

Original Research Paper

Strain and vorticity analyses using chert nodules, a criterion for estimation of bulk shortening in the Pyun anticline, Zagros, Iran

Babak Samani^{*1}

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2023 February 06

Accepted: : 2023 July 02

Available online: 2023 September 23

Keywords:

Strain

Kinematic vorticity number

Strain ellipsoid

Bulk shortening

Pyun anticline

ABSTRACT

In this research, using deformed chert nodules in the calcareous units of Sarvak Formation in Pyun anticline, quantitative strain values in different parts of this anticline have been investigated. In a perpendicular fold axis survey, the anticline was divided into seven different areas. At least 40 nodules were measured in each area and finite strain analysis was carried out using Rf/ϕ and polar methods. The results of strain studies show an increase mode in strain values from the fold limbs ($R_s = 1.7$) to the fold hinge ($R_s = 2.9$). Kinematic vorticity analysis shows the range between $0.68 < W_k < 0.91$ and the effect of both simple and pure shear strain components and the occurrence of the strain partitioning in the Pyun anticline. The amounts of kinematic vorticity number indicate the increase of pure shear strain components in the hinge of anticline and the predominance of simple shear strain components in the limbs of the Pyun anticline. According to the results of strain analyses the amounts of bulk shortening was estimated about 47- 50 percent in the Pyun anticline.

1. Introduction

Measurements of finite strain and determination of the strain ellipsoid in naturally deformed rocks are important goals for many structural geologists. The most important principle in the strain analyses is finding of proper markers that help geologists for strain studies. The key to strain analysis lies in finding objects with known initial packing arrangement or features which enable final lengths or angles to be calculated. Since then, a diversity of methodologies has been proposed to estimate finite strain, such as the Rf/ϕ (Ramsay, 1967; Dunnet, 1969) and Fry methods (Fry, 1979). They

use the shape (Rf/ϕ method) and distribution (Fry method) of objects (e.g., deformed ooids, pebbles of deformed conglomerate, and deformed fossils) or of points (e.g., quartz grain centers in quartzite). All methods that apply object or point displacement try to estimate the amount of tectonic strain and changes in shape and orientation of the strain ellipse/ellipsoid in 2D and 3D, respectively. Two-dimensional finite strain can be completely described by three numbers which represent the orientations and magnitudes of the strain ellipse. Strain magnitude can be expressed as two principal

* Corresponding author: Babak Samani; E-mail: b.samani@scu.ac.ir

Citation:

Samani, B., 2023. Strain and vorticity analyses using chert nodules, a criterion for estimation of bulk shortening in the Pyun anticline, Zagros, Iran. Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES, 33(3), 129, 97-110. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.384536.2062>.

E-ISSN: 2645-4963; Copyright©2021 G.S. Journal & the authors. All rights reserved.

 doi: 10.22071/gsj.2023.384536.2062

 dor: 20.1001.1.10237429.1402.33.3.14.5



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

stretch values, or a strain ratio and area change. For a full description of homogeneous 3D finite strain, six numbers are needed: three to describe the orientation of the strain ellipsoid, and three to describe strain magnitude. Strain magnitude can be expressed by the three principal stretch values, or by two strain ratios and volume change. Ramsay and Huber (1983, p.198) suggested four approaches that can be used to determine the 3D geometry of the strain ellipsoid from 2D strain ellipse data, among which the approach using two strain ellipses parallel to the principal planes is the most practical. Recently, the use of different graphical functions to understand the three-dimensional nature of strain from two-dimensional studies has been considered by many researchers (Ramsay and Huber, 1983; Vital and Mazzoli, 2008; Imber et al., 2012; Fossen, 2016). Many investigations have focused on the strain and vorticity analyses within the Sanandaj–Sirjan metamorphic belt (Sarkarinejad, 2007; Sarkarinejad et al., 2008; Sarkarinejad et al., 2016), but strain studies in the unmetamorphosed sedimentary rocks of the Zagros Fold-and-Thrust Belt have not been undertaken, particularly in the limestones in the present-day foreland of the Zagros orogeny. In many cases, because of no existence of suitable strain markers in the limestones, structural geologists encountered some limitations in strain studies. In this research, using deformed chert nodules as strain markers, it has been tried to quantify the strain and vorticity variations in the calcareous units of Sarvak Formation of Pyun anticline in the Zagros Fold-and-Thrust Belt. Finally the results of strain studies have been used as a criterion for determination of shortening amounts related to the deformation and folding in the Pyun anticline.

2. Research methodology

In this research, deformed chert nodules in the Sarvak limestone Formation have been studied as strain markers. The deformed chert nodules in this anticline have created suitable conditions for quantitative analysis of various strain parameters. The anticline was divided into seven different areas and detailed sampling for strain analysis was carried out along a narrow section across the anticline axis. At least 40 aspect ratios and long axis orientation of chert nodules were measured in each area. With application of EllipsFit software, the tectonic strain values (R_s) and the mean long axis orientations of strain ellipse were calculated using the R_f/θ and the polar methods. Using the tectonic strain value and the direction of long axis of strain ellipsoid respect to a reference line (θ angle), the amounts of shear strain and strain ellipsoid shape factor (K) were determined using ($R_{xz}-\theta-K-\gamma$) nomogram (Fossen, 2010). Also the amounts of kinematic vorticity number were determined with application of ($R_{xz}-\theta$) nomogram (Bailey et al., 1999). In this study, it is assumed that the volumetric strain values are minimal and the measurements were made on the XZ principal plane of strain

ellipsoid. Field observations indicate the lack of prominent tensile veins and stylolitic structures, which indicates low volumetric strain values. Also, the observation of the removed nodules and the trace of the cavities of the nodules show that the measurements of the dimensional ratio of the nodules have been done with relatively good accuracy in the maximum and minimum principal plane of strain ellipsoid.

3. Results and Discussion

Structural geologists deal with the end products of progressive deformation in the naturally deformed rocks; therefore they have used several techniques for finite strain analysis (Ramsay and Huber, 1983). The R_f/θ method has been used for strain analysis for objects that have a primary spherical or elliptical shape. If the markers have an initial ellipticity before deformation, the resulting ellipticity can be separated from the original ellipticity and the strain can be measured (Twiss and Moores, 2004). The R_f/θ method makes it possible to calculate the tectonic strain (R_s) by measuring the final ellipticity of the markers (R_f) and their orientations. The tectonic strain ($R_s=1$) in the undeformed state. The anticline was divided into seven different areas and data collected was carried out along a narrow section perpendicular to the fold axis direction. Measurements and photograph preparation were made in each area. At least, forty aspect ratios and long axis direction of nodules relative to a reference direction (anticline axis direction) were measured for each area. Using EllipsFit 3.4 software and application of R_f/θ (Ramsay and Huber, 1983) and polar (Volmer, 2011) methods with drawing the best enclosed ellipse the amounts of tectonic strain were calculated in each area. Since different methods of strain analysis may provide different results and values, it is better to consider the mean values of different methods as the final value of tectonic strain (Xypolyas, 2010; Fossen, 2016). As mentioned in this study, the orientation of the long axis of nodules (angle θ) relative to a reference direction (fold axis) was measured. Finally, the mean orientation of strain markers at each station relative to the reference direction (angle θ) and tectonic strain values (R_{xz}) were calculated by the software. Table 1 shows the tectonic strain values and the orientation of the long axis of the strain ellipsoid (angle θ). The amounts of shear strain and the strain ellipsoid shape parameter (K) were determined with application of $R_{xz}-\theta-K-\gamma$ graphical function (Fossen, 2016). According to the range of the strain ellipsoid shape parameter ($1.1 < K < 1.4$), it can be founded that the 3-D nature of the strain ellipsoid shows the three axial prolate strain ellipsoid shape. Application of some graphical functions (Bailey et al., 1999; Jessup et al., 2007; Xypolias, 2010) can be used as simple and fast methods in vorticity measurements. In this research, using $R_{xz}-\theta$ graphical function (Bailey et al., 1999) the vorticity values for different domains were determined. The results

show variation of the kinematic vorticity number value between $0.68 < W_k < 0.91$. These results indicate the occurrence of strain partitioning and simultaneous operation of pure and simple shear components in the evolution and formation of the Pyun anticline. Determining the percentage amounts of pure and simple shear indicates the occurrence of 28 to 58% of the pure shear component and 45 to 72% of the simple shear component in the study area. Therefore, it can be found that general shear components have made important role in the folding processes of the Pyun anticline.

