

Original Research paper

Investigating the stress regime in the Gorgan-plain, using inversion of earthquake focal mechanism solutions

Fereshteh Jafari-Hajati¹, Maryam Agh-Atabai^{1*}, Majid Nemati² and Ali Biglari-Fadafan³

¹Department of Geology, Faculty of Sciences, Golestan University, Gorgan, Iran

²Department of Geology, Faculty of Sciences and Earthquake Research Group, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran

³Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Golestan University, Gorgan, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2022 July 04

Accepted: 2022 September 27

Available online: 2023 March 21

Keywords:

Gorgan-plain

Focal mechanism

South Caspian

Stress

Inversion

ABSTRACT

In this research, to understand the present-day tectonic situation of the Gorgan-plain in the east of the South Caspian basin, the tectonic stress regime of this area and its adjacent areas was estimated using the data inversion of the earthquake focal mechanisms. For this aim, in addition to analyzing focal mechanisms solved by different sources, the focal mechanisms were solved for several earthquakes with appropriate and sufficient information. The results indicate the presence of various mechanisms, including thrust, normal, and strike-slip, and as a result, various orientations of kinematic P and T axes, which can indicate the complexity of the region. By analyzing the earthquakes with a minimum magnitude of 4 in the Gorgan-plain, the Kopeh-Dagh in the east of the plain, and the entire eastern region of the South Caspian, a compression regime with a NNW-SSE trend was obtained. However, by analyzing all of the earthquakes (smaller and larger earthquakes) in the Gorgan-plain, a strike-slip regime was obtained, in which the trend of the P and T axes were calculated NE-SW and NW-SE, respectively. The results indicate a local strike-slip regime in addition to the regional compressional regime in the region.

1. Introduction

Iran, as a part of the Alpine-Himalayan orogenic belt and due to the convergence of the Arabian and Eurasian plates, has various tectonic phenomena such as the continental collisions of Alborz, Zagros, and Makran subduction. Therefore, different parts of the country show different and complex structural and seismic characteristics. One of the tectonically complex regions of Iran is the lowlands in the east of the South Caspian basin or Gorgan-plain, between the Kopeh-Dagh and Alborz ranges (Ghasemi et al., 2007, Fig. 1). The occurrence of historical and instrumental earthquakes in the east of the South Caspian region

shows high seismic activity in this area (Agh-Atabai, 2014). The 874 AD earthquake in Gonbad, 1470 AD in Gorgan, 1470 AD in Agh-Ghala, and 1497 AD in Gonbad are the most important historical events in this region (Ambraseys and Melville, 1982). The instrumental earthquakes of Gorgan-plain also include the earthquakes of 1999 (Mw=5.4), 2004 (Mw=5.5), and 2005 (Mw=5.2) AD in the north of Agh-Ghala (Nemati et al., 2013). The studied area's seismicity map shows that the west's seismic activity rate is higher than the east's in the studied periods (Agh-Atabai, 2014). Of course, it does not mean that the eastern

* Corresponding author: Maryam Agh-Atabai; E-mail: maryamataby@yahoo.com

Citation:

Jafari-Hajati, F., Agh-Atabai, M., Nemati, M., and Biglari-Fadafan, A., 2023. Investigating the stress regime in the Gorgan-plain, using inversion of earthquake focal mechanism solutions. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(1), 127, 69-86. <https://doi.org/10.22071/gsj.2022.350314.2012>

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

doi: 10.22071/gsj.2022.350314.2012

dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.7.4



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

part has less seismic hazard, but it shows the difference in the seismicity pattern and the return period of the earthquakes in the east and west of the province (Agh-Atabai, 2014).

Due to the tectonic setting of the Gorgan-plain, thick sediment cover, low or no outcrop of geological structures, as well as its high concentration of seismicity, seismic studies are very important to analyze the tectonic stress regime of the region. In this research, the tectonic stress of Gorgan-plain and its adjacent areas was estimated using the data inversion of the earthquake focal mechanism from 1970 to 2020. For this aim, in addition to analyzing focal mechanisms solved by different sources, the focal mechanisms were solved for several earthquakes with appropriate and sufficient information.

2. Data and Methods

Seismograms are essential information about earthquakes, which are used in calculating the focal mechanism in seismology with different methods. In this research, the polarity method (polarity pattern of the first P- wave arrival) was used to calculate the focal mechanism of earthquakes (Fig. 2). Due to its high velocity, the P- wave is considered the first wave received in the seismic station. The polarity of the first P wave received in different seismic stations is different and can be compressive (upward motion in the station) or tensile (downward motion). Stations with positive and negative polarity are separated by two perpendicular planes called nodal planes on Stereonet.

Software for solving the focal mechanism of earthquakes draws the best plates that can pass between compression and tension points. In this study, Seisan software was used to calculate the focal mechanism, one of the seismic data analysis software (Havskov and Ottemöller, 1999). One of the methods of determining the seismic stress field is the stress tensor inversion method or inversion through the data of the earthquake focal mechanism. The inversion process of fault slip data calculates the four parameters of the reduced stress tensor; the maximum, intermediate, and minimum principal stress axis (σ_1 , σ_2 , σ_3) and stress ratio ($R = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$) (Delvaux and Sperner, 2003). In this study, the inversion of the stress tensor has been done using the Right Dihedron and Rotational Optimization methods through the Win-Tensor program (Delvaux and Sperner, 2003).

The focal mechanism was solved for 20 earthquakes with a magnitude of 3 to 4.5 in the period from 2011 to 2020, which had sufficient and appropriate information (Table 1). In addition to the focal mechanism solved in this study, in order to better analyze tension, other valid focal mechanisms were also used (Table 2). The data was collected from the IRSC online catalog and published articles by researchers such as Priestley et al. (1994) and Nemati et al. (2013).

3. Results and discussion

The results of this research (Table 1, Appendix 1, and Fig. 3) show that the studied earthquakes have occurred with different mechanisms (thrust, strike-slip, and normal). However, in general, the dominant mechanism of most small earthquakes is strike-slip. Most of the earthquakes are concentrated in the western part of the studied region (Gorgan-plain), and a variety of data on the focal mechanisms of earthquakes, including thrust, strike-slip, and even normal, can be seen in it, which can indicate the complexity of the tectonic features of the region.

Referring to the study conducted by Radfar et al. (2019) on seismic sections, in addition to confirming the presence of the western Kopeh-Dagh formations under the sediments of the plain, reverse listric faults (inverted normal faults) in older formations and strike-slip and normal faults were detected in younger sequences. Also, Hamidi (1400) has shown that western Kopeh-Dagh faults such as Takal Kuh and Maraveh Tappeh extend towards the plain under the sedimentary cover with a dominant thrust mechanism, and the strike-slip faults have been observed as flower-like structures in the upper layers. According to the evidence obtained in these studies, it is expected to observe a variety of mechanisms in this region. The trends of the kinematic axes P and T of each of the studied earthquakes were drawn in the form of a map (Fig. 4a, b) and a histogram (Fig. 4c, d). In order to understand the state of the stress regime in the region, inversion was done once for all the earthquakes in the Gorgan-plain and then for the data of the focal mechanism of the earthquakes with a minimum magnitude of 4 (Fig. 5a, b).

Also, to get a general view of the tectonic stress regime of the region and compare it with the results related to the plain, the stress direction was calculated using all earthquakes of the eastern South Caspian (Golestan province) with a minimum magnitude of 4 (Fig. 5c). The results of the inversion of all the data of Gorgan-plain, including larger and smaller earthquakes, show a strike-slip dominant stress tensor (Table 3). The axes of pressure and tension calculated for this area are NE-SW and NW-SE, respectively. This orientation of the main stresses and kinematic axes is consistent with strike-slip faults with an approximate direction of northeast-southwest to north-south and left-lateral strike-slip faults with an approximate trend of northwest-southeast to east-west. However, the results of the inversion analysis for earthquakes with a minimum magnitude of 4 in the plain show a compressive dominant stress tensor with NNW-SSE trend (Fig. 5b). Therefore, two stress regimes are observed in the Gorgan-plain; a compression in the NNW-SSE direction associated with the larger events and a strike-slip regime resulting from the analysis of numerous smaller earthquakes. The inversion analysis of all earthquakes

with a minimum magnitude of 4 in the studied region and the Kopeh-Dagh indicates a compressive dominant stress tensor with the NNW-SSE trend similar to the analysis of the plain's earthquakes with the same magnitude (Fig. 5c, d). Structures such as folds with NE-SW trend and reverse faults such as Maraveh Tappeh and Takal Kuh faults can be formed in this regime. The results for these last two cases are similar to those from larger earthquakes in the plain. Zamani et al. (2008) also obtained a compressive regime with an NNE-SSW trend for the northeast of Iran and a compression with NNW-SSE trend for the range of Western Kopeh-Dagh, Eastern Alborz, and the northwest of Daruneh fault using stress tensor inversion based on the focal mechanism of earthquakes.

4. Conclusion

In this study, to obtain the tectonic stress regime of the Gorgan-plain in the east of the South Caspian basin and its adjacent areas, the focal mechanism of earthquakes with a minimum magnitude of 3 in the period from 2011 to 2020, which had appropriate and sufficient information, was solved. The results indicate different mechanisms, including thrust,

strike-slip and normal, which indicates the complexity of the tectonic regime in the studied region. In order to get the stress regime, the inversion analysis of the focal mechanism of earthquakes was done; in addition to using the resolved focal mechanisms, data from other reliable sources were also used. By analyzing the earthquakes with a minimum magnitude of 4 in the Gorgan-plain, the Kopeh-Dagh in the east of the plain, and the entire eastern region of the South Caspian, a compression regime with a NNW-SSE trend was obtained. However, by analyzing all of the earthquakes (smaller and larger earthquakes) in the Gorgan-plain, a strike-slip regime was obtained, in which the trend of the P and T axes were calculated NE-SW and NW-SE, respectively. According to these results, the tectonic stress regime of the studied area is summarized in Fig. 6. The results show that the main stress regime in the east of the South Caspian is a compressional regime with the NNW-SSE trend, under which the main structures, such as folds and thrust faults with the NE-SW trend, are formed. However, the results indicate a local strike-slip regime in addition to the regional compressional regime in the Gorgan-plain.

بررسی رژیم تنش لرزه زمین‌ساختی دشت گرگان، با استفاده از وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها

فرشته جعفری حاجتی^۱، مریم آق‌آتابای^۱، مجید نعمتی^۲ و علی بیگلری فدافن^۳

^۱ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران
^۲ گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم و گروه پژوهشی زمین‌لرزه، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
^۳ گروه عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گلستان، گرگان، ایران

چکیده

در این پژوهش برای درک وضعیت زمین‌ساختی کنونی دشت گرگان در خاور حوضه کاسپین جنوبی، تنش زمین‌ساختی این منطقه و مجاور آن با استفاده از وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها برآورد شد. برای این منظور، افزون بر تحلیل سازوکارهای کانونی حل شده توسط منابع مختلف، برای تعدادی از زمین‌لرزه‌های دارای اطلاعات مناسب و کافی، سازوکار کانونی تعیین شد. نتایج حاکی از حضور سازوکارهای کانونی متنوع شامل رانده، عادی و راست‌الغز و به تبع آن، جهت‌یافتگی‌های متنوع محورهای جنبش‌شناختی فشارشی و کششی است که می‌تواند نشان از پیچیده بودن منطقه باشد. با تحلیل وارون‌سازی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ در دشت گرگان، محدوده رخنمون یافته کپه‌داغ در خاور دشت و کل منطقه خاور کاسپین جنوبی یک رژیم فشاری با روند NNW-SSE به‌دست آمد. اما با تحلیل همه زمین‌لرزه‌های دشت گرگان با بزرگای کمتر از ۴ به همراه زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر از آن، یک رژیم راست‌الغز به‌دست آمد که در آن روند محور جنبش‌شناختی NE-SW، P محور NW-SE، T محاسبه شد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد یک رژیم محلی راست‌الغز افزون بر رژیم ناحیه‌ای فشاری در منطقه وجود دارد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۱۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۸/۰۲

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۱/۰۱

کلیدواژه‌ها:

دشت گرگان

سازوکار کانونی

کاسپین جنوبی

تنش

وارون‌سازی

۱- پیش‌نوشتار

کشور ایران به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ - هیمالیا و همچنین به علت همگرایی صفحات عربی و اوراسیا دارای پدیده‌های زمین‌ساختی متنوع از جمله برخوردی‌های قاره‌ای البرز، زاگرس و فرورانش مکران است. از این رو بخش‌های مختلف کشور ویژگی‌های ساختاری و لرزه‌ای متفاوت و پیچیده‌ای را نشان می‌دهند. یکی از این مناطق با ویژگی‌های زمین‌ساختی پیچیده، شمال خاوری ایران، خاور حوضه کاسپین جنوبی می‌باشد. این پهنه در جایگاهی قرار گرفته که بخشی از کاسپین جنوبی در حال فرونشست و البرز و کپه‌داغ در حال فراخاست می‌باشد. دشت گرگان و پهنه‌ای از کاسپین که به بلوک ترکمن معروف شده است به‌صورت زمین‌های پست در خاور حوضه کاسپین جنوبی واقع شده که دو پهنه زمین‌شناسی - ساختاری کاسپین جنوبی و کپه‌داغ باختری را به هم پیوند می‌دهد (شکل ۱) (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶).

