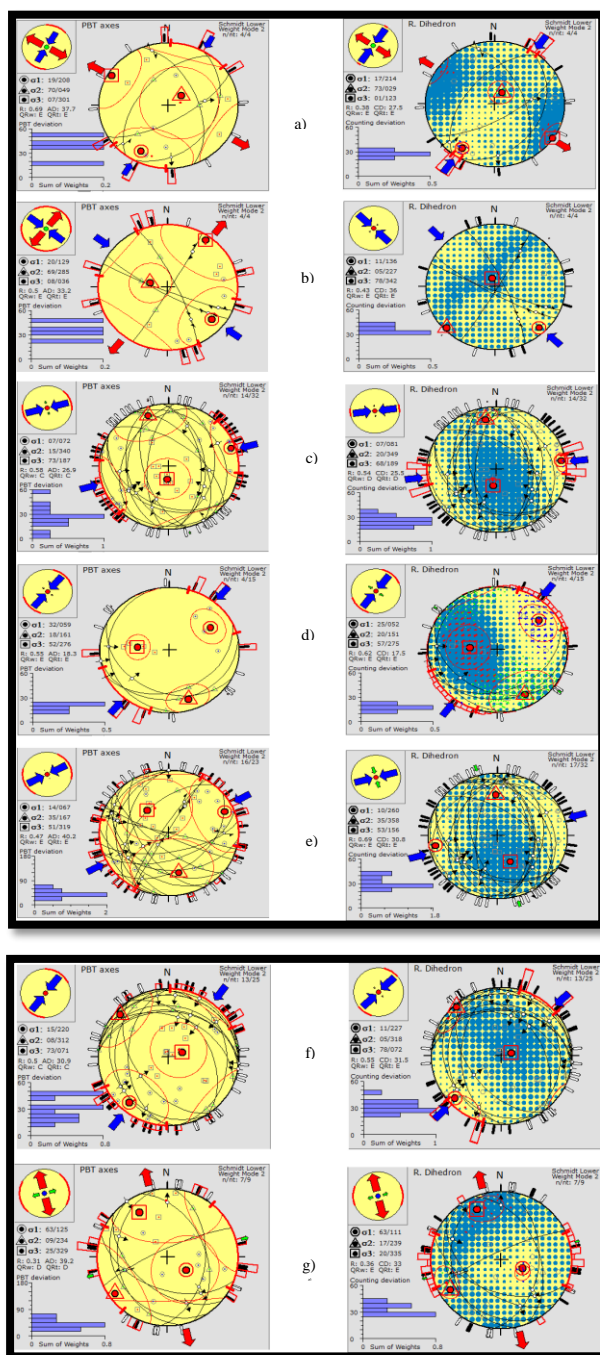
برای مشخص کردن موقعیت محوره‌های اصلی تنش های دیرین در منطقه مورد مطالعه با استفاده از نرم افزار win-Tensor، ابتدا موقعیت محوره‌های P, B و T با روش معکوس کردن بطور مستقیم با اعمال زاویه اصطکاک ۳۰ درجه تعیین شد و با مقایسه آنها با موقعیت محوره‌های اصلی بدست آمده از روش دو وجهی راست بر روی گسل‌های منطقه موقعیت تنش دیرین بر روی هر یک از گسل در شکل ۱۳ بدست آمده است.

شاخص شکل بیضوی تنش R' در منطقه مورد مطالعه

رژیم تنش می‌تواند با توضیح عددی با شاخص رژیم تنش توسط (Delvaux et al., 1997) تعریف گردید. رژیم‌های تنش اصلی یک تابعی از موقعیت محوره‌های اصلی تنش و شکلی از بیضوی تنش هستند: کشش وقتی که σ_1 عمود می‌باشد، امتدادلغز زمانی که σ_2 عمود است و فشارشی وقتی که σ_3 عمود است. برای هر یک از

محورهای تنش (در اصطلاحاتی از SHmax, SHmin و Sv) و رژیم تنش (کششی، امتدادلغز و فشاری) که با آزمون و پلانژ مشخص شده‌اند. حالا ما ترجیح می‌دهیم فقط از میانگین آزمون SHmax و میانگین شاخص رژیم تنش R' که در بالا مشخص شده است استفاده کنیم. این دو پارامتر بطور کامل شرح داده شد و موقعیت

ارزیابی شده با SHmax, SHmin و Sv یک تابع از رژیم تنش (کششی، امتدادلغز و فشاری) که با آزمون و پلانژ مشخص شده‌اند. حالا ما ترجیح می‌دهیم فقط از میانگین آزمون SHmax و میانگین شاخص رژیم تنش R' که در بالا مشخص شده است استفاده کنیم. این دو پارامتر بطور کامل شرح داده شد و موقعیت



شکل ۱۳- موقعیت محورهای تنش دیرین محاسبه شده به روش محورهای فشارشی، کششی سمت چپ و دوجهی سمت راست تصویر. (a) گسل F1؛ (b) گسل F3؛ (c) گسل F4؛ (d) گسل F5؛ (e) گسل F7؛ (f) مسگران شمالی؛ (g) مسگران جنوبی.