4. Conclusion

The results of finite strain analysis in Pyun anticline using chert nodule markers show different amounts of tectonic strain in different parts of this anticline. The tectonic strain values obtained using the R_f/ϕ method show the change in R_s values in the range of 1.7 to 2.9. The results show an increase of tectonic strain values from the limbs to the fold hinge. This increasing pattern of the strain values from the limbs to the fold hinge can be related to the increase of the bending component in the hinge area compared to the other

parts. Kinematic vorticity values shows the range between 0.68 to 0.91 and indicate the simultaneous operation of both simple and pure shear components and the occurrence of strain partitioning in the structural evolution of the Pyun anticline. The spatial variation pattern of the kinematic vorticity number is such that the hinge folds show smaller values than the fold limbs. The lower values of the kinematic vorticity number in the hinge of anticline indicate the predominance of the pure shear component compared to the simple shear component in this part of the anticline. Also, higher values of W_k in the limbs of Pyun anticline indicate the predominance of simple shear component in these areas compared to the axial parts and anticline hinge. Since the flexural slip mechanism represents larger amounts of simple shear component in the fold limbs than the fold hinge, it is likely that this vorticity spatial pattern and higher values of this parameter in the limbs parts can be related to operation of flexural slip mechanism in the structural evolution of the Pyun anticline. According to the results of strain analyses the amounts of bulk shortening was estimated about 47- 50 percent in the Pyun anticline.

تحلیل کرنش و عدد جنبش شناختی تاوایی با استفاده از نودول های چرت، معیاری جهت بر آورد کوتاه شدگی پیکری، تاقدیس پیون، شمال خاور استان خوزستان

بابک سامانی*

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

چکیده

در این پژوهش، با استفاده از نودول های چرتی موجود در واحدهای آهکی سازند سروک در تاقدیس پیون به بررسی کمی مقادیر کرنش در بخش های مختلف این تاقدیس پرداخته شده است. در راستای یک پیمایش عمود بر محور، تاقدیس به ۷ محدوده متفاوت تقسیم گردید. در هر محدوده حداقل ۴۰ نودول چرتی مورد اندازه گیری قرار گرفت. نتایج حاصل از مطالعات کرنش نشان دهنده افزایش مقادیر کمی کرنش از یال های چین ($Rs=1.7$) به لولای چین ($Rs=2.9$) می باشد. تحلیل مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی نشان دهنده دامنه تغییرات پارامتر تاوایی بین $0.68 < Wk < 0.91$ و عملکرد مؤلفه های کرنش برش محض و برش ساده و رخداد پدیده تفکیک کرنش در تاقدیس پیون است. مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی گویای افزایش مؤلفه های کرنش برش محض در بخش های لولای چین و غلبه مؤلفه های کرنش برش ساده در یال های تاقدیس پیون می باشد. بررسی نتایج حاصل از تحلیل های کرنش گویای رخداد کوتاه شدگی پیکری بین ۴۷ تا ۵۰ درصد در تاقدیس پیون می باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۱۱/۱۷

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۱

تاریخ انتشار: ۱۴۰۲/۰۷/۰۱

کلیدواژه ها:

کرنش

عدد جنبش شناختی تاوایی

بیضوی کرنش

کوتاه شدگی پیکری، تاقدیس

پیون

۱- پیش نوشتار

کرنش پیشرونده تغییرات کمی مقادیر کرنش در هر لحظه از زمان مورد بررسی قرار می گیرد. از این رو، این گونه مطالعات به صورت عمومی در آزمایشگاه های زمین شناسی و در حین مدل سازی های زمین ساختی قابل اجرا می باشد. در مطالعات کرنش محدود محصول نهایی دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر کمی کرنش در آخرین مرحله دگرشکلی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت چرا که زمین شناسان همواره با آخرین محصول دگرشکلی در صحرا مواجه می شوند و از این رو تنها پرداختن به مقوله کرنش محدود امکان پذیر می باشد (Ramsay, 1967). اندازه گیری کمی کرنش و تعیین مؤلفه های کرنش همچون راستاهای بیشینه و کمینه کشیدگی و هندسه (نسبت قطر کوتاه به قطر بلند بیضوی کرنش) بیضوی کرنش در سنگ های دگرریخت شده یکی از موضوعات کلیدی در مباحث زمین شناسان ساختاری می باشد (Sarkarinejad et al., 2012). در انجام تحلیل های کمی کرنش یافتن عناصری که بتوان از آنها به عنوان نشانگر در اندازه گیری کرنش استفاده نمود،

کرنش (Strain) یک مفهوم کلیدی در زمین شناسی ساختاری بوده و به بیان ساده می توان کرنش را نتیجه تأثیر تنش (Stress) بر روی واحدهای سنگی کره زمین دانست. مبحث تحلیل کرنش در مناطق دگرشکل شده طبیعی یکی از موضوعاتی است که در سال های اخیر مورد توجه بسیاری از زمین شناسان ساختاری قرار گرفته است (Sarkarinejad et al., 2010, 2012; Samani et al., 2019; Partabian and Faghih, 2021). با توجه به امکانات و داده های قابل برداشت در صحرا، مطالعات کرنش، زمین شناسان را به درک پارامترهایی همچون مقادیر کمی کرنش زمین ساختی در سطوح اصلی بیضوی کرنش، جهت یابی محورهای اصلی بیضوی کرنش، شکل و ماهیت بیضوی کرنش و نوع تنش های عمل کننده در شکل گیری و تکامل ساختاری هر منطقه رهنمود می سازد. مطالعات کرنش معمولاً در دو مقوله کرنش پیشرونده (Incremental Strain) و کرنش محدود (Finite strain) مورد توجه پژوهشگران قرار می گیرد (Ramsay and Huber, 1983; Fossen, 2010, 2016). در مطالعات

* نویسنده مسئول: بابک سامانی؛ E-mail: b.samani@scu.ac.ir

ماخذنگاری:

سامانی، ب.، ۱۴۰۲، تحلیل کرنش و عدد جنبش شناختی تاوایی با استفاده از نودول های چرت، معیاری جهت بر آورد کوتاه شدگی پیکری، تاقدیس پیون، شمال خاور استان خوزستان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۳(۳)، ۹۷-۱۱۰. <https://doi.org/10.22071/gsj.2023.384536.2062>

خاور به جنوب باختر، کمرند کوهزایی زاگرس شامل بخش‌های اصلی: ۱) کمرند ماگمایی ارومیه-دختر، ۲) کمرند زوج دگرگونی سندج-سیرجان، ۳) کمرند چین و راندگی پس‌بوم زاگرس، ۴) کمرند اسلیتی، ۵) پهنه خرد شده و افیولیتی زاگرس، ۶) کمرند چین و راندگی پیش‌بوم زاگرس و ۷) کمرند چین‌خورده پیش‌بوم زاگرس می‌باشد (Sarkarinejad and Goftari, 2019). کمرند چین و راندگی زاگرس یک زون ترافشارشی (transpression) است که در اثر برخورد بین صفحه سنگ کره‌ای آفرو-عربی و خرد قاره ایران مرکزی با زاویه‌ای حدود ۲۵ درجه ایجاد شده است (Sarkarinejad, 2007). این همگرایی در قسمت جنوب خاور تقریباً عمودی بوده و در قسمت شمال باختر از حالت عمودی دچار انحراف می‌گردد (Vernant et al., 2000; Talebian and Jackson, 2002).