رخداد زمین‌لرزه‌های تاریخی و دستگاهی در خاور کاسپین جنوبی نشان‌دهنده فعالیت بالای لرزه‌خیزی در این گستره است (آق‌آتابای، ۱۳۹۳) که از مهمترین آنها

می‌توان به زمین‌لرزه‌های ۸۷۴ میلادی گنبد کاووس، ۱۴۷۰ میلادی گرگان، ۱۴۷۰ میلادی آق‌قلا، ۱۴۹۷ میلادی گنبد کاووس (Ambraseys and Melville, 1982) و زمین‌لرزه‌های ۱۹۹۹ (Mw= ۵/۴)، ۲۰۰۴ (Mw= ۵/۵) و ۲۰۰۵ (Mw= ۵/۲) میلادی در شمال آق‌قلا اشاره کرد (Nemati et al., 2013). نقشه پراکنندگی روکانون زمین‌لرزه‌های این گستره $Mc \geq 2/5$ برای بازه زمانی ۱۹۹۶-۲۰۱۰ و $Mc \geq 4/4$ برای بازه زمانی ۱۹۶۴-۲۰۱۰) نشان می‌دهد نرخ فعالیت لرزه‌ای بخش باختری نسبت به بخش خاوری آن در بازه‌های زمانی مورد بررسی بیشتر است (شکل ۳ از آق‌آتابای، ۱۳۹۳). بررسی لرزه‌خیزی دهه اخیر از بولتن جامع مرکز لرزه‌شناسی بین‌المللی (ISC) نیز همین روند را نشان می‌دهد (شکل ۱). البته به این مفهوم نیست که بخش خاوری از نظر لرزه‌خیزی کم‌خطرتر است بلکه نشان از متفاوت بودن الگوی لرزه‌خیزی و دوره بازگشت زمین‌لرزه‌های خاور و باختر استان است (آق‌آتابای، ۱۳۹۳). نعمتی و همکاران (Nemati et al., 2013) با استقرار یک شبکه موقت محلی به مدت ۶ ماه (در بازه زمانی ۲۰۰۹-۲۰۱۰) و

* نویسنده مسئول: مریم آق‌آتابای؛ E-mail: maryamataby@yahoo.com

ماخذ نگاری:

جعفری حاجتی، ف.، آق‌آتابای، م.، نعمتی، م. و بیگلری فدافن، ع.، ۱۴۰۲، بررسی رژیم تنش لرزه‌زمین‌ساختی دشت گرگان، با استفاده از وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۱)، ۱۲۷-۱۳۹
<https://doi.org/10.22071/gsj.2022.350314.2012>

doi: 10.22071/gsj.2022.350314.2012

doi: 20.1001.1.10237429.1402.33.1.7

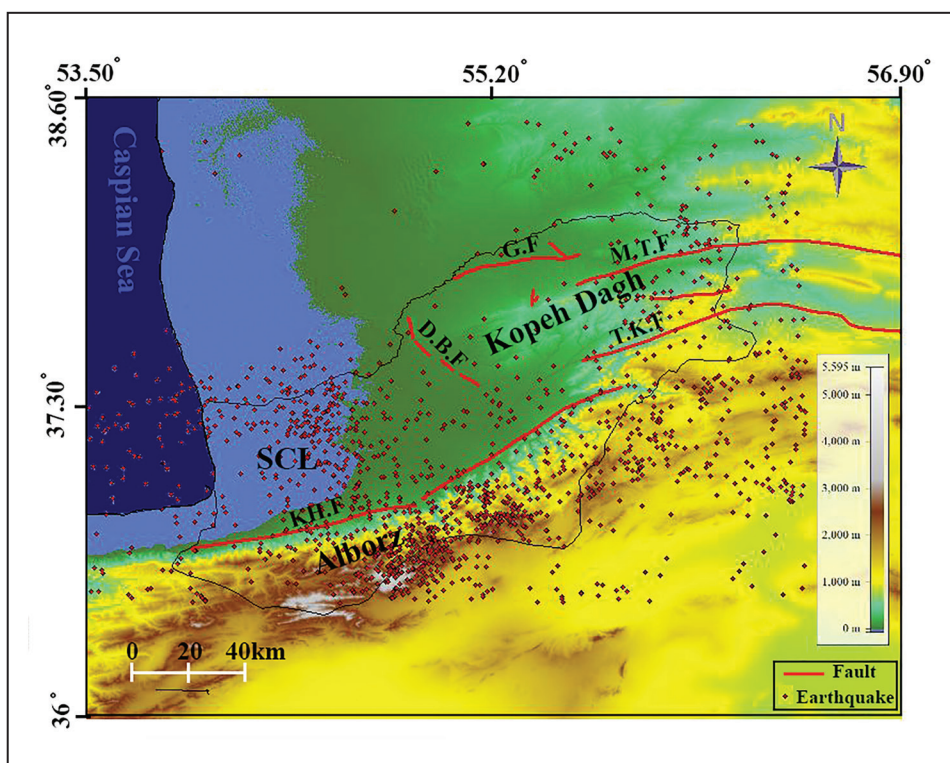
حقوق معنوی مقاله برای فصلنامه علوم زمین و نویسندگان مقاله محفوظ است.



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

بخش‌های جنوبی‌تر به صورت تقریباً شمالی برآورد شده است. با توجه به جایگاه قرارگیری دشت گرگان، پوشش رسوبی ستبر، کم بودن یا عدم رخنمون ساختارهای زمین‌شناسی و نیز تمرکز بالای لرزه‌خیزی آن، جهت تحلیل رژیم تنش زمین‌ساختی منطقه، مطالعات لرزه‌خیزی اهمیت بسیاری دارد. در این پژوهش، تنش زمین‌ساختی دشت گرگان و نواحی مجاور آن با استفاده از وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۹۷۰-۲۰۲۰ برآورد شد. در راستای تحقق این امر، افزون بر استفاده از سازوکارهای حل شده توسط منابع مختلف، از سازوکارهای کانونی حل شده در این مطالعه برای تعدادی از زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر که دارای اطلاعات مناسب و کافی بوده‌اند، نیز به کار گرفته شد.

نیز حل سازوکار کانونی رویدادهای رخ داده (۲۰۰۶-۲۰۱۰) نشان داده‌اند که در زمین‌های پست کاسپین رخداد زمین‌لرزه‌ها با سازوکار راست‌الغز به همراه مؤلفه عادی در ژرفای کم و زمین‌لرزه‌ها با سازوکار راندگی در ژرفای بیشتر بوده است. روستایی و همکاران (۱۳۹۴) با استفاده از تحلیل وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های رخ داده در همین منطقه (تا سال ۲۰۱۰) یک رژیم تنش کششی محلی با روند $N42^{\circ}W$ را برآورد کردند. مطالعه لرزه‌زمین‌ساختی آق‌آتابای و تورانی (۱۳۹۷) در خاور کاسپین جنوبی نشان داده‌اند که در دشت گرگان نسبت به بخش‌های جنوبی‌تر آن (کوهپایه) زمین‌لرزه‌های کوچک‌تری با دوره بازگشت کوتاه‌تر رخ می‌دهند. افزون بر این، روند محور فشارش در دشت گرگان با استفاده از تحلیل برگشتی شمال‌خاوری به‌دست آمده است. اما روند آن در



شکل ۱- نقشه لرزه‌زمین‌ساخت منطقه مورد مطالعه. خطوط قرمز بیانگر گسل‌های اصلی و نقاط قرمز نشان‌دهنده روکانون زمین‌لرزه‌ها در بازه زمانی ۱۹۶۴-۲۰۲۲ بر گرفته از مرکز لرزه‌شناسی بین‌المللی (ISC) می‌باشند. SCL بیانگر زمین‌های پست خاور حوضه کاسپین جنوبی، KH.F: گسل خزر، T.K.F: گسل تکل کوه، M.T.F: گسل مراوه تپه، G.F: گسل گلیجه، D.B.F: گسل داشلی برون می‌باشد.

Figure 1. Seismotectonic map of the studied area. The red lines represent the main faults and the red dots represent the earthquakes in the period 1964-2022 taken from the International Seismological Center (ISC). SCL represents the eastern lowlands of the South Caspian basin, KH.F: Khazar fault, T.K.F: Takal Kuh fault, M.T.F: Maraveh Tappeh fault, G.F: Golijeh fault, D.B.F: Dashli Burun fault.

۲- زمین‌ساخت منطقه

قفقاز و طالش در شمال‌باختر و باختر و کپه‌داغ و بینالود در شمال‌خاور و خاور فلات ایران می‌گردد (نظری و شهیدی، ۱۳۹۰). با توجه به عدم یکنواختی در تاریخچه ساختمانی و چینه‌شناسی، این رشته‌کوه را به سه بخش، البرز خاوری، میانی و باختری تقسیم می‌کنند که هر سه بخش، دارای ویژگی‌های لرزه‌ای خاص خود می‌باشند (Jackson et al., 2002). داده‌های لرزه‌ای (Jackson et al., 2002) و ساختاری (Allen et al., 2003; Ritz et al., 2006) در پهنه البرز حاکی از حرکت مورب‌الغز و تقسیم‌شدگی کرنش بین گسل‌های راندگی و راست‌الغز چپ‌بر موازی با روند

یکی از مناطق پیچیده ایران از نظر زمین‌ساختی، زمین‌های پست واقع در خاور حوضه کاسپین جنوبی یا دشت گرگان است که از باختر با کپه‌داغ، از شمال در راستای گسل کپه‌داغ (آشک‌آباد) با فرونشستگی قره‌بغاز و صحرای باختر ترکمنستان همسایه می‌باشد و از جنوب نیز با گسل خزر به عنوان مرز شمالی بلوک البرز، از پهنه البرز خاوری جدا می‌شود (شکل ۱) (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). رشته‌کوه البرز یک پهنه چین‌خورده، گسل‌خورده و یکی از نواحی کوتاه‌شدگی پوسته در ایران است که در لبه جنوبی فروافتادگی کاسپین قد برافراشته است که باعث پیوند رشته‌کوه‌های

حوضه از دوره پلیوسن پیشین (حدود ۵/۵ میلیون سال پیش) شدت یافته که میزان آن در این بازه زمانی با بررسی ستون چینه‌شناسی بخش شمال‌باختری حوضه ۲/۴ کیلومتر برآورد شده است و به آغاز فرورانش صفحه کاسپین جنوبی به زیر کاسپین میانی مرتبط دانسته‌اند (Allen et al., 2002). مطالعه و مقایسه زمین‌شناختی کپه‌داغ باختری و حوضه کاسپین جنوبی نشان می‌دهد که دشت گرگان، به صورت یک پهنه انتقالی این دو پهنه زمین‌شناسی - ساختاری را به هم پیوند می‌دهد. بخش خاوری دشت به ارتفاعات کپه‌داغ باختری منتهی می‌شود که دارای بیشینه ارتفاع ۴۵۰ متر در این گستره می‌باشد. بخش باختری دشت نیز در کرانه خاوری کاسپین جنوبی قرار گرفته است که ارتفاع آن ۲۷- متر است (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). همان‌طور که اشاره شده است دشت گرگان (نواحی پست کاسپین جنوبی) به دلیل وجود پوشش رسوبات خزری، شواهد سطحی کمی برای ساختارها موجود است. اما مطالعات زیرسطحی صورت گرفته توسط رابرت و همکاران (Robert et al., 2014) نشان داده است که به سمت حوضه کاسپین جنوبی، ساختارهای چین‌خورده کپه‌داغ باختری با روند NE-SW به زیر رسوبات ستر الیگوسن - کواترنری این حوضه دفن شده‌اند. از این رو، بخش باختری کپه‌داغ به دو زیر بخش خاوری با سازندهای رخنمون یافته و زیربخش باختری با سازندهای مدفون شده در زیر رسوبات خزری دشت تقسیم شده است (صفری و همکاران، ۱۳۹۹).