Fig.13. Location of paleostress axes to Right dihedral method left of image and P, T axial right of image (a), Fault F1 (b), Fault F2 (c), Fault F3 (d), Fault F4 (e), Fault F5 (F), Fault F6 (g), Fault F7 (I), North Mazagran (J), South Mazagran.

جدول ۴- پارامترهای محاسبه شده از داده برداشتی منطقه.

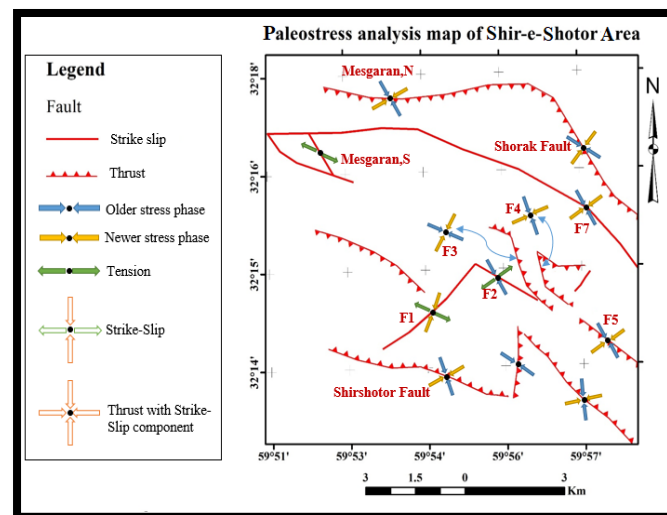
Tabel.4. Parameters calculated from data harvested area.

Location	N	%/n total	R%	SHmax	SHmin	R'	Reg
Shirshotor fault	3	33	52	161	71	2,5	TF
Central Shirshotor fault	6	50	20	117	27	1,5	SS
F1	4	100	30	30	120	1,31	NS
F3	4	100	84	135	45	2,43	TS
F4	32	43	42	64	156	2,46	TS
F5	15	26	10	37	127	2,62	TF
F7	32	50	36	62	152	2,47	TS
Mesgaran/N	25	52	20	38	128	2,5	TF
Mesgaran/S	9	77	48	76	166	0,31	NS

جدول ۵- ویژگی‌های میدان تنش در مناطق مختلف برداشتی.

Tabel. 5. Characteristics of stress field in different harvesting zones.

Age unit	Rock unit	Tectonic regime	Ellipsoide StressΦ	σ_3 (Az/Pl)	σ_2 (Az/Pl)	σ_1 (Az/Pl)	Location	N o
uper Cretaceous	Serpantinite	Compersional-shear	0.5	242/57	079/32	344/08	Shirshotor fault	1
uper Cretaceous	Donite-Serpantinite	Compersional-shear	0.5	196/41	021/49	288/03	Central Shirshotor fault	2
Cretaceous	Diabas, Limestone	Tensional-shear	0.7	301/07	049/70	208/19	F1	3
Cretaceous	Diabas, Limestone	shear	0.5	056/11	191/75	324/11	F2	4
Cretaceous	Limestone	Compersional-shear	0.5	342/78	227/05	136/11	F3	5
Cretaceous	Ultrabasic	Compersional-shear	0.5	190/82	333/07	064/05	F4	6
Cretaceous	Tuff, Serpantinite	Compersional-shear	0.5	275/57	151/20	052/25	F5	7
Cretaceous	Ultrabasic-Serpantinite	Compersional-shear	0.4	319/51	167/35	067/14	F7	8
Paleogene	Sandstone	Tensional-shear	0.5	317/14	194/65	052/20	F8	9
Cretaceous	Albite, sericite	Compersional-shear	0.5	071/73	312/08	220/15	Mesgaran/N	10
Cretaceous	Metamorphic	Tensional	0.3	329/25	234/09	125/63	Mesgaran/S	11
Cretaceous	metamorphic	Compersional	0.5	034/57	302/01	212/33	Shork fault	12



شکل ۱۴- نقشه تنش دیرینه منطقه مورد مطالعه (Sashimi, 2017).

Fig. 14. Paleostress Analysis map of area (Sashimi, 2017).

نتیجه گیری

روند غالب رگه‌ها در سه راستا N310-330، N80-110 و N40-60 قرار دارند. که این رگه‌ها در قسمت‌های مختلف منطقه تحت رژیم خاصی شکل گرفته‌اند، به این صورت که راستا N310 تا N330 تحت رژیم فشاری حاکم بر منطقه و در ارتباط با گسل‌های اصلی منطقه، راستا N80 تا N110 هم تحت اثر رژیم برشی-کششی و راستا N40 تا N60 هم تحت چرخش راستگرد تنش بیشینه تشکیل گردیده‌اند.