بربریان (Berberian, 1995) بر پایه انباشته‌های نمکی سری هرمز، کمرند چین و راندگی زاگرس را به دو بخش جنوب خاوری، یا «حوضه هرمز» و بخش شمال باختری، یا «حوضه اهواز» تقسیم می‌کند که مرز جدایی این دو، بر خطواره قطر-کازرون منطبق است. منطقه مورد مطالعه در شمال خاور استان خوزستان با موقعیت عرض جغرافیایی ۱۲° ۵۰' تا ۲۹° ۰۱' ۳۲° شمالی و طول جغرافیایی ۱۵° ۵۰' تا ۴۹° ۵۷' ۵۹' خاوری قرار گرفته است. استان خوزستان از لحاظ تقسیمات ساختاری از جنوب باختر به شمال خاور شامل زیر پهنه‌های: پیش‌حوضه خلیج فارس-مزوپتیمین، دشت‌های ساحلی، فروبار دزفول و کمرند چین‌خورده ساده زاگرس می‌باشد (شکل ۱). محدوده مطالعاتی در پهنه ساختاری زاگرس چین‌خورده ساده و در ۱۶۰ کیلومتری شمال خاوری شهر اهواز واقع شده است. روند چیره ساختارهای منطقه شمال خاوری-جنوب باختری، عمود بر سوی همگرایی صفحات عربی-اوراسیا می‌باشد. تاقدیس پیون مهم ترین ساختار تاقدیسی موجود در منطقه به‌شمار می‌آید. این تاقدیس یکی از معدود تاقدیس‌های موجود در استان خوزستان است که شامل بیرون‌زدگی‌های کوتاه پایینی می‌شود. واحدهای سنگی با سن کوتاه پایینی تا واحدهای سنگی سنوزویک و رسوبات عهد حاضر مهم‌ترین رخنمون‌های موجود در منطقه مورد مطالعه می‌باشند. از لحاظ سنگ‌چینه‌شناسی بیرون‌زدگی‌های آهکی سازند داریان (کرتاسه پایینی)، شیل‌های آهکی سازند کژدمی (کرتاسه پایینی)، سازند آهکی سروک (کرتاسه بالایی)، سازند شیلی و شیلی آهکی گورپی (کرتاسه بالایی)، سازند شیلی و آهکی پابده (پالئوسن-انوسن)، سازند آهکی آسماری (الیگوسن-میوسن) و رسوبات آبرفتی عهد حاضر مهم‌ترین واحدهای سنگ‌چینه‌شناختی در محدوده مورد مطالعه می‌باشند. در محدوده مورد مطالعه، سازند داریان عموماً به‌وسیله آهک‌های ستر لایه و خاکستری رنگ قابل مشاهده می‌باشد. شیل‌های آهکی سازند کژدمی به‌صورت لایه‌های کرمی تا زرد رنگ با لایه‌بندی نسبتاً نازک قابل پیگیری می‌باشد. بخش زیادی از تاقدیس پیون شامل بیرون‌زدگی‌هایی از سازند آهکی سروک بوده که به‌وسیله لایه‌های آهک ستر تا متوسط لایه همراه با نودول‌های چرتی قابل مشاهده می‌باشد. شکل ۲ نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در تاقدیس پیون واحدهای سنگی سروک شامل نودول‌ها یا گره‌های چرتی فراوانی می‌باشد که شکل بیضوی‌گون و هم‌سوی و جهت‌یابی غالب محور بزرگ نودول‌ها گویای تغییر شکل در نتیجه دگرشکلی‌های اعمالی می‌باشد. هرچند تعیین ارتباط زمانی شکل‌گیری نودول‌ها و تشکیل دگرشکلی‌های پیش از چین‌خوردگی و پس از چین‌خوردگی بسیار دشوار است، با این وجود، با توجه به گزارش‌های موجود (درویش زاده، ۱۳۸۵؛ آقاناتی، ۱۳۹۳) از وجود نودول‌های چرتی در بخش‌های زیادی از سازند سروک در زاگرس می‌توان انتظار داشت که وجود و شکل‌گیری این نودول‌ها در ارتباط با یک رخداد ناحیه‌ای بوده و شکل‌گیری نودول‌های چرتی در منطقه مرتبط با یک پدیده محلی نمی‌باشد. از این رو، می‌توان اذعان داشت که به احتمال زیاد، شکل‌گیری نودول‌ها یک پدیده مرتبط با رسوب‌گذاری بوده و کرنش‌های ثبت شده در آنها نتیجه دگرشکلی‌های رخ داده از زمان کرتاسه بالایی به بعد می‌باشد.

بسیار حائز اهمیت است. نشانگرهایی همچون قلوه‌های دگرشکل شده کنگلومرا، الیت‌ها، کانی‌های کشیده شده کوآرتز و انواعی از فسیل‌ها برخی از متداول‌ترین نشانگرهای مورد استفاده در بسیاری از مطالعات کرنش می‌باشند. تاکنون روش‌های زیادی به‌وسیله پژوهشگران زمین‌شناسی ساختمانی جهت برآورد مقادیر کرنش در سنگ‌های دگرریخت شده ارائه شده است. روش Rf/O (Ramsay, 1967) و روش Fry (Fry, 1979) از متداول‌ترین روش‌های مطالعات کرنش می‌باشند. انجام مطالعات کرنش در سه بعد و فهم کامل ماهیت سه‌بعدی کرنش نیازمند انجام برداشت‌های مناسب از صفحات مختلف بیضوی کرنش می‌باشد. معمولاً مطالعات دو بعدی کرنش می‌تواند به درک ویژگی‌های بیضوی کرنش در سه بعد کمک نمایند. روش‌های ریاضی مختلفی جهت درک ماهیت سه‌بعدی کرنش از طریق بررسی‌های دو بعدی کرنش توسط پژوهشگران مختلف ارائه شده است (Ramsay and Huber, 1983). همچنین در سال‌های اخیر استفاده از توابع تصویری مختلف جهت فهم ماهیت سه‌بعدی کرنش از مطالعات دو بعدی مورد توجه بسیاری از پژوهشگران قرار گرفته است (Ramsay and Huber, 1983; Vital and Mazzoli, 2008; Imber et al., 2012; Fossen, 2016). تاکنون مطالعات کرنش متفاوتی با استفاده از نشانگرهای مختلف از قبیل قلوه‌های کنگلومرای دگرریخت شده، کانی‌های کشیده شده کوآرتز، فسیل‌های دگرشکل شده و نسبت ابعادی پورفیروکلست‌ها و پورفیروبلاست‌ها در بخش‌هایی از زاگرس و جنوب خاوری پهنه سندج-سیرجان صورت گرفته است (Sarkarinejad et al., 2008, 2010, 2012; Samani and Faghih, 2014; Keshavarz and Faghih, 2020; Samani et al., 2019). اما انجام مطالعات کرنش در بخش‌های رسوبی کمرند چین‌خورده زاگرس به دلیل عدم توسعه نشانگرهای مناسب، کمتر مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به گسترش فراوان نودول‌های دگرشکل شده چرتی در محدوده مورد مطالعه، فرصتی جهت انجام مطالعات کرنش در این بخش از زاگرس مهیا شده است. از این رو در این مطالعه، با استفاده از نودول‌های چرتی بخش آهکی سازند سروک در تاقدیس پیون واقع در شمال خاور استان خوزستان سعی شده است تا به تحلیل کمی کرنش در یک مقطع عمود بر محور این تاقدیس پرداخته شود. استفاده از رادیولاریت‌های دگرشکل شده به‌عنوان نشانگر جهت مطالعات کرنش مورد توجه برخی پژوهشگران قرار گرفته است (Galvez and Orozco, 1979; Tavakkoli et al., 2022). همچنین استفاده از نودول‌های چرتی در واحدهای آهکی نیز جهت بررسی‌های تنش و کرنش مورد استفاده قرار گرفته‌اند (Antonellini et al., 2020). در نهایت، نتایج حاصل از مطالعات این پژوهش بعنوان معیاری جهت بررسی مقادیر کوتاه‌شدگی حاصل از کرنش، مورد استفاده قرار گرفته است.