۳- روش پژوهش

لرزه‌نگاشت‌های ثبت شده در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری از اطلاعات مهم بعد از رویداد زمین‌لرزه‌ها می‌باشد که در محاسبه سازوکار کانونی در لرزه‌شناسی با روش‌های مختلفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این پژوهش برای محاسبه سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، از روش پلاریته (الگوی پلاریته اولین رسید موج طولی) استفاده شد. موج P به دلیل سرعت بالای آن، به عنوان اولین موج دریافتی در ایستگاه‌های لرزه‌نگاری در نظر گرفته می‌شود. پلاریته اولین موج P دریافتی در ایستگاه‌های لرزه‌های مختلف متفاوت است و می‌تواند به صورت فشارشی (حرکت رو به بالا در ایستگاه) و یا به صورت کششی (حرکت رو به پایین) باشد. برای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، علاوه بر تشخیص الگوی فشارشی یا کششی اولین موج طولی در لرزه‌نگاشت‌های قائم، آریموت و زاویه موج رسیده به دستگاه‌های لرزه‌نگار نیز مورد نیاز است. هر مسیر پرتو موج P که از منبع خارج می‌شود را می‌توان با دو متغیر آریموت از منبع (Φ) و متغیر پرتو یا زاویه برخاست (i) (Take off angle) شناسایی کرد (Lay and Wallace, 1995). با استفاده از این زوایا موقعیت موج در هر ایستگاه بر روی شبکه هم مساحت نشان داده می‌شوند. به طور قراردادی، ایستگاه‌ها با پلاریته مثبت به صورت دایره‌های مشکی و ایستگاه‌ها با پلاریته منفی با دایره‌های توخالی مشخص می‌شوند. ایستگاه‌های با پلاریته مثبت و منفی توسط دو صفحه عمود بر هم با عنوان صفحات گرهی بر روی استریونت از یکدیگر تفکیک می‌شوند. در واقع نرم‌افزارهای حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها، بهترین صفحاتی که می‌تواند از بین نقاط فشاری و کششی عبور کنند را ترسیم می‌نمایند. در این مطالعه، برای محاسبه سازوکار کانونی از نرم‌افزار ساین (Seisan) استفاده شد که یکی از نرم‌افزارهای تجزیه و تحلیل داده‌های لرزه‌نگاری است (Havskov and Ottemöller, 1999). از شروع کار با نرم‌افزار ساین نیازمند انجام مراحل تبدیل فرمت داده‌ها به فرمت ساین، ایجاد بانک اطلاعاتی، وارد کردن اطلاعات ایستگاه‌های لرزه‌نگاری می‌باشد. سپس هر زمین‌لرزه به صورت یک فایل متنی تحت عنوان اس فایل در بانک اطلاعاتی ساین ثبت می‌شود که اطلاعات بولنتی، فازها و پلاریته‌های تعیین شده جهت محاسبه سازوکار کانونی را در بر خواهد گرفت. در نهایت سازوکار کانونی حل شده بر روی شبکه هم مساحت ارائه و موقعیت صفحات گرهی آن براساس قانون دست راست آکی و ریچارد (Aki and Richards, 1980) بیان می‌شوند. پس از رسم صفحات گرهی، موقعیت محورهای بیشینه فشارش (P) و کشش (T) بر

رشته کوه است که در نتیجه کوتاه‌شدگی مایل (دگرشکلی ترفشاری) متأثر از همگرایی شمالی - جنوبی صفحات عربی و اورازیا و حرکت به سمت جنوب باختری حوضه کاسپین جنوبی نسبت به ایران می‌باشند. از ساختارهای مهم دامنه شمالی پهنه البرز می‌توان به گسل خزر و شمال البرز اشاره کرد (Allen et al., 2003). گسل خزر، با درازایی نزدیک به ۶۰۰ کیلومتر در حاشیه جنوبی حوضه کاسپین واقع شده است (Berberian, 1983). ارتفاع میانگین البرز از ۳۰۰۰ متر در بخش داخلی کمربند تا ۲۸- متر در امتداد گسل خزر در خط ساحلی دریای کاسپین کاهش می‌یابد (Berberian, 1981, 1983; Berberian and Walker, 2010). در بخش خاوری دامنه شمالی البرز، گسل خزر با سازوکار راندگی و شیب به سمت جنوب، به طور محلی شیب‌های گرگان را در مجاورت لایه‌های کواترنری جوان قرار می‌دهد (Allen et al., 2003). گسل شمال البرز با طول تقریبی ۵۰۰ کیلومتر در جنوب گسل خزر و تقریباً به موازات آن قرار گرفته است (یاسینی، ۱۳۶۰). این گسله با شیب به سمت جنوب دارای سازوکار فشاری است و مرز جنوبی نهشته‌های نئوژن حوضه کاسپین به آن محدود می‌شوند (Stöcklin, 1974؛ یاسینی، ۱۳۶۰؛ لشکری و همکاران، ۱۳۸۸).

پهنه کپه‌داغ به شکل یک کمربند چین‌خورده در شمال خاور ایران واقع شده که بیشینه ارتفاعی در حدود ۳۰۰۰ متر از سطح دریا داشته است. کم‌عرض‌ترین و مرتفع‌ترین بخش این کمربند در بخش خاور و مرکزی آن قرار گرفته که به سمت باختر عرض بیشتر در حالی که از ارتفاع آن کاسته و به سرزمین‌های پست حوضه کاسپین جنوبی منتهی می‌شود (Jackson et al., 2002). نیمه شمالی کمربند چین‌خورده کپه‌داغ در ترکمنستان و نیمه جنوبی آن در ایران واقع است (پورتقوی و همکاران، ۱۳۹۳). به دنبال بسته شدن اقیانوس تتیس جوان وارونگی زمین‌ساختی مهمی در حوضه کپه‌داغ پدید آمد (Robert et al., 2014) که موجب پیدایش چین‌خوردگی‌ها و راندگی‌های گسترده در رسوبات ژوراسیک - ترشیاری شده است (Lyberis and Manby, 1999). مهمترین ویژگی دگرختی در پهنه کپه‌داغ آن است که در راستای امتداد تغییر می‌کند (Hollingsworth et al., 2006). امتداد کلی چین‌خوردگی‌ها در بخش خاوری NW-SE و در بخش باختری ENE-WSW است. این راستاها در بخش مرکزی به E-W تبدیل می‌شوند. این تغییر روند ساختاری باعث پهنه‌بندی کپه‌داغ به سه زیر پهنه خاوری، مرکزی و باختری شده است (نواب‌پور و همکاران، ۱۳۸۲). از جمله ساختارهای مهم این پهنه می‌توان به گسل مراوه‌تپه و تکل کوه اشاره کرد. گسل مراوه‌تپه به صورت کماتی از ناحیه باش‌تپه در خاور آغاز و پس از گذر از شمال مراوه‌تپه، تا منطقه آق‌بند در باختر ادامه یافته است (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۲) و پایانه باختری آن در شمال گنبد کاووس از دو گسل موازی تحت عنوان گسل آق‌بند تشکیل شده است (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ افشارحرب، ۱۳۷۳). روند کلی این گسله از روند چین‌خوردگی منطقه تبعیت می‌کند (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۲). مطالعه صورت گرفته توسط حمیدی (۱۴۰۰) نیز نشان داده که بخش باختری گسل مراوه‌تپه تا دشت گرگان ادامه یافته و دارای سازوکار معکوس با مؤلفه چپ‌بر و شیب به سمت جنوب می‌باشد. گسل تکل کوه در جنوب گسل مراوه‌تپه و هم روند با آن، از شمال شهر آشنخانه شروع و به سمت باختر ادامه یافته است که انتهای آن به خطواره گرگان‌رود در شمال باختری گنبد کاووس متصل شده (شهیدی و همکاران، ۱۳۹۲) و با توجه به خطواره‌های مغناطیسی احتمالاً تا دشت گرگان امتداد می‌یابد (حمیدی، ۱۴۰۰). این گسله به صورت سازوکار معکوس یا راندگی دارای مؤلفه امتدادی چپ‌بر با شیب به سمت شمال عمل کرده است (افشارحرب، ۱۳۷۳؛ شهیدی و همکاران، ۱۳۹۲؛ حمیدی، ۱۴۰۰).

گستره کاسپین جنوبی نیز مانند پهنه‌های البرز و کپه‌داغ در معرض کوتاه‌شدگی فعال قرار دارد، شواهد این کوتاه‌شدگی به صورت چین‌خوردگی‌ها و گسلش‌های جوان در رسوبات کف دریا دیده می‌شود (قاسمی و همکاران، ۱۳۸۶). فرونشینی

توجه به مواردی مانند کمترین گپ آزمون‌تی (گپ آزمون‌تی مناسب کمتر از ۱۸۰ درجه)، خطای زمان باقیمانده حداقلی (RMS) که بیانگر جذر مجموع مربعات خطای تمام فازها می‌باشد و همچنین دارا بودن تعداد پلاریته کافی و مناسب انجام شد. حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با در نظر گرفتن نبود خطای پلاریته و زاویه چرخش صفحات به طور میانگین ۱۰ درجه در ساینز انجام شد. در برخی از موارد به دلیل مناسب نبودن و پراکنده بودن حل‌های انجام شده، فازها و قرائت پلاریته چندین مرتبه کنترل و تصحیح شده و در نهایت حل سازوکار کانونی مناسب تعیین شد. در مجموع، از بین ۹۵ زمین‌لرزه بررسی شده، برای ۲۰ زمین‌لرزه با بزرگای ۳ تا ۴/۵ در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ که دارای اطلاعات کافی و مناسب بودند، حل سازوکار کانونی صورت گرفت (جدول ۱). یک نمونه از سازوکار کانونی حل شده در شکل ۲ نشان داده شد. دیگر سازوکارهای کانونی حل شده زمین‌لرزه‌ها در پیوست ۱ ارائه شد.

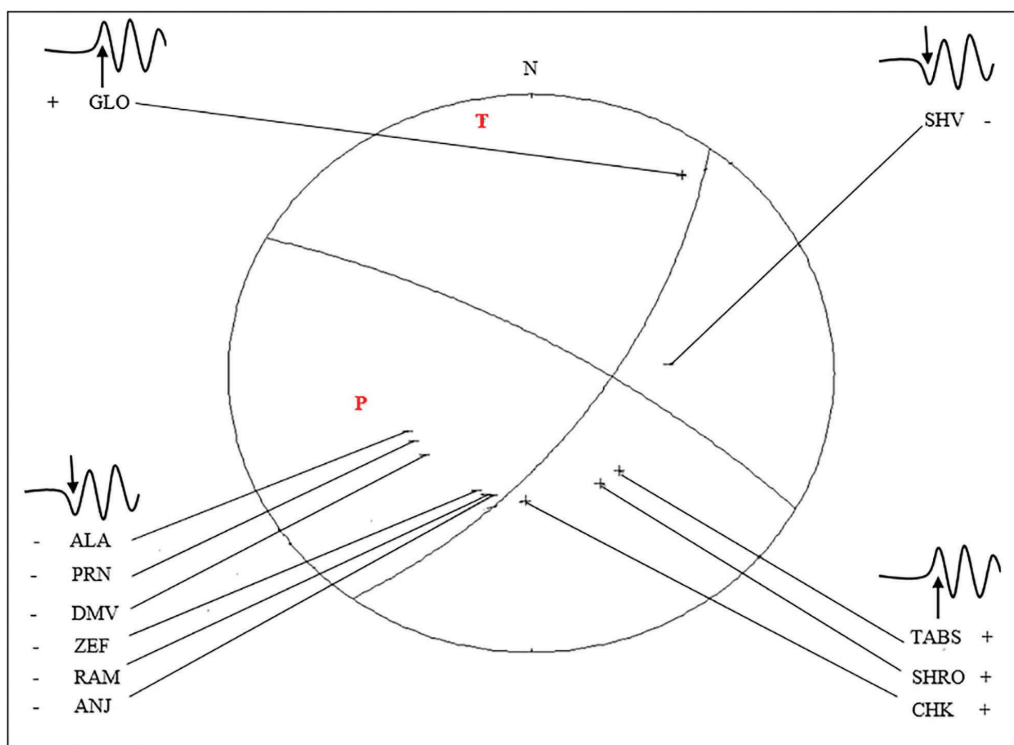
روی صفحه‌ای تعیین می‌شود که در برگیرنده قطب دو صفحه گرهی می‌باشد. این محورها ۴۵ درجه در جهت یا خلاف جهت بردار لغزش و به ترتیب در ربعی که نقاط کششی و فشارشی ثبت شده‌اند واقع می‌شوند. نقطه تقاطع دو صفحه گرهی محور خنثی (B) است که بیانگر نقاطی هستند که هیچ‌گونه موجی را دریافت نکرده‌اند (Lay and Wallace, 1995).

در این پژوهش، برای محاسبه سازوکار کانونی با روش پلاریته از قرائت الگوی زمان رسید موج P، داده‌های مربوط به ایستگاه‌های دائم مرکز لرزه‌نگاری ایران وابسته به موسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران (IRSC) و شبکه ملی لرزه‌نگاری ایران وابسته به پژوهشگاه بین‌المللی زلزله‌شناسی و مهندسی زلزله (IIEES) استفاده شد. پس از انجام مراحل مانند تبدیل فرمت داده‌ها به فرمت نرم‌افزار ساینز، تلفیق شکل موج‌های موسسه و پژوهشگاه و در نهایت ثبت آنها در بانک اطلاعاتی برنامه ساینز، داده‌ها برای تعیین پلاریته و حل آماده و مورد محاسبه قرار گرفت. انتخاب داده‌ها با

جدول ۱- داده‌های سازوکار حل شده در این مطالعه (مختصات و بزرگی داده‌ها برگرفته از مرکز لرزه‌نگاری کشور، IRSC).

Table 1. The mechanism data solved in this study (Coordinates and magnitude of the data taken from the Iranian Seismological Center, IRSC).