طبق زمان واحد سنگی در برگیرنده گسل‌ها، تنش بیشینه شمال باختری - جنوب خاوری از کرتاسه بالای به بعد بر منطقه حاکم بوده است. و راستای شمال خاوری- جنوب باختری در واحدهای قدیمی و جدید (پالئوژن) تاثیر گذاشته است که با تنش کنونی حاکم بر منطقه همخوانی دارد که مقادیر آن بر روی هر گسل در جدول ۵ تعیین شده است.

از بررسی گسل‌های منطقه، گسل‌های منطقه دارای دو روند NW-SE و NE-SW می‌باشند که روند اولی تحت رژیم تنش شمال غرب - جنوب شرق با یک زاویه ۲۰ تا ۳۰ درجه تشکیل شده‌اند و روند دومی تحت رژیم کنونی شمال شرق-جنوب غرب تشکیل شده‌اند. سازوکار بیشتر این گسل‌ها امتدادلغز با مؤلفه شیئی معکوس می‌باشد. از عناصر ساختاری دیگر بررسی شده در منطقه می‌توان از برگوارگی‌ها نام برد که بیشتر برگوارگی دارای روند شرقی - غربی تا شمال غرب - جنوب شرق می‌باشند که این راستای برگوارگی‌ها حکایت از حاکم بودن یک رژیم تنش شمالی- جنوبی تا شمال شرق- جنوب غرب بر منطقه بوده است. همچنین برگوارگی‌ها در قسمت‌های مختلف منطقه، دارای ویژگی خاصی هستند که متأثر از تغییرات راستگرد تنش بیشینه در منطقه ایجاد شده‌اند.

منابع

- Abbasi, M., Shebani Brojeni, A., 2004. Determination of Stress Status Using the inversion Method of the South-Central Alborz Fault Plates. *Journal of Geosciences* 55, 2-17.
- Anderson, E.M., 1951. *The Dynamics of Faulting*. Edinburgh, Oliver and Boyd.
- Angelier, J., 1990. Inversion of field data in fault tectonics to obtain the regional stress. *Geophysics Journal International* 103, 363-376.
- Angelier, J., Mechler, P., 1977. Sur une méthode graphique de recherche des contraintes principales également utilisable en tectonique et en séismologie: la méthode des dièdres droits. *Bull. Soc. Geol. Fr* 19, 1309-1318.
- Arthaud, P., 1969. Méthode de déformation graphique des directions de raccourcissement, d'allongement et intermédiaire d'une population de failles. *Bull. Soc. Geol. De France* 7, 729-737.
- Berberian, M., 1962. Continental deformation in the Iranian Plateau of Earth, Geological Survey and Mineral Exploration, Report No. 52, p. 307-315.
- Carey, E., Brunier, B., 1974. Analyse théorique et numérique d'un modèle mécanique élémentaire appliqué à l'étude d'une population de failles. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences* 279, 891-894.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroshnichenko, A., Ruzhich, V., San'kov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, Central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. *Tectonophysics* 282, 1-38.
- Eliasi, M., 2009. Paleostress Analysis around the Lar Dam (Central Alborz) to Identify Effective Structures in Water Volatility. *Journal of Earth and Space Physics* 35, p.17-35.
- Geological Map of Sahelabad (1:100,000), Geological Survey of Iran.
- Marret, R., Allmendiger, R.W., 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of Structural Geology* 12, 973-986.
- Mousavi, M., 2011. Separation of Paleostress Phases by Inversion of Fault Plate in South Birjand. Ph.D Thesis, Shahid Beheshti University, 200 pp.
- Navabpour, P., 2006. An Introduction to the Paleolithic Stress Arrangement in the Kopet-Dagh Post-Triassic. *Journal of Geosciences* 59, 176-183.
- Pfiffner, O.A., Burkhard, M.S., 1987. Determination of paleostress axes orientations from fault, twin and earthquake data. *Ann. Tectonicae* 1, 48-57.
- Ramsay, J.G., Lisle, R.J., 2000. *The techniques of modern structural geology*. Volume 3: Applications of continuum mechanics in structural geology. Academic, San Diego, Calif.
- Sashimi, A., 1996. Paleostress analysis in Shirshotor region (south-east of Sarbisheh). MSc Thesis, Birjand University, p.148.
- Stocklin, J., Eftekhari-Nezhad, J., Hushmand-Zadeh, A., 1972. Central lut reconnaissance, east Iran, Geological Survey of Iran, report 22, 62.
- Tibaldi, A., Pasquare, F., Tormey, D., 2010. Volcanism in Reverse and Strike-Slip Fault Settings. *Earth and Environmental Science*. DOI: 10.1007/978-90-481-2737-5_9, 315-348.
- Tirrul et al., 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran. Geological Survey of Iran 94, 134-150.



Yamaji, A., 2000. The multiple inverse methods: A new technique separate stresses from heterogeneous fault slip data. *Journal of Structural Geology* 22, 441-45.