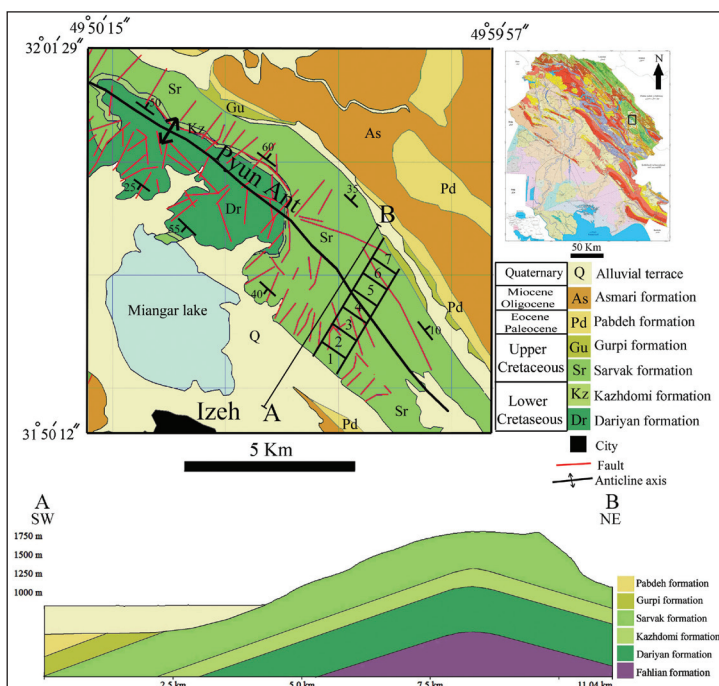
۲- جایگاه زمین‌شناسی

کمرند چین و راندگی زاگرس با طول تقریبی ۱۸۰۰ کیلومتر بخشی میانی از کمرند کوهزایی آلپ-هیمالیا است که در حاشیه شمال خاوری صفحه عربستان قرار گرفته است (Berberian and King, 1981). رشته کوه‌های زاگرس از کوه‌های تاوروس در شمال خاور ترکیه تا تنگه هرمز در ایران توسعه یافته است (Falcon, 1969; Stocklin, 1968; Haynes and McQuillan, 1974; Alavi, 1994). کوهزایی شامل ۸ تا ۱۴ کیلومتر از رسوبات کامبرین تا عهد حاضر می‌باشد که بر روی پی سنگ پراکامبرین قرار گرفته‌اند (Talebian and Jackson, 2002; Sherhati and Letouzey, 2004). تکامل ساختاری و زمین‌ساختی کمرند کوهزایی زاگرس در نتیجه سه رخداد اصلی الف) فروورانش پوسته اقیانوسی دریای تتیس جوان به زیر پوسته قاره‌ای ایران در طول کرتاسه پایینی، ب) جاگیری و روراندگی بخشی از پوسته اقیانوسی تتیس جوان بر روی حاشیه صفحه آفرو-عربی و توسعه افیولیت‌های زاگرس در اواخر کرتاسه، ج) برخورد قاره‌ای-قاره‌ای صفحه آفرو-عربی با صفحه ایران در اواخر کرتاسه به بعد صورت گرفته است (Alavi, 2004). در راستای شمال

۳- روش پژوهش

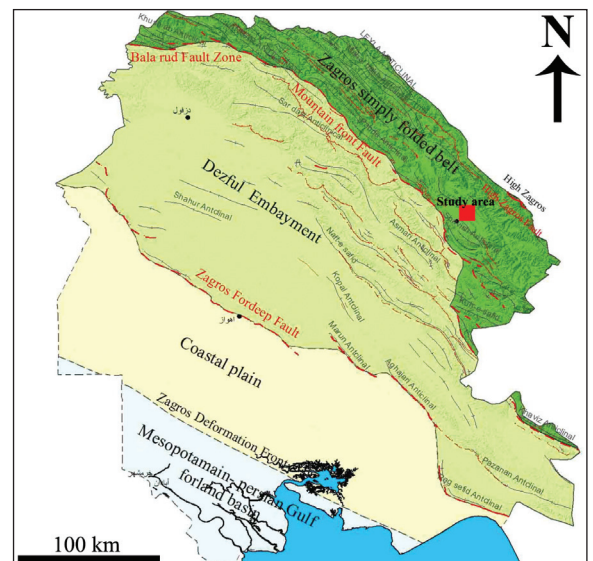
در این پژوهش، نودول‌های چرتی موجود در سازند آهکی سروک به‌عنوان نشانگر کرنش مورد بررسی قرار گرفته‌اند (شکل ۳). هر چند استفاده از نودول‌های چرتی در واحدهای آهکی به دلیل تفاوت در اختلاف مقاومت بدنه سنگ و نشانگر دارای محدودیت‌هایی می‌باشد اما استفاده از نودول‌های چرتی به‌عنوان نشانگر تنش و کرنش در مطالعات اخیر مورد توجه برخی پژوهشگران قرار گرفته است (Antonellini et al., 2020). در راستای یک پیمایش با روند تقریباً عمود بر محور، تاقدیس به هفت محدوده متفاوت تقسیم گردید (شکل ۲) و در هر محدوده نسبت ابعادی و جهت‌یابی محور بزرگ حداقل تعداد ۴۰ نودول چرتی مورد اندازه‌گیری قرار گرفت. با استفاده از نرم افزار EllipsFit مقادیر کرنش زمین‌ساختی و جهت‌یابی میانگین محور بزرگ بیضی کرنش با استفاده از روش‌های Rf/θ و روش قطبی (Polar) محاسبه گردید. با محاسبه مقادیر کرنش زمین‌ساختی (Rs) و تعیین راستای جهت‌یابی محور بزرگ بیضی کرنش نسبت به یک خط مبنا (راستای محور چین) و با استفاده از تابع تصویری ($K-\theta-Rxz$) (Fossen, 2010) مقادیر کرنش برشی، و