No.	Date	Lat. (°E)	Lon. (°N)	Depth (Km)	Mag. (M _N)	Nodal plane 1			Nodal plane 2		
						Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)
1	2011/02/07	37.39	54.59	19	3.7	299	75	-26	36	64	-163
2	2011/05/29	37.28	54.17	17.5	3.8	204	67	20	106	71	156
3	2012/01/10	37.39	54.57	12.4	3.8	291	71	-68	60	27	-136
4	2012/09/04	37.34	54.38	14.7	3.4	140	41	-74	299	50	-103
5	2012/12/19	37.15	54.37	33	4.1	55	45	82	244	45	97
6	2013/05/21	37.18	54.44	15.5	3.1	217	69	40	110	52	153
7	2013/11/14	37.36	54.38	24.9	3.7	81	69	-40	187	53	-153
8	2015/01/05	37.22	54.39	28.1	4.4	17	77	-54	124	37	-154
9	2015/01/31	37.28	54.45	19.2	4.1	93	41	-40	216	64	-123
10	2015/07/16	37.25	54:53	18.2	3.5	309	65	32	204	60	151
11	2015/09/11	37.23	54.49	29.5	3.6	29	64	-56	152	41	-139
12	2015/09/15	37.32	54.29	28	4.7	308	52	50	181	52	129
13	2015/09/18	37.31	54.31	27.6	3.5	312	90	70	222	20	180
14	2016/03/13	37.20	55.54	21.3	4	239	90	45	149	45	-180
15	2016/04/13	37.25	54.75	25.8	3.8	245	67	45	135	48	149
16	2017/04/22	37.34	54.43	26.2	4.2	313	48	-48	79	56	-127
17	2017/05/16	37.26	54.34	29	3.7	42	64	-16	140	75	-153
18	2017/06/30	37.22	54.44	17.7	4	42	54	37	288	60	137
19	2017/08/22	36.94	55.22	32.9	4.1	195	69	40	88	52	153
20	2017/11/01	37.36	54.02	17	3.9	2	74	-48	108	43	-157



شکل ۲- سازوکار کانونی حل شده برای زمین‌لرزه ۲۰۱۱/۰۲/۰۷ با بزرگای ۳/۷ در شمال آق‌قلا.

Figure 2. The resolved focal mechanism for the 2011/02/07 earthquake with a magnitude of 3.7 in the north of Agh-Ghala.

چرخشی یک روش جدید از فرایند وارون‌سازی تکراری است. این روش نیز مانند همه روش‌های وارونگی تکراری، مبتنی بر آزمودن تعداد زیادی از تنسورهای تنش با هدف به حداقل رساندن تابع عدم انطباق است. در اصل، کل محدوده جهت‌گیری برای سه محور تنش و نسبت تنش باید برای یافتن حداقل مقدار تابع عدم انطباق (جستجوی شبکه) بررسی شود (Delvaux and Sperner, 2003). نوع رژیم تنش به صورت عددی با یک شاخص R' بیان می‌شود که برای محاسبه میانگین رژیم تنش منطقه‌ای از یک سری تنسورهای تنش منفرد در ناحیه معین مناسب است. این شاخص از $0-3$ متغیر است که به صورت رابطه زیر تعریف می‌شود (Delvaux et al., 1997; Delvaux and Sperner, 2003).

الف- اگر σ_1 قائم است (رژیم تنشی کششی، NF) $R'=R$
 ب- اگر σ_2 قائم است (رژیم تنش راستالغز، SS) $R'=2-R$
 ج- اگر σ_3 قائم است (رژیم تنش فشارشی، TF) $R'=2+R$

برنامه Win-Tensor نتایج تحلیل وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی را نیز مطابق نقشه تنش جهانی (Heidbach et al., 2007) به صورت کیفی A (بهترین)، B (خوب)، C (متوسط)، D (ضعیف) و E (خیلی ضعیف) ارزیابی می‌کند (Delvaux and Sperner, 2003).

۴- نتایج و بحث

نتایج به‌دست آمده در این پژوهش (جدول ۱، پیوست ۱ و شکل ۳) نشان می‌دهد که زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه با سازوکارهای مختلف (رانده، راستالغز و عادی) رخ داده‌اند. به عنوان مثال به سازوکار چیره معکوس زمین‌لرزه‌ها با شماره‌های ۵ و ۱۵، سازوکار چیره راستالغز زمین‌لرزه‌ها با شماره‌های ۱۲ و ۱۷ و نیز سازوکار چیره عادی زمین‌لرزه‌ها با شماره‌های ۳ و ۱۶ اشاره کرد. اما در مجموع سازوکار چیره اکثر زمین‌لرزه‌های کوچک راستالغز می‌باشد. افزون بر سازوکار کانونی حل شده در این مطالعه، جهت تحلیل بهتر تنش، سایر سازوکارهای کانونی منتشر شده معتبر

یکی از روش‌های تعیین میدان تنش لرزه‌زمین‌ساختی، روش وارونگی تنسور تنش یا وارون‌سازی از طریق داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها است. تجزیه و تحلیل تنش زمین‌ساختی براساس روش وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه با استفاده از طیف گسترده‌ای از روش‌های وارونگی مستقیم از طریق حداقل مربعات الگوریتم‌های تکرارشونده (Etchecopar et al., 1981) و یا روش جستجوی شبکه‌ای (Gephart, 1990b; Hardcastle and Hills, 1991; Unruh et al., 1996) انجام می‌شود. در مجموع فرایند وارونگی تنسور تنش بر پایه نظریه والاس - بات استوار است. بر پایه این نظریه، بردار لغزش حاصل از حل سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها در جهت ماکزیمم تنش برشی حل شده بر صفحه گسل می‌باشد (Wallace, 1951; Bott, 1959). فرایند وارون‌سازی داده‌های لغزش گسل چهار متغیر تنسور تنش کاهش یافته را محاسبه می‌کند. این متغیرها عبارتند از: محور تنش اصلی بیشینه فشارش (σ_1)، متوسط (σ_2)، کمینه (σ_3) و نسبت تنش ($R = \sigma_2 - \sigma_3 / \sigma_1 - \sigma_3$) (Delvaux and Sperner, 2003).

در این مطالعه وارون‌سازی تنسور تنش با استفاده از روش‌های دووجهی مستقیم (Right Dihedron) و بهینه‌سازی چرخشی (Rotational Optimization) از طریق برنامه Win-Tensor (Delvaux and Sperner, 2003) انجام شده است. روش شناخته شده دووجهی مستقیم در ابتدا توسط آنجلیه و مک‌کلر (Angelier and Mechler, 1977) به عنوان یک روش گرافیکی برای تعیین محدوده‌ی جهت‌گیری‌های ممکن محورهای تنش σ_1 و σ_3 در تحلیل گسل توسعه یافته بود که در برنامه‌های مختلف پیاده‌سازی شد. روش دو وجهی مستقیم توسط دلواکس و اسپرنر (Delvaux and Sperner, 2003) بهبود یافته است. این روش یک برآورد اولیه از نسبت تنش و انتخاب داده ارائه می‌کند. در مجموع، معمولاً روش بهبود یافته برای ساخت زیر مجموعه‌های داده اولیه از مجموعه داده‌های خام و جهت تخمین اولیه چهار تنسور تنش تقلیل یافته طراحی شده است. تنسور تنش اولیه محاسبه شده و مجموعه داده انتخاب شده به عنوان نقطه شروع در روش بهینه‌سازی چرخشی استفاده می‌شود. روش بهینه‌سازی

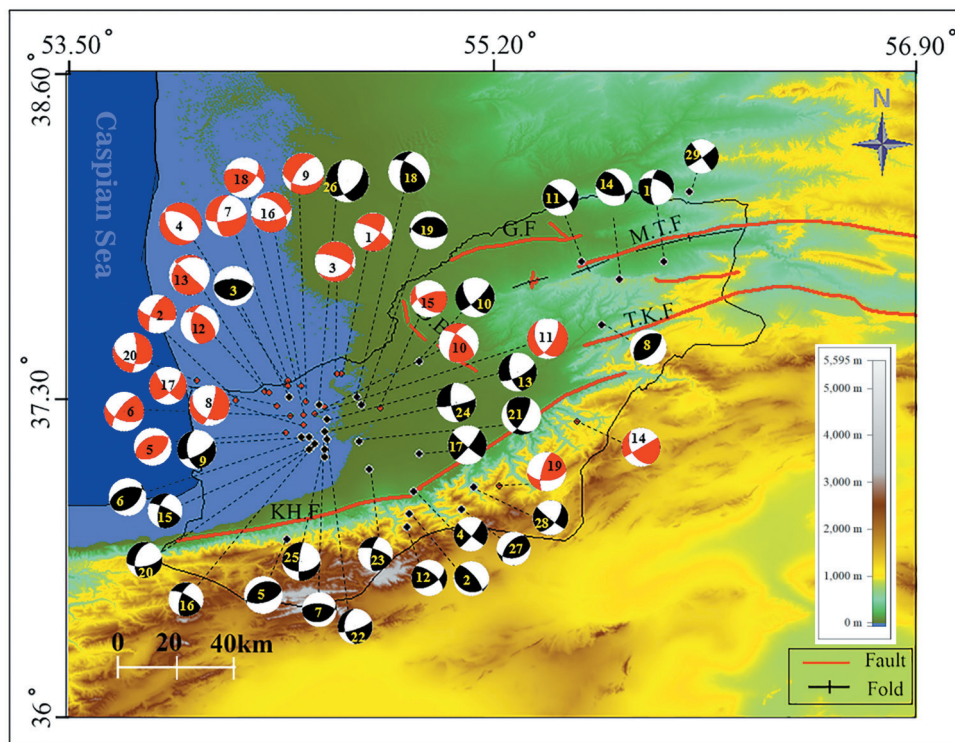
راستالغز و حتی عادی در آن دیده می‌شود که می‌تواند نشان از پیچیده بودن ویژگی زمین‌ساختی منطقه باشد. با استناد به مطالعه صورت گرفته توسط رادفر و همکاران (Radfar et al., 2019) بر روی مقاطع لرزه‌ای، که ضمن تأیید حضور سازندهای کپه‌داغ باختری در زیر رسوبات دشت، گسل‌های قاشقی معکوس (گسل‌های عادی وارون شده) در سازندهای کهن‌تر و گسل‌های راستالغز و عادی در توالی‌های جوان‌تر تشخیص داده شده است. همچنین حمیدی (۱۴۰۰) نشان داده است که گسل‌های کپه‌داغ باختری مانند تکل کوه و مراوه‌تپه با سازوکار چیره رانده به سمت دشت در زیر پوشش رسوبی امتداد یافته و گسل‌های راستالغز به صورت ساختارهای گل مانند در لایه‌های روبی دیده شده است.

نیز استفاده گردید. داده‌های گردآوری شده از کاتالوگ برخط IRSC و مقالات منتشر شده پژوهشگرانی چون پرستلی و همکاران (Priestley et al., 1994) و نعمتی و همکاران (Nemati et al., 2013) می‌باشد (جدول ۲). تمام زمین‌لرزه‌هایی که در این پژوهش جهت تحلیل تنش استفاده شده در نقشه شکل ۳ ارائه شد. سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های جدول ۱ با رنگ قرمز و جدول ۲ با رنگ سیاه بر روی نقشه شکل ۳ نشان داده شده و شماره زمین‌لرزه‌ها بر روی شکل نیز مطابق با جدول‌های ۱ و ۲ است. همان‌طور که در شکل ۳ دیده می‌شود، بیشتر زمین‌لرزه‌ها در بخش باختری منطقه مورد مطالعه (دشت گرگان) تمرکز دارند و تنوعی از داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها اعم از رانده،

جدول ۲- داده‌های سازوکار زمین‌لرزه‌ها برگرفته از منابع (۱) Priestley et al., 1994؛ (۲) Nemati et al., 2013؛ (۳) کاتالوگ CMT؛ (۴) کاتالوگ برخط IRSC.

Table 2. Earthquake mechanism data taken from sources 1) Priestley et al., 1994; 2) Nemati et al., 2013; 3) CMT catalog; 4) IRSC online catalog.

No.	Date	Lat. (°E)	Lon. (°N)	Depth (Km)	Mag.	Nodal plane 1			Nodal plane 2			Source
						Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	Strike (°)	Dip (°)	Rake (°)	
1	1970/07/30	37.84	55.89	11	6.4	293	56	-150	185	65	-38	1
2	1985/10/29	36.83	54.87	13	6.2	246	66	71	106	30	126	1
3	1999/11/19	37.30	54.39	26	5.4	080	32	78	274	58	97	2
4	1999/11/26	36.92	54.89	4	5.3	106	22	58	320	71	102	3
5	2000/08/16	36.73	54.38	15	4.9	240	34	78	074	56	98	3
6	2004/10/07	37.14	54.47	28	5.5	047	44	71	252	48	107	2
7	2005/01/10	37.06	54.53	29	5.2	069	31	68	274	61	102	2
8	2006/11/11	37.59	55.64	7.5	4.1	045	55	90	225	35	90	2
9	2007/08/30	37.14	54.44	13	4.0	062	67	-45	173	49	-149	2
10	2008/05/15	37.44	54.91	10.8	4.1	047	78	-33	144	57	-165	2
11	2008/08/01	37.84	55.56	2.9	4.5	058	54	19	316	74	142	2
12	2008/08/25	36.78	54.86	23.1	4.0	058	57	32	309	63	142	2
13	2009/02/20	37.21	54.54	7.4	4.0	063	71	-36	166	56	-156	2
14	2009/04/15	37.77	55.71	9.4	4.1	095	52	50	328	52	129	2
15	2009/10/15	37.10	54.48	35.1	1.6	295	76	32	196	59	163	2
16	2009/10/15	37.11	54.49	38.3	2.2	300	70	30	198	62	157	2
17	2009/10/17	37.07	54.61	31.3	2.2	040	81	-5	130	85	-171	2
18	2009/10/26	37.30	54.66	44.3	3.8	305	60	42	190	54	142	2
19	2009/11/06	37.27	54.68	40.9	3.3	257	31	70	100	61	101	2
20	2009/11/16	37.09	54.47	15	3.6	80	62	-49	198	48	-141	2
21	2009/11/16	37.12	54.67	0.0	3.5	143	35	30	27	73	121	2
22	2009/12/03	37.13	54.54	15	3.6	072	77	-54	179	38	-158	2
23	2009/12/03	37.01	54.71	15	3.9	289	69	22	190	69	157	2
24	2009/12/14	37.16	54.53	19	3.4	78	81	-23	171	67	-170	2
25	2009/12/18	37.09	54.53	17	3.8	86	47	-14	185	80	-137	2
26	2010/03/04	37.27	54.51	23	4.6	045	54	-45	165	55	-45	2
27	2014/06/13	36.85	55.08	8	4.3	80	43	122	220	55	64	4
28	2020/09/06	36.94	55.13	5	5	36	61	-7	129	84	-151	4
29	2020/09/26	38.12	55.99	6	5.2	54	84	-1	144	89	-174	4



شکل ۳- سازوکارهای کانونی زمین‌لرزه‌ها در خاور کاسپین جنوبی. سازوکارهای حل شده در این مطالعه با رنگ قرمز و دیگر سازوکارهای گردآوری شده با رنگ سیاه نشان داده شده است. گسل‌ها مشابه شکل ۱ است.

Figure 3. Focal mechanisms of earthquakes in the east of the South Caspian. Mechanisms solved in this study are shown in red and other mechanisms in black. The names of faults are similar to Fig. 1.

سازندها) و بار دیگر با استفاده از داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها با بزرگای بزرگ‌تر و مساوی ۴ انجام شد (شکل ۵- a و b). همچنین به منظور دستیابی به یک دید کلی از رژیم تنش زمین‌ساختی منطقه و مقایسه آن با نتایج مربوط به زیر بخش دشت، جهت یافتگی تنش با استفاده از تمام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ منطقه خاور کاسپین جنوبی (محدوده استان گلستان) محاسبه شد (شکل ۵- c). افزون بر این، تحلیل وارون‌سازی به طور مجزا برای پهنه رخنمون یافته کپه‌داغ نیز انجام و مورد مقایسه قرار گرفته است (شکل ۵- d). نتایج حاصل از تحلیل برای هر کدام از موارد یاد شده، به صورت جهت‌گیری محورهای تنش اصلی $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ (به ترتیب با نشانگرهای دایره، مثلث و مربع) و محورهای جنبش‌شناختی P و B و T (به ترتیب با پیکان‌های آبی، سبز و قرمز) بر روی شبکه استریونوت ارائه شده است. کیفیت نتایج تحلیل وارون‌سازی انجام شده، در رده B و C می‌باشد. همچنین متغیرهای تنش محاسبه شده در جدول ۳ آورده شده است.

نتایج وارون‌سازی همه داده‌های سازوکارهای موجود در محدوده دشت مربوط به زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و کوچک‌تر، یک تنسور تنش چیره راستالغز $(SS: R^2=1.77 \pm 0.16)$ با کیفیت B را نشان می‌دهد (جدول ۳). میزان زاویه میل تنش‌های اصلی بیشینه، متوسط و کمینه به ترتیب ۳۰، ۵۵ و ۱۶ درجه است (شکل ۵- a) که نشان از یک رژیم تنش راستالغز با مؤلفه کوچک کششی می‌باشد. محورهای فشارش و کشش محاسبه شده برای این محدوده به ترتیب NE-SW و NW-SE به‌دست آمده است. این جهت‌یافتگی تنش‌های اصلی و محورهای جنبش‌شناختی می‌تواند با گسل‌های راستالغز راست‌بر با راستای تقریبی شمال‌خاوری- جنوب‌باختری تا شمالی- جنوبی و گسل‌های چپ‌بر با روند تقریبی شمال‌باختری- جنوب‌خاوری تا خاوری- باختری منطبق باشد. اما در همین محدوده، نتایج تحلیل وارون‌سازی برای زمین‌لرزه‌ها با کمینه بزرگای ۴، یک تنسور تنش چیره فشارشی $(TF: R^2=2.38 \pm 0.25)$ با کیفیت C را نشان می‌دهد که دارای

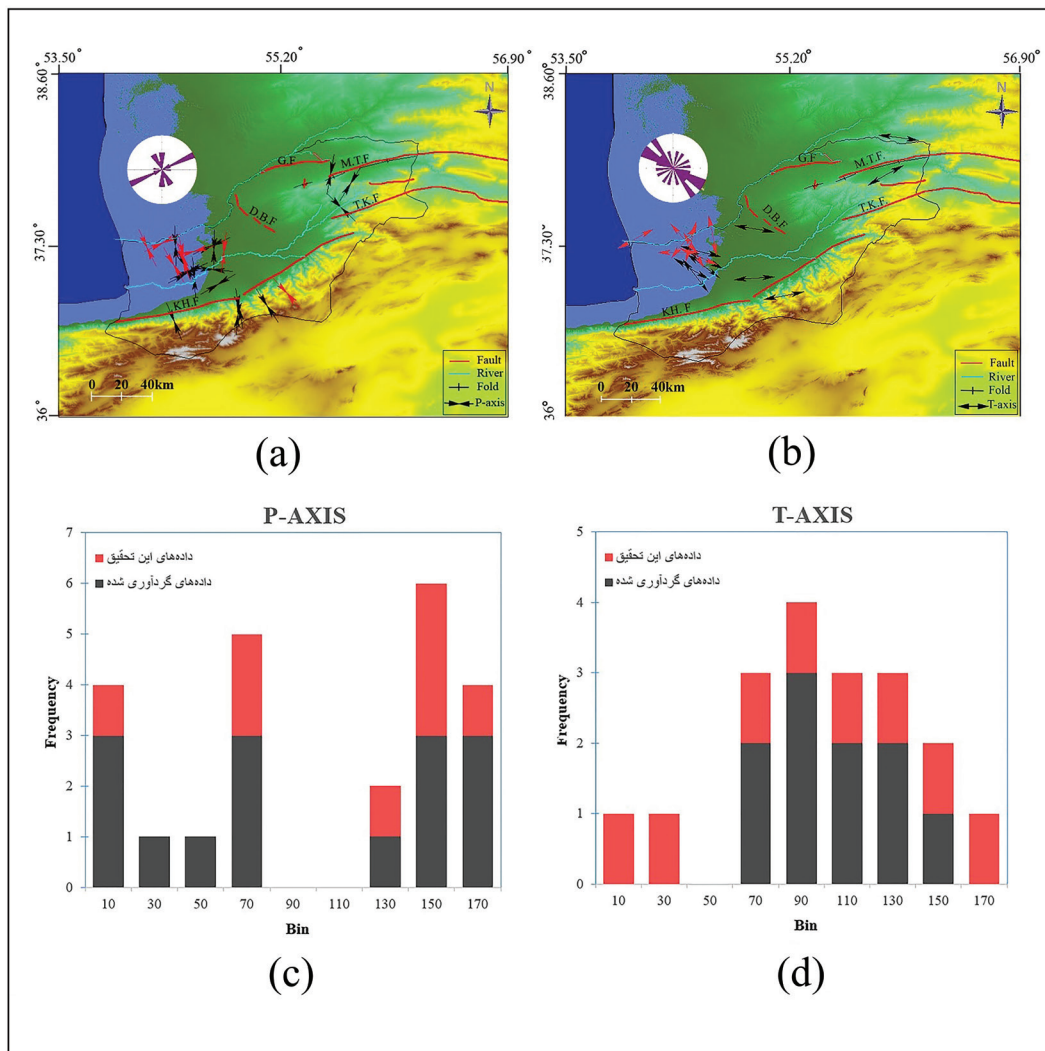
با توجه به شواهد به‌دست آمده در این مطالعات، مشاهده تنوعی از سازوکارها در این گستره دور از انتظار نیست.

در ادامه، روند محورهای جنبش‌شناختی P و T هر کدام از زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه محاسبه که زاویه میل آنها کم و حالتی نزدیک به افقی دارند، به صورت نقشه (شکل ۴- a و b) و نمودار هیستوگرام (شکل ۴- c و d) رسم شد. بنابراین، تعدادی کمی از زمین‌لرزه‌هایی که محورهای جنبش‌شناختی P یا T آنها زاویه میل بالایی داشتند در این شکل نشان داده نشده است. در این نقشه‌ها، محورهای P (پیکان به سمت داخل، شکل ۴- a) و T (پیکان به سمت بیرون، شکل ۴- b) به‌دست آمده از سازوکار کانونی حل شده در این مطالعه با رنگ قرمز و محورهای به‌دست آمده از سازوکار زمین‌لرزه‌های گردآوری شده با رنگ سیاه نشان داده شده است. نمودارهای هیستوگرام روند محورهای P (شکل ۴- c) و T (شکل ۴- d) با استفاده از تمام داده‌های نمایش داده شده در نقشه‌ها رسم شده است. همان‌طور که در نقشه‌ها و نمودارها دیده می‌شود، جهت‌یافتگی‌های متنوعی از این محورها قابل مشاهده است. اما بر اساس نمودار هیستوگرام، روند چیره محور P در جهت NW-SE (۱۴۰-۱۶۰ درجه) و محور T، E-W (۸۰-۱۰۰ درجه) می‌باشد. افزون بر نقشه‌ها و هیستوگرام‌ها، در شکل ۴ نمودار گل‌سرخ روند محورهای جنبش‌شناختی P و T حاصل از زمین‌لرزه‌های دشت گرگان نیز ترسیم و در داخل نقشه‌های مربوطه نشان داده شدند. همان‌طور که در این نمودارها دیده می‌شود، روند چیره محور P در دشت گرگان NE-SW (آزیموت ۶۰ تا ۷۰ درجه) و محور T، NW-SE (آزیموت ۱۲۰ تا ۱۶۰ درجه) می‌باشد. این روندها با روندهای چیره به‌دست آمده از نمودارهای هیستوگرام براساس تمام زمین‌لرزه‌ها متفاوت است که می‌تواند نشان از پیچیده بودن و احتمال وجود رژیم محلی افزون بر رژیم ناحیه‌ای در منطقه باشد.

جهت دستیابی به درک درستی از وضعیت رژیم تنش منطقه، ابتدا یک بار وارون‌سازی برای تمام زمین‌لرزه‌های گستره دشت (زیر بخش رخنمون نیافته

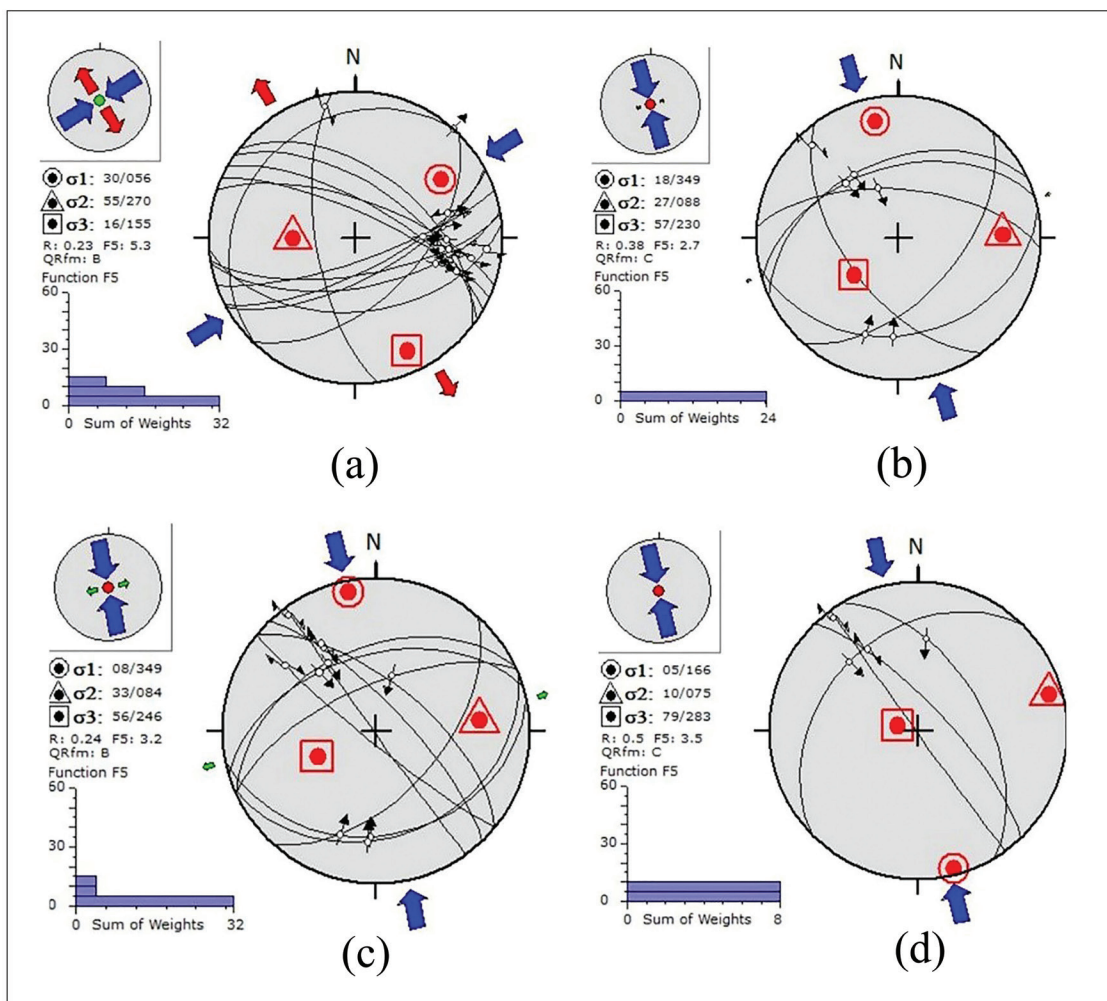
با روند NNW-SSE می‌باشد. تنش بیشینه، متوسط و کمینه به ترتیب برابر با ۳۳، ۸ و ۵۶ درجه است که حاکی از وجود یک مؤلفه خیلی کوچک راستالغز می‌باشد (شکل ۵- c). تحلیل برای داده‌های بخش رخنمون‌یافته کپه‌داغ یک تنسور تنش فشارشی (TF: $R'=2.5 \pm 0.14$) با کیفیت C را نشان می‌دهد. محور فشارش در این محدوده نیز دارای روند NNW-SSE می‌باشد و زاویه میل تنش‌های اصلی بیشینه، متوسط و کمینه به ترتیب ۵، ۱۰ و ۷۹ درجه است (شکل ۵- d). ساختارهایی مانند چین‌ها با روند NE-SW و گسل‌های معکوس مثل گسل‌های مراوه‌تپه و تکل‌کوه می‌تواند در این رژیم تشکیل شوند. نتایج به‌دست آمده برای این دو مورد اخیر، مشابه نتایج حاصل از زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر محدوده دشت است.