ضریب شکل بیضی کرنش (K) محاسبه گردید. همچنین با استفاده از تابع تصویری ($Rxz-\theta$) (Bailey et al., 1999) مقادیر پارامتر عدد تاوایی جنبش شناختی جهت فهم ماهیت توزیع کرنش و مقادیر درصدی عملکرد برش محض و برش ساده تعیین گردید. در این پژوهش، فرض بر این است که مقادیر کرنش حجمی حداقل بوده و اندازه‌گیری‌ها در صفحه بیشینه و کمینه بیضی کرنش (Rxz) می‌باشد. مشاهدات صحرائی گویای عدم توسعه رگچه‌های کششی و ساختارهای استیلولیتی بوده که نشان‌دهنده پایین بودن مقادیر کرنش حجمی است (Xypolias and Doutsos, 2000; Sarkarinejad et al., 2010). به‌وسیله خارج کردن نودول‌ها از بدنه سنگ و اندازه‌گیری طول محورهای بزرگ و کوچک آنها با تقریب مناسبی مقادیر نسبت کرنش در صفحه XZ بیضی کرنش محاسبه گردید. همچنین بررسی نودول‌های خارج شده و اثر حفرات موجود از نودول‌ها نشان می‌دهد که اندازه‌گیری‌های نسبت ابعادی نودول‌ها با دقت نسبتاً خوبی در صفحه بیشینه و کمینه بیضی کرنش (صفحه XZ) صورت گرفته است.



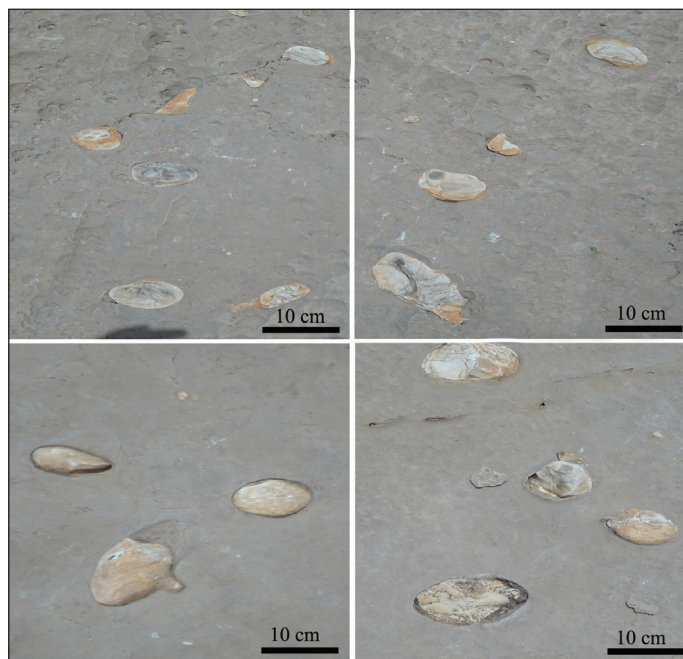
شکل ۲- جایگاه منطقه مورد مطالعه در استان خوزستان. نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه (برگرفته از نقشه ۱/۱۰۰۰۰۰ کوه آسماری (Perry and Setudehnia, 1966)) و نیمرخ زمین‌شناسی از تاقدیس پیون. شماره‌های ۱ تا ۷ موقعیت محدوده‌های برداشت را نشان می‌دهند.

Figure 2. Location of the study area in the Khuzestan province. Geological map (reproduced from 1/100000 of Kuhe-Asmari sheet by Perry and Setudehnia, 1966) and cross section of the Pyun anticline. Numbers 1 to 7 shows the data gathered areas.



شکل ۱- نقشه پهنه‌بندی استان خوزستان براساس واحدهای ساختاری (اژدري و همکاران، ۱۳۹۷).

Figure 1. Deferent structural units in the Khuzestan province (Azhdari et al., 2018)



شکل ۳- نودول‌های دگرشکل شده در واحدهای آهکی سازند سروک.

Figure 3. Deformed chert nodules in the limestone rocks of Sarvak Formation.

۴- داده‌ها و اطلاعات

۴-۱- تحلیل کمی کرنش با استفاده از روش Rf/θ

با توجه به این که زمین‌شناسان ساختاری با محصولات نهایی دگرشکلی پیش‌رونده سر و کار دارند، روش‌های متعددی برای تجزیه و تحلیل کرنش استفاده نموده‌اند (Ramsay and Hubber, 1983). روش Rf/θ برای اجسامی که دارای شکل اولیه کروی یا بیضی می‌باشند، برای تجزیه و تحلیل کرنش استفاده شده است. در صورتی که نشانگرها پیش از دگرشکلی دارای بیضویت اولیه باشند، می‌توان بیضویت حاصل را از بیضویت اولیه جدا نمود و کرنش را اندازه‌گیری کرد (Twiss and Moores, 2004). روش Rf/θ محاسبه بیضویت یا کرنش زمین‌ساختی (Rs) را با اندازه‌گیری بیضویت‌های نهایی نشانگرها (Rf) و جهت‌گیری‌های آنها امکان‌پذیر نموده است. در حالت دگرشکل نشده $Rs=1$ (کرنش زمین‌ساختی برابر با ۱) است. جایی که محورهای طولی بیضی Ri (بیضی اولیه) و Rs (کرنش زمین‌ساخت) بر هم منطبق شوند، بیشینه مقادیر Rf (بیضی نهایی) به دست می‌آید.

$$R_{f(max)} = RiRs$$

و کمینه مقادیر Rf (بیضی نهایی) در جایی است که محورهای بزرگ بیضی Ri (بیضی اولیه) و Rs (کرنش زمین‌ساخت) بر هم عمود هستند.

$$R_{f(min)} = \begin{cases} Ri / Rs & \text{if } Rs < Ri \\ Rs / Ri & \text{if } Rs > Ri \end{cases}$$