روند NNW-SSE می‌باشد. تنش بیشینه، متوسط و کمینه به ترتیب دارای زوایای ۱۸، ۲۷ و ۵۷ درجه می‌باشد که نشان‌دهنده یک رژیم فشارشی با یک مؤلفه کوچک راستالغز است (شکل ۵- b). بنابراین دو نوع رژیم تنش در این محدوده دیده می‌شود؛ فشارش در جهت NNW-SSE مرتبط با زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و رژیم راستالغز به دلیل تأثیر زمین‌لرزه‌های متعدد و کوچک‌تر منطقه. نعمتی و همکاران (Nemati et al., 2013) معتقد هستند که زمین‌لرزه‌ها با سازوکار راستالغز به همراه مؤلفه عادی در ژرفای کم و زمین‌لرزه‌ها با سازوکار رانندگی در ژرفای بیشتر رخ داده‌اند. تحلیل وارون‌سازی تمام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ منطقه مورد مطالعه نشان‌دهنده وجود یک تنسور تنش چیره فشارشی (TF: $R'=2.24 \pm 0.2$) کیفیت



شکل ۴- نقشه‌ها (a و b) و هیستوگرام‌ها (c و d). (a و c) روند محوری جنبش فشارشی (P) و (b و d) روند محوری کششی (T) به‌دست آمده برای هر یک از سازوکار زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه. پیکان‌های قرمز نشان‌دهنده محوری به‌دست آمده از سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های حل شده در این مطالعه و پیکان‌های سیاه نشان‌دهنده محوری به‌دست آمده از داده‌های سازوکار کانونی گردآوری شده است. نمودار گل‌سرخي داخل نقشه‌ها مربوط به روند محوری جنبش‌شناختی حاصل از زمین‌لرزه‌های دشت گرگان است. گسل‌ها مشابه شکل ۱ است.

Figure 4. Maps (a and b) and histograms (c and d). a, c) the trend of compressive kinematic axes (P), and b, d) the trend of tensile axes (T) obtained for each of the studied earthquake mechanisms. The red arrows indicate the axes obtained from the focal mechanism of the earthquakes solved in this study and the black arrows indicate the axes obtained from the collected focal mechanism data. Rose diagrams inside the maps are related to the trend of kinematic axes resulting from Gorgan-plain's earthquakes. The faults are similar to Fig. 1.



شکل ۵- نتایج وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها بر روی شبکه استریونت برای (a) تمام زمین‌لرزه‌ها در گستره دشت گرگان؛ زمین‌لرزه‌ها با کمینه بزرگای ۴ در (b) محدوده دشت؛ (c) منطقه مطالعه شده (شامل دشت گرگان و نواحی مجاور) و (d) محدوده رخنمون‌یافته کپه‌داغ.

Figure 5. The results of the inversion of the earthquake focal mechanism data on the Stereonet for a) all earthquakes in the Gorgan-plain, and earthquakes with a minimum magnitude of 4 in, b) the plain, c) studied areas (including the Gorgan-plain and adjacent areas), and d) the Kopeh-Dagh.

جدول ۳- پارامترهای تنش حاصل از وارون‌سازی تنش مطابق شکل ۵، SS و TF به ترتیب نشان‌دهنده رژیم‌های زمین‌ساختی راستالغز و فشارشی می‌باشد. StDev انحراف استاندارد و SH_{max} بیشینه محور تنش افقی است.

Table 3. The stress parameters resulting from the stress inversion according to Fig. 5. SS and TF indicate the strike-slip and compressive tectonic regimes, respectively. StDev is the standard deviation and SH_{max} is the maximum horizontal stress axis.

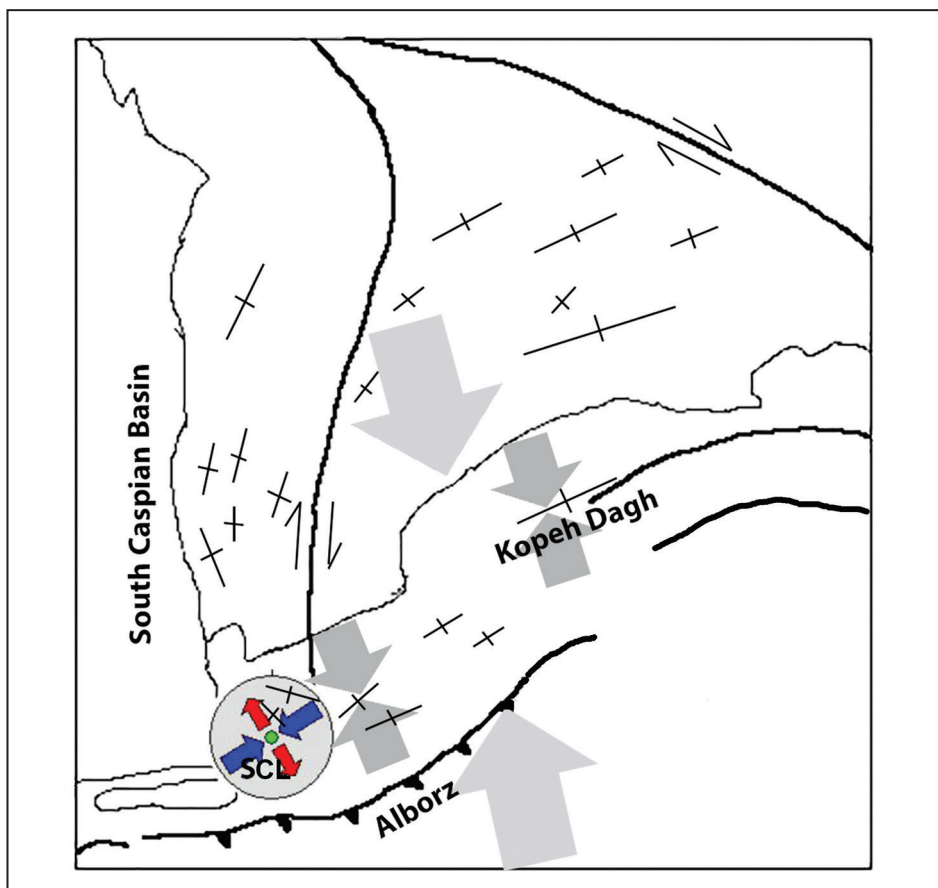
NO.	Tectonic stress Regime			Horizontal Stress Axis	
	Regime	R'	StDev.	SH _{max}	StDev.
a	SS	1.77	± 0.16	058	± 12
b	TF	2.38	± 0.25	164	± 20.8
c	TF	2.24	± 0.2	168	± 14.9
d	TF	2.5	± 0.14	167	± 20.6

دیگر زمین‌لرزه‌ها برای دشت گرگان به‌دست آمد، می‌تواند با گسل‌های راستالغز راست‌بر با راستای N-S تا NNE-SSW در منطقه منطبق باشد. به نظر می‌رسد این راستا با مرز اشاره شده در مطالعه بربریان (Berberian, 1983) و خطواره مغناطیسی آق‌فلا در نقشه ساختاری تهیه شده توسط صفری و همکاران (۱۳۹۹) همخوانی دارد. افزون بر این، مطالعات انجام شده بر روی چین‌های گسترده حوضه کاسپین جنوبی و پیرامون آن (Berberian, 1983)، یک تغییر روند تدریجی و آشکار در محور چین‌های زیرسطحی در دشت گرگان مشاهده شده است. به گونه‌ای که در بخش خاوری دشت گرگان محور چین‌ها از NE-SW به صورت NW-SE تا N-S در بخش باختری دشت گرگان (مرز با کاسپین جنوبی) تغییر یافته است. می‌توان ادعان داشت که دو رژیم تنش به‌دست آمده در این پژوهش می‌تواند عامل تغییر روند ساختارهای منطقه باشد. قاسمی و همکاران (۱۳۸۶) نیز معتقدند که تغییر روند چین‌ها در کپه‌داغ تا درون حوضه کاسپین می‌تواند در نتیجه تغییر یا تبدیل میدان تنش ناحیه‌ای در این منطقه باشد.

با توجه به نتایج حاصله، رژیم تنش زمین‌ساختی منطقه مورد مطالعه در شکل ۶ خلاصه شده است.

در مجموع، نتایج حاصل از وارون‌سازی سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر دشت، تمام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ در خاور کاسپین جنوبی و زمین‌لرزه‌های بخش رخنمون‌یافته کپه‌داغ، نشان‌دهنده رژیم فشاری با روند NNW-SSE است. زمانی و همکاران (Zamani et al., 2008) نیز با استفاده از وارون‌سازی تنسور تنش براساس سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها یک رژیم فشاری با روند NNE-SSW برای منطقه شمال‌خاوری ایران و یک رژیم فشاری با روند NNW-SSE برای محدوده کپه‌داغ باختری، البرز خاوری و شمال باختری گسل درونه برآورد کرده‌اند (شکل‌های ۳ و ۴ از Zamani et al., 2008). این پژوهشگران عقیده دارند که تغییر روند محورهای جنبش‌شناختی با تغییر روند ساختارهای منطقه همخوانی داشته است. روند فشاری NNW-SSE به‌دست آمده در پژوهش یادشده تا حدودی با نتایج به‌دست آمده برای زمین‌لرزه‌ها با کمینه بزرگای ۴ به‌دست آمده در پژوهش حاضر همخوانی دارد. همچنین، این روند با نتایج پژوهش نعمتی (۱۳۹۷) که در آن برابند محورهای کشش و فشارش در مناطق مختلف ایران محاسبه شده مطابقت دارد.

رژیم تنش متفاوت راستالغز که از تحلیل زمین‌لرزه‌های کوچک‌تر به همراه



شکل ۶- نقشه محورهای جنبش‌شناختی به‌دست آمده در این پژوهش. ساختارهای نشان داده شده برگرفته از بربریان (Berberian, 1983) با اندکی تغییر که در آن چین‌های نوژن-کواترنری (Berberian, 1977; Huber, 1977) به صورت دو خط عمود بر هم مشخص شده است. پیکان‌های خاکستری بزرگ‌تر، تنش حاصل از تحلیل زمین‌لرزه‌ها با کمینه بزرگای ۴ کل منطقه مورد مطالعه و پیکان‌های خاکستری کوچک‌تر نشان‌دهنده نتایج تحلیل مرتبط با زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ بخش رخنمون‌یافته کپه‌داغ (سمت راست) و دشت گرگان (چپ) است. نتایج تحلیل برای تمام زمین‌لرزه‌های دشت در یک شبکه استریونت با پیکان‌های آبی (محور فشاری) و پیکان‌های قرمز کششی) نمایش داده شده است.

Figure 6. The map of kinematic axes obtained in this research. The structures shown are taken from Berberian (1983) with a slight modification where the Neogene-Quaternary folds (Berberian, 1976a, 1981; Huber, 1977) are marked as two perpendicular lines. The larger gray arrows show the stress from the analysis of the earthquakes with a minimum magnitude of 4 in the entire study area and the smaller gray arrows show the results of the analysis related to the earthquakes with a minimum magnitude of 4 of Kopeh-Dagh (right) and Gorgan-plain (left). The analysis results for all earthquakes of the plain are displayed in a Stereonet with blue arrows (compressive axis) and red arrows (tensile axis).