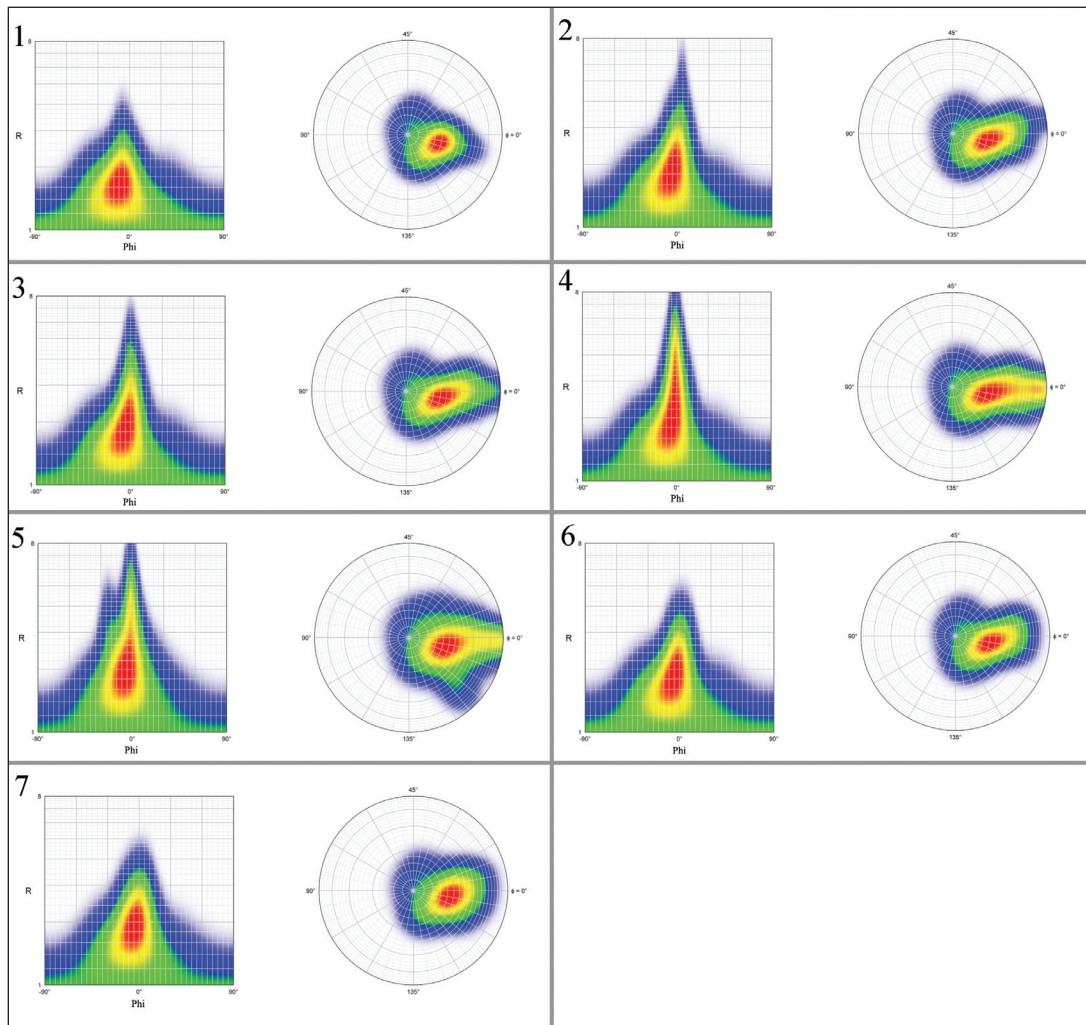
با استفاده از روابط فوق می‌توان مقادیر بیضویت یا کرنش زمین‌ساختی ایجاد شده را تخمین زد (Twiss and Moores, 2004).

$$R_s^2 = \begin{cases} R_{f(max)} / R_{f(min)} & \text{if } Rs > Ri \\ R_{f(max)} / (R_{f(min)}) & \text{if } Rs < Ri \end{cases}$$

$$R_i^2 = \begin{cases} R_{f(max)} / R_{f(min)} & \text{if } Rs < Ri \\ R_{f(max)} / (R_{f(min)}) & \text{if } Rs > Ri \end{cases}$$

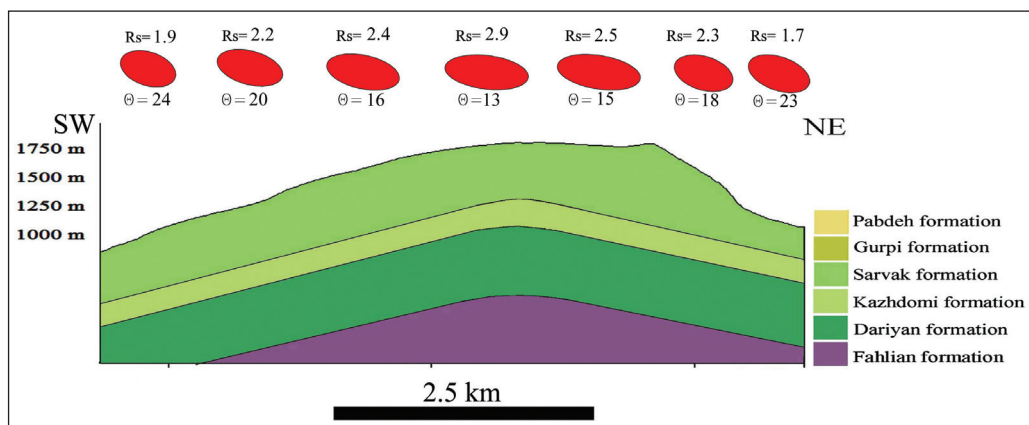
جمع‌آوری داده‌ها در راستای یک پیمایش صحرایی و در جهت تقریبی عمود بر

روند محوری تاقدیس صورت پذیرفت. از این رو، در جهت عرضی و در راستای پیمایش صورت گرفته، تاقدیس به هفت محدوده تقسیم گردید. در هر محدوده اندازه‌گیری‌های مستقیم و تهیه عکس‌های جهت‌دار صورت پذیرفت. سعی شد تا در هر محدوده حداقل چهار اندازه‌گیری از نسبت ابعادی نودول‌های چرتی در صفحه XZ بیضوی کرنش و جهت‌یابی محور بزرگ آنها نسبت به یک راستای مرجع (راستای محور تاقدیس) صورت پذیرد. با به کارگیری نرم افزار EllipsFit و با استفاده از روش بهترین بیضی محاطی، نسبت ابعادی و جهت‌یابی محور بزرگ هر نشانگر با استفاده از روش Rf/θ (Ramsay and Huber, 1983) و روش Polar (Vollmer, 2011) مقادیر نسبت کرنش زمین‌ساختی در صفحه بیشینه-کمینه بیضی کرنش (XZ plane of strain ellipsoid) محاسبه گردید. شکل ۴ نمودارهای Rf/θ و ترسیم شده جهت محاسبه مقادیر کرنش در هفت محدوده تاقدیس را نشان می‌دهد. از آنجا که ممکن است روش‌های مختلف تحلیل کرنش نتایج و مقادیر متفاوتی را ارائه دهند بهتر است تا مقادیر میانگین روش‌های مختلف به عنوان مقدار نهایی کرنش زمین‌ساختی مورد توجه قرار گیرد (Xypolyas, 2010; Fossen, 2016). شکل ۵ و جدول ۱ مقادیر و مشخصات کرنش زمین‌ساختی در صفحه XZ بیضوی کرنش در راستای مسیر پیمایش را نشان می‌دهد. همان‌گونه که اشاره شد، در این پژوهش جهت‌یابی محور بزرگ هر نودول (زاویه θ) نسبت به یک راستای مرجع (راستای محور چین) اندازه‌گیری شد و در نهایت میانگین جهت‌یابی نشانگرهای کرنش در هر ایستگاه نسبت به راستای مرجع (زاویه θ) و مقادیر کرنش زمین‌ساختی (Rxz) توسط نرم افزار محاسبه گردید. جدول ۱ مقادیر کرنش زمین‌ساختی و جهت‌یابی محور بزرگ بیضوی کرنش را نشان می‌دهد. با استفاده از تابع تصویری $Rxz-\theta-K-\gamma$ (Fossen, 2016) مقادیر پارامتر شکل سه‌بعدی بیضوی کرنش (K) (Strain ellipsoid shape) تعیین گردید (شکل ۶). با توجه به دامنه تغییرات پارامتر شکل بیضوی کرنش ($1.1 < K < 1.4$) می‌توان نتیجه گرفت که ماهیت سه‌بعدی بیضوی کرنش نشان دهنده کرنش کشیده (Prolate strain) می‌باشد (شکل ۶).



شکل ۴- مقادیر کرنش زمین ساختی (R_s) با استفاده از روش های Rf/ϕ و Polar برای هفت محدوده مطالعه شده در تاقدیس پیون.

Figure 4. Rf/ϕ and polar plots for the seven different parts of the Pyun anticline.



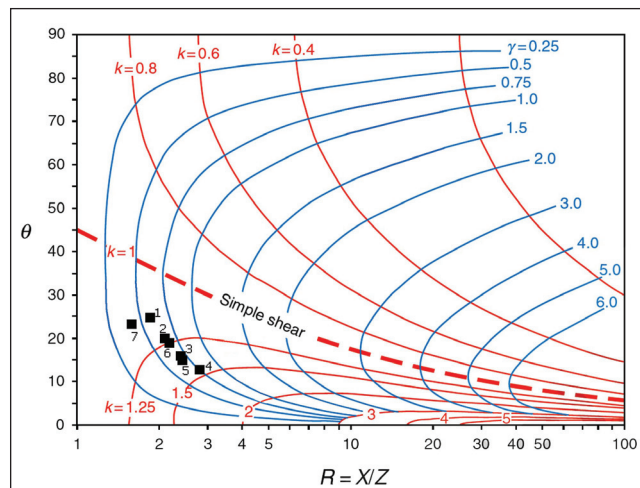
شکل ۵- نمایش مقادیر و جهت یابی کرنش زمین ساختی (R_s) در صفحه XZ بیضوی کرنش و مقادیر میانگین زاویه انحراف محور بزرگ بیضوی کرنش از خط مبنا (θ) در امتداد مقطع مورد بررسی

Figure 5. Illustration the amounts and orientations of the R_s in the XZ principal plane of the strain ellipsoid and the average amounts of long axis of strain ellipsoid respect to the reference line (θ) along the study direction.

جدول ۱- مقادیر کرنش زمین‌ساختی، عدد جنبش شناختی تاوایی و زاویه بین محور بزرگ بیضوی کرنش نسبت به محور چین.

Table 1. The amounts of tectonic strain, kinematic vorticity number and the angle of long axes of strain ellipse respect to the fold axis.

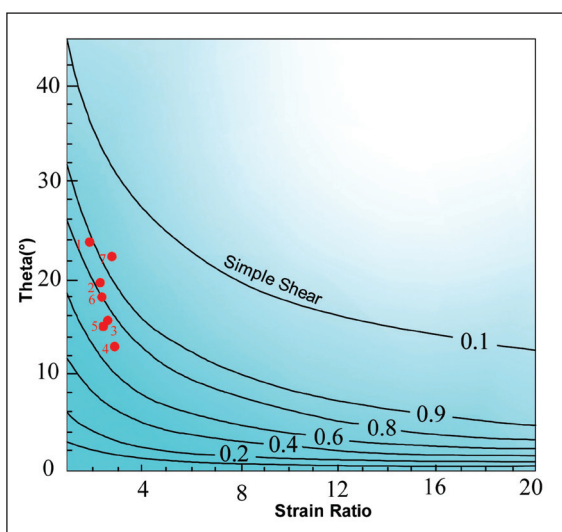
	1	2	3	4	5	6	7
R_s	1.9	2.2	2.4	2.9	2.5	2.3	1.7
Wk	0.87	0.82	0.76	0.68	0.75	0.8	0.91
θ	24	20	16	13	15	18	23



شکل ۶- مقادیر کرنش برشی و پارامتر شکل بیضوی کرنش با استفاده از تابع تصویری $Rxz-\theta-k-\gamma$ (Fossen, 2016).

Figure 6. Determination of the shear strain and strain ellipsoid factor shape with application of $Rxz-\theta-k-\gamma$ nomogram (Fossen, 2016).

است (Passchier, 1988; Wallis et al., 1992; Simpson and De Paor, 1997; Jessup et al., 2007). یکی از روش‌های ساده و سریع در تحلیل‌های تاوایی استفاده از توابع تصویری ارائه شده توسط پژوهشگران مختلف می‌باشد (Bailey et al., 1999; Jessup et al., 2007; Xypolias, 2010). در این پژوهش با استفاده از روش بیلی و همکاران (Bailey et al., 1999) و با به کارگیری تابع تصویری $Rxz-\theta$ مقادیر عدد تاوایی جنبش شناختی برای محدوده‌های مختلف تعیین گردید (شکل ۷).



شکل ۷- تعیین مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی با استفاده از تابع تصویری $Rxz-\theta$ (Bailey et al., 1999).

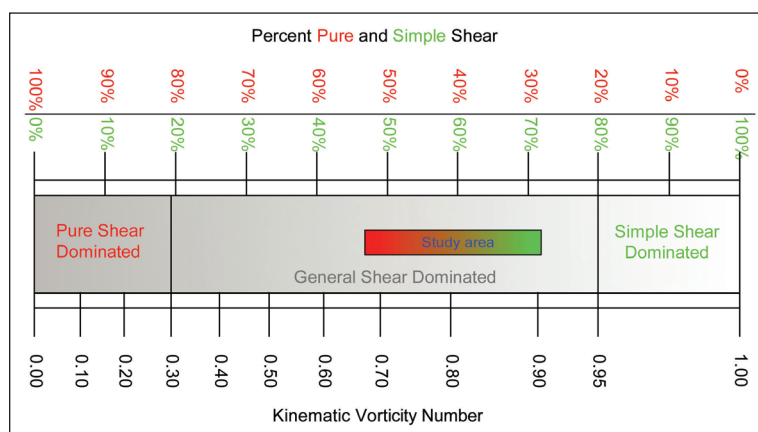
Figure 7. Application of $Rxz-\theta$ nomogram (Bailey et al., 1999) for calculation of kinematic vorticity number.

۲-۴- تحلیل عدد جنبش شناختی تاوایی

مفهوم تاوایی اندازه‌گیری چرخش داخلی ذرات صلب تشکیل دهنده در زمینه‌ای دانه‌ریز در طی دگرشکلی در پهنه دگرشکلی می‌باشد. این اصطلاح از مباحث دینامیک سیالات وارد مبانی زمین‌شناسی ساختاری گشته و قابل قیاس با چرخیدن یک پروانه درون سیال در حال جریان می‌باشد (Fossen, 2010). عدد تاوایی جنبش شناختی (Wk) (Kinematic vorticity number) یک پارامتر بدون بعد از چرخش نسبی در کرنش می‌باشد و نشان دهنده میزان کشیدگی متناسب با جابه‌جایی در جریان دگرشکلی می‌باشد. در حقیقت، تاوایی مشخص‌کننده چرخش لحظه‌ای نسبت به کشیدگی لحظه‌ای در یک نقطه می‌باشد (Means et al., 1980; Fossen, 2016). بسیاری از روش‌های متداول تحلیل تاوایی از داده‌های جمع‌آوری شده از روی صفحه XZ بیضوی کرنش استفاده می‌کنند. با فرض وجود یک دگرشکلی با جریان پیوسته مقدار عدد تاوایی جنبش شناختی (Wk) به صورت $0 \leq Wk \leq 1$ معرفی شده است. به گونه‌ای که برای کرنش برشی محض $Wk=0$ و در کرنش برشی ساده $Wk=1$ می‌باشد (Means et al., 1980). پارامتر تاوایی دارای مقیاس خطی نبوده اما می‌تواند به‌وسیله محاسبه مقادیر درصدی مؤلفه‌های برش محض و ساده به یک پارامتر با مقیاس خطی تبدیل شود. فورت و بیلی (Fort and Bailey, 2007) سه میدان یا قلمرو دگرشکلی برش ساده، برش محض و برش عمومی را مورد توجه قرار دادند. دگرشکلی که در آن برش محض مؤلفه غالب می‌باشد تغییرات پارامتر تاوایی بین ۰ تا ۰/۳ بوده و در آن برش ساده کمتر از ۲۰ درصد نقش دارد. در مقابل دگرشکلی که در آن برش ساده مؤلفه غالب می‌باشد تاوایی دارای مقادیر بزرگ‌تر از ۰/۹۵ می‌باشد و در آن برش ساده بیشتر از ۸۵ درصد نقش ایفا می‌کند. مقادیر تاوایی بین ۰/۳ تا ۰/۹۵ نشان دهنده جریان دگرشکلی عمومی می‌باشد. تحلیل‌های تاوایی روشی نسبتاً جدید و ارزشمند برای حل برخی مسایل زمین‌شناسی ساختاری و زمین ساخت حتی با وجود پیچیدگی‌هایی که در دگرشکلی‌های طبیعی وجود دارد، است (Simpson and De Paor, 1997; Tikoff and Teyssier, 1994; Xypolias, 2010). زمان انجام اولین تحلیل‌های تاوایی مطالعات متعددی با استفاده از پورفیروکلاست‌ها مانند روش نسبت محوری (PAR)، روش توزیع هیپربولیکی پورفیروکلاست‌ها (PHD) و روش شبکه دانه صلب (RGN) توسط پژوهشگران مختلف معرفی شده