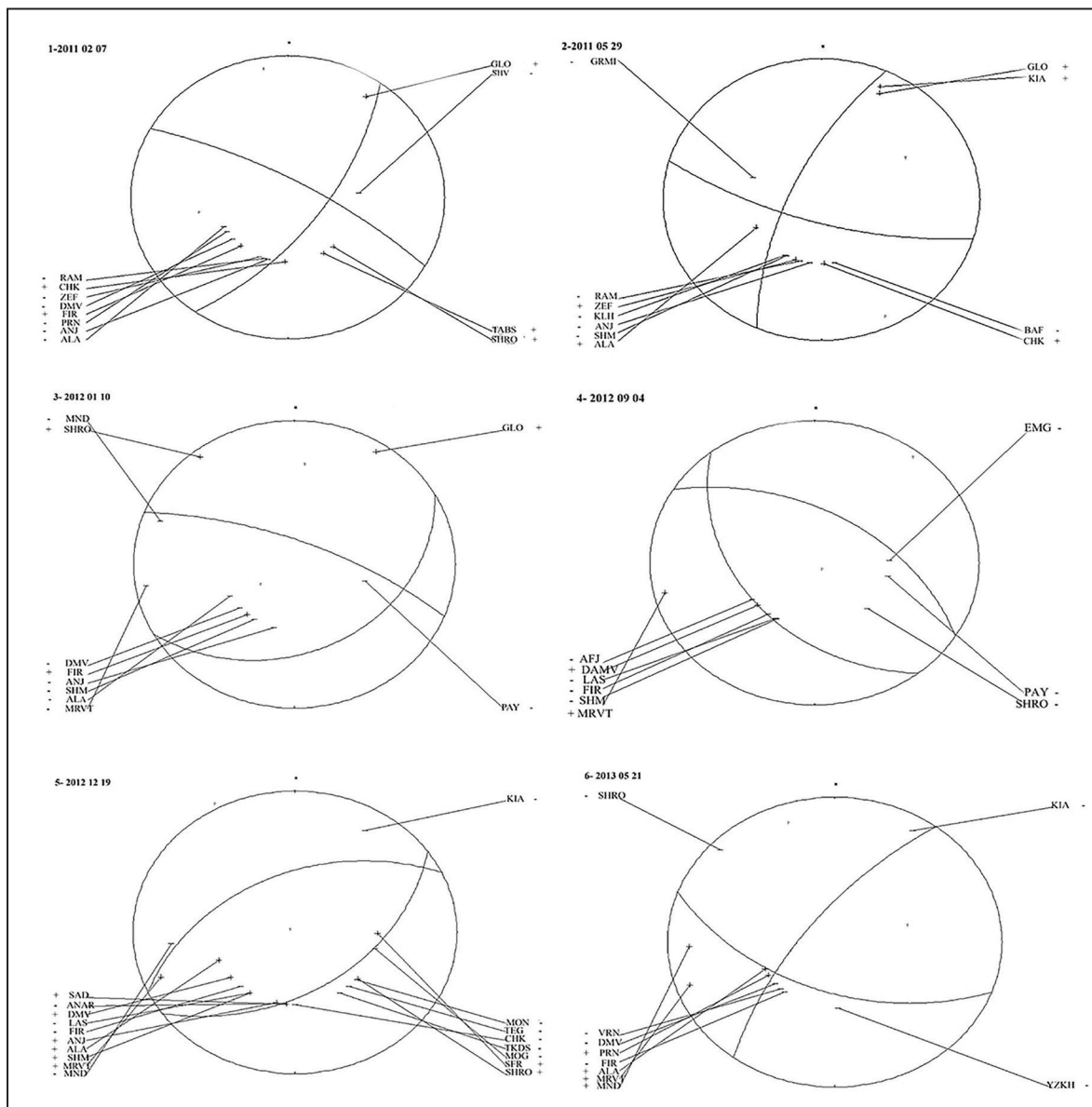
۵- نتیجه‌گیری

الف- یک رژیم تنش چیره راست‌الغز که در آن محورهای فشارش و کششی محاسبه شده به ترتیب NE-SW و NW-SE به دست آمده و ب- یک رژیم فشارشی چیره در جهت NNW- SSE. نتایج تحلیل وارون‌سازی تمام زمین‌لرزه‌های بزرگ‌تر و مساوی ۴ خاور کاسپین جنوبی و بخش رخنمون‌یافته کپه‌داغ، همسو با رژیم فشارشی دشت یعنی دارای روند NNW- SSE می‌باشد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که رژیم تنش اصلی در خاور کاسپین جنوبی از نوع فشارشی و در جهت تقریبی شمال باختری - جنوب خاوری است که ساختارهای اصلی منطقه مانند چین‌ها و گسل‌های رانندگی با روند NE-SW تحت آن تشکیل شده است، اما در محدوده دشت گرگان، افزون بر رژیم تنش یادشده، یک رژیم راست‌الغز نیز وجود دارد. به نظر می‌رسد تنوع روندهای ساختاری در محدوده دشت گرگان حاصل هر دو رژیم تنش باشد.

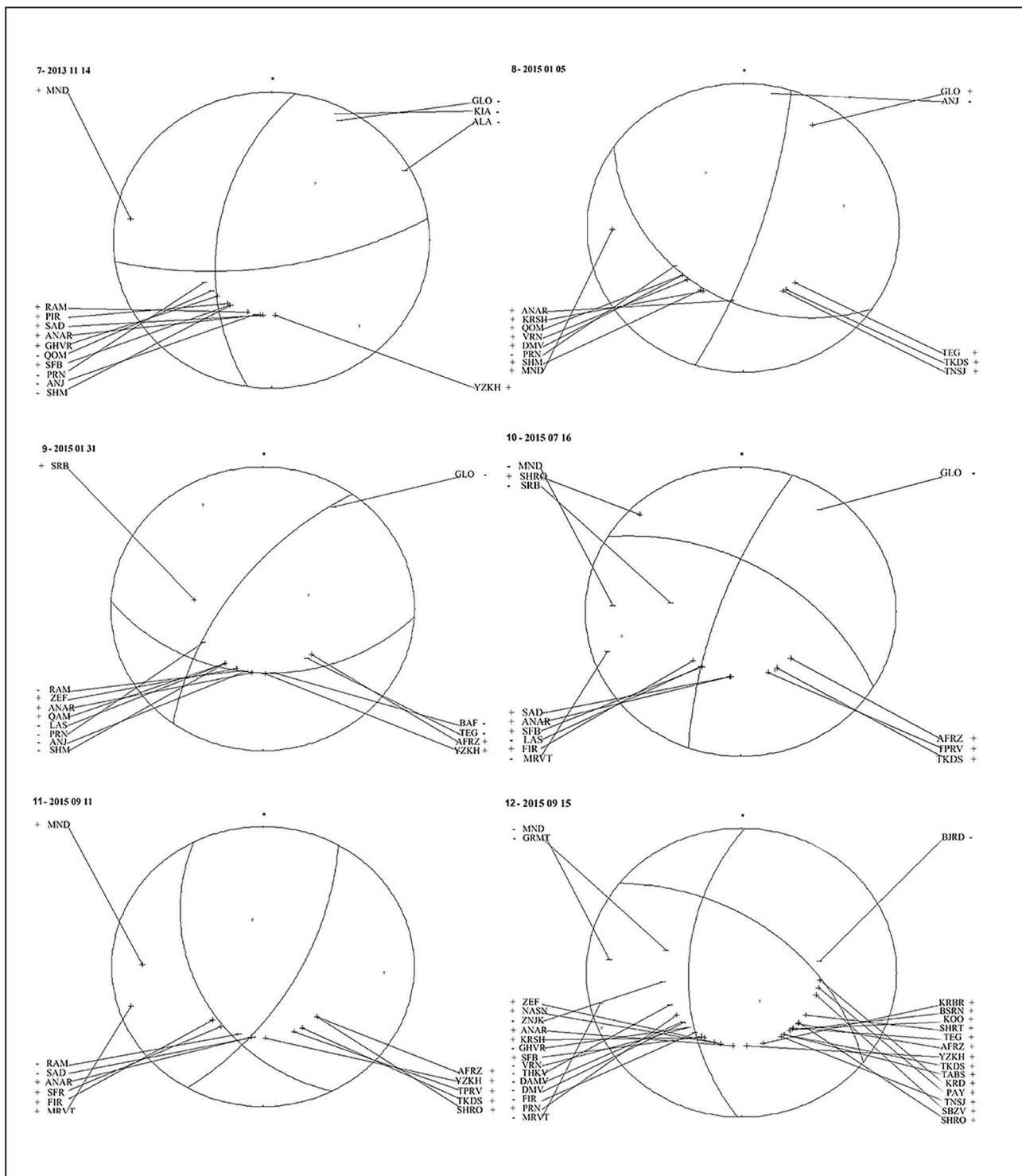
در این مطالعه با هدف دستیابی به رژیم تنش زمین‌ساختی دشت گرگان در خاور حوضه کاسپین جنوبی و نواحی مجاور آن، حل سازوکار کانونی ۲۰ زمین‌لرزه با حداقل بزرگای ۳ در بازه زمانی ۲۰۱۱ تا ۲۰۲۰ که دارای اطلاعات مناسب و کافی بوده‌اند، انجام شد. این نتایج نشان‌دهنده رخداد زمین‌لرزه‌های مورد مطالعه با سازوکارهای مختلف اعم از راننده، راست‌الغز و عادی است که می‌تواند حاکی از پیچیده بودن ویژگی زمین‌ساختی منطقه باشد. در راستای دستیابی به رژیم تنش، تحلیل وارون‌سازی داده‌های سازوکار کانونی زمین‌لرزه‌ها انجام شده است که علاوه بر استفاده از سازوکارهای کانونی حل شده، از داده‌های دیگر منابع معتبر نیز استفاده شد. نتایج تحلیل وارون‌سازی انجام شده در گستره دشت بسته به بزرگای زمین‌لرزه‌های استفاده شده در تحلیل، نشان‌دهنده دو رژیم تنش متفاوت است؛

پیوست ۱- سازوکارهای حل شده زمین‌لرزه‌ها در این مطالعه

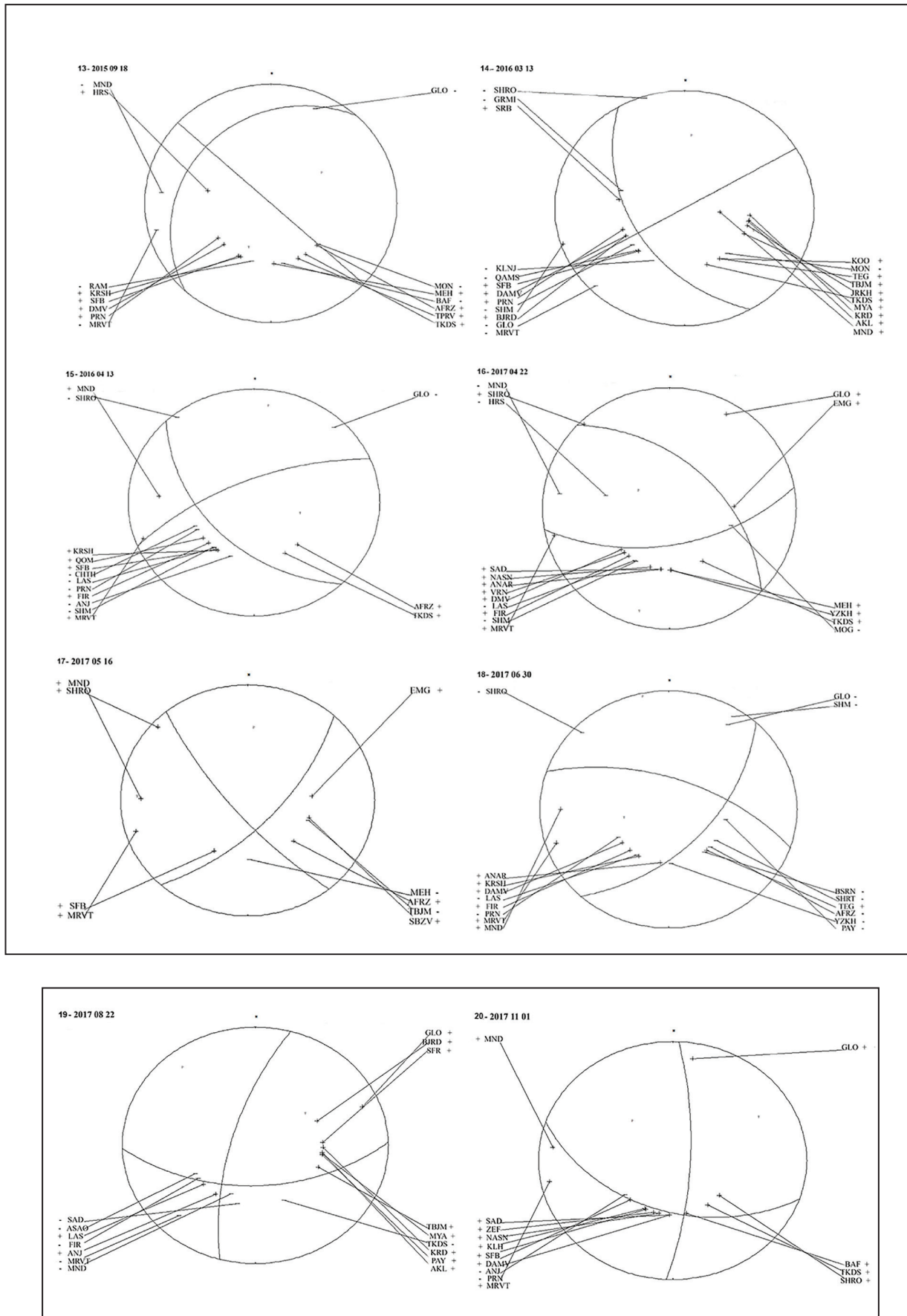
Appendix 1. Resolved mechanisms of earthquakes in this study



Continued. Appendix 1.



Continued. Appendix 1.



کتابنگاری

- افشارحرب، ع.، ۱۳۷۳، زمین‌شناسی ایران، زمین‌شناسی کپه‌داغ، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، تهران، سازمان زمین‌شناسی کشور، جلد ۱۱، ۲۷۵ ص.
- آق‌آتابای، م. و تورانی، م.، ۱۳۹۷، لرزه‌زمین‌ساخت غرب استان گلستان، شرق ناحیه خزر جنوبی، فصلنامه زمین‌شناسی ایران، شماره ۴۵، ص ۷۱-۸۵.
- آق‌آتابای، م.، ۱۳۹۳، تجزیه و تحلیل چند فرکتالی مراکز سطحی زمین‌لرزه‌های استان گلستان، علوم زمین، شماره ۹۲، ص ۱۲۳-۱۲۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43691>.
- پورتقوی، ا. ن.، پورکرمانی، م.، قرابیگلی، غ. و شرکتی، ش.، ۱۳۹۳، الگوی چین‌خوردگی در بخش باختری کمربند چین‌خورده کپه‌داغ (شمال خاور ایران)، علوم زمین، سال بیست و سوم، شماره ۹۱، ص ۱۵۳-۱۶۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2014.43809>.
- حمیدی، ر.، ۱۴۰۰، بررسی الگوی دگرریختی‌های زمین‌ساختی کپه‌داغ غربی، رساله دکتری دانشگاه گلستان، ۲۷۷ ص.
- روستایی، م.، روستایی، م.، زمانی، ب. و نعمتی، م.، ۱۳۹۴، بررسی وضعیت تنش نوزمین‌ساختی و ارائه مدل کینماتیکی در دشت گرگان، شمال خاوری ایران، علوم زمین، شماره ۹۸، ص ۳۷۵-۳۸۴. <https://doi.org/10.22071/gsj.2016.41258>.
- شهیدی، ع.، نظری، ح. و قائمی، ف.، ۱۳۹۲، زمین‌ساخت ایران (کپه‌داغ)، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین، ۱۹۷ ص.
- صفری، ح. ا.، رضادوست، م. و رقیمی، م.، ۱۳۹۹، تعیین جایگاه زمین‌ساختی گلفشان‌های غرب استان گلستان به کمک تکنیک‌های زمین‌اطلاعاتی، زمین‌شناسی کاربردی پیشرفته، دوره ۱۰، شماره ۳. <http://doi.org/10.22055/AAG.2020.32110.2071>
- قاسمی، م. ر.، محمدخانی، ح. و عبدالمهی، ع.، ۱۳۸۶، گذر از برپایی در کپه‌داغ به فرونشینی در کاسپین جنوبی، معرفی گسله‌های نوساخته گنبد کاووس و یساقی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران، بیست و ششمین گردهمایی علوم زمین.
- لشکری، ا.، قاسمی، م. و قرشی، م.، ۱۳۸۸، کارکرد گسل کاسپین (خزر) بر زمین‌ریخت‌شناسی گستره قائمشهر، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران، سال نوزدهم، شماره ۷۳، ص ۱۷-۲۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2010.57196>.
- نظری، ح. و شهیدی، ع.، ۱۳۹۰، زمین‌ساخت ایران "البرز"، انتشارات سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، پژوهشکده علوم زمین، ۹۷ ص.
- نعمتی، م.، ۱۳۹۷، بررسی روش‌های مختلف برآورد کرنش و تنش لرزه‌ای و برآورد نرخ کوتاه‌شدگی پوسته زمین در ایران با به کارگیری سازوکار زمین‌لرزه‌ها، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۲، شماره ۲۳، ص ۱۲۸-۱۳۹. <https://doi.org/10.22084/NFAG.2018.14088.1263>.
- نواب‌پور، پ.، حیدرزاده، ق.، مافی، آ. و حقی‌پور، ن.، ۱۳۸۲، الگوی دگرریختی و پهنه‌بندی ساختاری ایالت زمین‌ساختی کپه‌داغ، بیست و دومین گردهمایی علوم زمین.
- یاسینی، ا.، ۱۳۶۰، نگاهی به رسوبات نئوژن حوزه پاراتتیس جنوب دریای خزر در منطقه واقع بین علمده تا نکارود، مجله انجمن نفت ایران، شماره ۸۳.

References

- Agh-Atabai, M., 2014. *Multifractal Analysis of Earthquake Epicenters in the Golestan*, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 23(92), 123-128. doi:10.22071/gsj.2014.43691 (in Persian).
- Aki, K., and Richards, P.G., 1980. *Quantative seismology: Theory and methods*. San Francisco: Freeman, Vol. I, 557 p.
- Allen, M.B., Jones, S., Ismail-Zadeh, A., Simmons, M., and Anderson, L., 2002. Onset of subduction as the cause of rapid Pliocene-Quaternary subsidence in the South Caspian basin, *Geology*, 30(9), 775-778. doi: 10.1130/0091-7613(2002)030<0775:OOSATC>2.0.CO;2.
- Allen, M.B., Vincent, S.J., Alsop, G.I., Ismail-zadeh, A., and Flecker, R., 2003. Late Cenozoic deformation in the South Caspian region: effects of a rigid basement block within a collision zone. *Tectonophysics*, 366(3-4), 223-239. doi:10.1016/S0040-1951(03)00098-2.
- Ambraseys, N., and Melville, C., 1982. *A history of persian earthquakes*, Cambridge University Press, New York, 219 p.
- Angelier, J., 1991. Inversion directe et recherche 4-D: comparaison physique et mathématique de deux modes de détermination des tenseurs des paléocontraintes en tectonique de failles. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 312(10), 1213-1218.
- Angelier, J., and Mechler, P., 1977. Sur une methode graphique de recherche des contraintes principales egalement utilisables en tectonique et en seismologie: la methode des diedres droits. *Bulletin de la Société géologique de France*, 7(6), 1309-1318. doi:10.2113/gssgfbull. S7-XIX.6.1309.
- Berberian, M., 1976a. Seismotectonic map of Iran, 1:250 000. In *Contribution to the seismotectonics of Iran (Part II)*. Geological Survey of Iran, No. 39, 516 p.
- Berberian, M., 1981. Active faulting and tectonics of Iran. *Zagros Hindu Kush Himalaya Geodynamic Evolution*, 3, 33-69. doi:10.1029/GD003p0033.
- Berberian, M., 1983. The southern Caspian: a compressional depression floored by a trapped, modified oceanic crust, *Canadian Journal of Earth Sciences*, 20(2), 163-183. doi: 10.1139/e83-015
- Berberian, M., and Walker, R., 2010. The Rudbār Mw 7.3 earthquake of 1990 June 20; seismotectonics, coseismic and geomorphic displacements, and historic earthquakes of the western 'High-Alborz', Iran, *Geophysical Journal International*, 182(3), 1577-1602. doi: 10.1111/j.1365-246X.2010.04705.x.
- Bott, M.H.P., 1959. The mechanics of oblique slip faulting. *Geological magazine*, 96(2), 109-117.
- Carey-Gailhardis, E., and Mercier, J.L., 1987. A numerical method for determining the state of stress using focal mechanisms of earthquake populations: application to Tibetan teleseisms and microseismicity of Southern Peru, *Earth and Planetary Science Letters*, 82(1-2), 165-179. doi:10.1016/0012-821X(87)90117-8.

- Delvaux, D., and Sperner, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program, Geological Society, London, Special Publications, 212(1), 75-100. doi: 10.1144/GSL.SP.2003.212.01.06.
- Delvaux, D., Moeys, R., Stapel, G., Petit, C., Levi, K., Miroschnichenko, A., Ruzhich, V., and San'kov, V., 1997. Paleostress reconstructions and geodynamics of the Baikal region, central Asia, Part 2. Cenozoic rifting. Tectonophysics, 282(1-4), 1-38. doi:10.1016/S0040-1951(97)00210-2.
- Etchecopar, A., Vasseur, G., and Daignieres, M., 1981. An inverse problem in microtectonics for the determination of stress tensors from fault striation analysis, Journal of Structural Geology, 3(1), 51-65. doi:10.1016/0191-8141(81)90056-0.
- Gephart, J.W., 1990b. FMSI: A FORTRAN program for inverting fault/slickenside and earthquake focal mechanism data to obtain the regional stress tensor, Computers & Geosciences, 16(7), 953-989. doi:10.1016/0098-3004(90)90105-3.
- Ghassemi, M.R., Mohammadkhani, H., and Abdollahi, A., 2007. *The transition from uplift in the Kopeh-Dagh to subsidence in the South Caspian, introducing the newly known Gonbad-e-Kavous and Yasaghi faults, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran 26th symposium of Geosciences (in Persian)*.
- Hamidi, R., 2021. *Investigation on tectonic deformation patterns in western Kopeh Dagh, Ph.D. thesis, Univ. of Golestan, 277 p (in Persian)*.
- Hardcastle, K.C., and Hills, L.S., 1991. BRUTE3 and SELECT: Quickbasic 4 programs for determination of stress tensor configurations and separation of heterogeneous populations of fault-slip data, Computers & Geosciences, 17(1), 23-43. doi:10.1016/0098-3004(91)90078-R
- Havskov, J., and Ottemöller, L., 1999. SEISAN earthquake analysis software, Seismological Research Letters, 70(5), 532-534. doi:10.1785/gssrl.70.5.532.
- Heidbach, O., Reinecker, J., Tingay, M., Müller, B., Sperner, B., Fuchs, K., and Wenzel, F., 2007. Plate boundary forces are not enough: Second and third order stress patterns highlighted in the World Stress Map database, Tectonics, 26(6). doi: 10.1029/2007TC002133.
- Hollingsworth, J., Jackson, J., Walker, R., Reza Gheitanchi, M., and Javad Bolourchi, M., 2006. Strike-slip faulting, rotation, and along-strike elongation in the Kopeh Dagh mountains, NE Iran, Geophysical Journal International, 166(3), 1161-1177. doi: 10.1111/j.1365-246X.2006.02983.x.
- Huber, H., 1977. Geological map of Iran, 1: 1,000,000 with explanatory note. National Iranian Oil Company. Exploration and Production Affairs, Tehran.
- IEES, International Institute of Earthquake Engineering and Seismology, <http://www.iiies.ac.ir>.
- IRSC, Iranian Seismological Center, <http://irsc.ut.ac.ir>.
- ISC, International Seismological Centre, <http://www.isc.ac.uk>.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M., 2002. Active tectonics of the south Caspian basin, Geophysical Journal International, 148(2), 214-245. doi:10.1046/j.1365-246X.2002.01588.x
- Lay, T., and Wallace, T.C., 1995. Modern global seismology, San Diego, Academic Press, 521 p.
- Lyberis, N., and Manby, G., 1999. Oblique to orthogonal convergence across the Turan block in the post-Miocene, American Association of Petroleum Geologists bulletin, 83(7), pp.1135-1160. doi:10.1306/E4FD2E97-1732-11D7-8645000102C1865D.
- Nemati, M., Hollingsworth, J., Zhan, Z., Bolourchi, M.J., and Talebian, M., 2013. Microseismicity and seismotectonics of the South Caspian Lowlands, NE Iran, Geophysical Journal International, 193(3), 1053-1070. doi:10.1093/GJI/GGS114.
- Priestley, K., Baker, C., and Jackson, J., 1994. Implications of earthquake focal mechanism data for the active tectonics of the South Caspian Basin and surrounding regions, Geophysical Journal International, 118(1), 111-141. doi:10.1111/j.1365-246X.1994.tb04679.x.
- Radfar, A., Chakdel, A.R., Nejati, A., and Soleimani, M., 2019. New insights into the structure of the South Caspian Basin from seismic reflection data, Gorgan Plain, Iran, International Journal of Earth Sciences, 108(2), 379-402. doi:10.1007/s00531-018-1659-x.
- Ritz, J.F., Nazari, H., Ghassemi, A., Salamati, R., Shafei, A., Solaymani, S., and Vernant, P., 2006. Active transtension inside central Alborz: A new insight into northern Iran-southern Caspian geodynamics, Geology, 34(6), 477-480. doi: 10.1130/G22319.1.
- Robert, A.M., Letouzey, J., Kavooosi, M.A., Sherkati, S., Müller, C., Vergés, J., and Aghababaei, A., 2014. Structural evolution of the Kopeh Dagh fold-and-thrust belt (NE Iran) and interactions with the South Caspian Sea Basin and Amu Darya Basin, Marine and Petroleum Geology, 57, 68-87. doi:10.1016/J.MARPETGEO.2014.05.002.
- Sperner, B., Ratschbacher, L., and Ott, R., 1993. Fault-striae analysis: a Turbo Pascal program package for graphical presentation and reduced stress tensor calculation, Computers & Geosciences, 19(9), 1361-1388. doi: 10.1016/0098-3004(93)90035-4.
- Stöcklin, J., 1974. Northern Iran: Alborz mountains, Geological Society, London, Special Publications, 4(1), 213-234. doi:10.1144/GSL.SP.2005.004.01.12
- Unruh, J.R., Twiss, R.J., and Hauksson, E., 1996. Seismogenic deformation field in the Mojave block and implications for tectonics of the eastern California shear zone, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 101(B4), 8335-8361. doi:10.1029/95JB03040.
- Wallace, R.E., 1951. Geometry of shearing stress and relation to faulting. The Journal of geology, 59(2), 118-130. doi:10.1086/625831.
- Zamani, B., Angelier, J., and Zamani, A., 2008. State of stress induced by plate convergence and stress partitioning in northeastern Iran, as indicated by focal mechanisms of earthquakes, Journal of Geodynamics, 45(2-3), 120-132. doi:10.1016/j.jog.2007.07.003.