گویای عملکرد ۲۸ تا ۵۵ درصد مؤلفه برش محض و ۴۵ تا ۷۲ درصد مؤلفه برش ساده در منطقه مورد مطالعه می باشد (شکل ۸). از این رو، می توان بیان کرد که مؤلفه های برش عمومی نقش مهمی را در تکامل چین خوردگی در تاق دیس پیون ایفا کرده اند.

نتایج نشان دهنده دامنه تغییرات مقادیر عدد تاوایی جنبش شناختی بین $0.68 < W_k < 0.91$ می باشد (جدول ۱). این نتایج گویای رخداد پدیده توزیع کرنش و عملکرد همزمان مؤلفه های برش محض و برش ساده در تکامل و شکل گیری تاق دیس پیون می باشد. تعیین مقادیر درصدی برش محض و برش ساده



شکل ۸- تعیین مقادیر درصدی کرنش برش ساده و محض.

Figure 8. Determination the percentage amounts of pure and simple shear components.

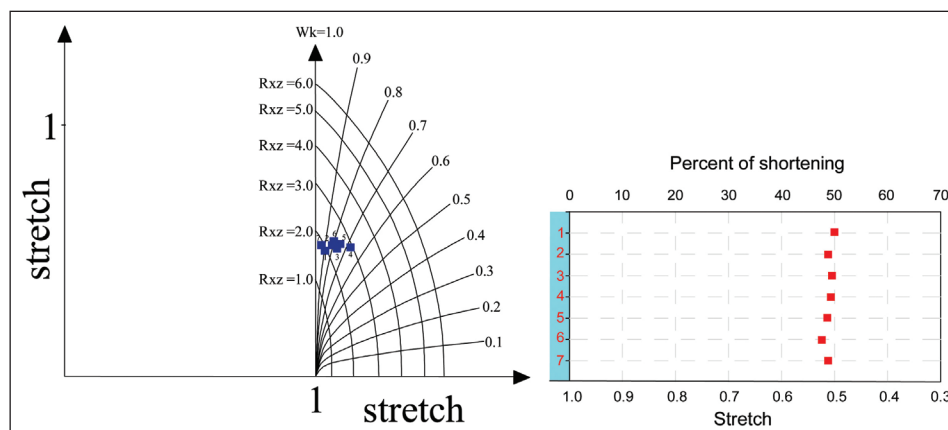
۵- بحث

می باشد. به عنوان مثال، امکان استفاده از روش های ژئودزی در همه مناطق وجود نداشته و نیازمند استفاده از فناوری و امکانات تخصصی در منطقه مورد بررسی می باشد. استفاده از داده های حل صفحه گسل نیز تنها مقادیر کوتاه شدگی حاصل از رخدادهای لرزه ای و لغزش های گسلی را به دست می دهد و در تعیین مقادیر کوتاه شدگی پیکری راهگشا نمی باشند (Jackson and McKenzie, 1984). همچنین استفاده از داده های ژئودزی فضایی و حل صفحات گسل عموماً جهت برآورد مقادیر کوتاه شدگی در مقیاس ناحیه ای مناسب بوده و در مقیاس منطقه ای کمتر مورد استفاده قرار می گیرند. استفاده از روش های ترسیم مقاطع عرضی موازنه شده یکی از متداول ترین روش های مورد استفاده زمین شناسان ساختاری در اندازه گیری و برآورد مقادیر کوتاه شدگی در مقیاس های مختلف در کمربندهای چین و گسل خورده می باشد. اندازه گیری مقادیر کوتاه شدگی در پهنه های چین و گسله با استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده با توجه به عدم محاسبه مقادیر کوتاه شدگی پیکری، حداقل مقادیر کوتاه شدگی را ارائه خواهد کرد. تهیه مقاطع عرضی موازنه شده مستلزم تهیه نیمرخ های زمین شناسی با دقت بالا بوده و با توجه به عدم وجود سازگاری هندسی و تشابه ساختاری از سطح به ژرفا معمولاً تهیه مقاطع عرضی موازنه شده دچار چالش می شود (Fernihner and Grasemann, 2012). مقاطع عرضی موازنه شده توانایی محاسبه کرنش پیکری در لایه های دگرشکل شده را نداشته و از این رو می توان اذعان داشت که مقادیر کوتاه شدگی محاسبه شده از طریق ترسیم مقاطع موازنه شده همواره نشان دهنده مقادیر کمینه کوتاه شدگی می باشد (McQuarrie, 2004; Fernhner and Grasemann., 2012). از این رو، در بسیاری از مطالعات مرتبط با برآورد مقادیر کوتاه شدگی در کمربندهای چین و گسله فرض بر این است که کوتاه شدگی پیکری در طول لایه های چین خورده حداقل می باشد (McQuarrie, 2004; Fernhner and Grasemann., 2012).

تاکنون مطالعات متعددی جهت برآورد مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی و میزان کوتاه شدگی در بخش های مختلف کمربندهای کوهزایی در سرتاسر جهان صورت پذیرفته است. هرچند به دلیل فقر گسترش نشانگرهای کرنش مناسب در پهنه چین خورده زاگرس مطالعات زیادی در حوضه تعیین مقادیر تاوایی صورت پذیرفته است، اما مطالعات زیادی در این حیطه در پهنه دگرگونی سندیج-سیرجان انجام شده است (Sarkarinejad, 2007; Sarkarinrjad et al., 2010, 2012, 2016; Samani, 2013; Samani et al., 2019; Keshavarz and Faghig, 2020). مطالعات انجام شده در پهنه دگرگونی سندیج-سیرجان جهت تحلیل عدد جنبش شناختی تاوایی نتایج مختلفی را در بخش های مختلف این پهنه ارائه داده است (Sarkarinrjad et al., 2010, 2012, 2016; Samani, 2013; Samani et al., 2019; Keshavarz and Faghig, 2020). نتایج این مطالعات نشان می دهد که نمی توان مقادیر یکسانی از عدد جنبش شناختی تاوایی و کوتاه شدگی را برای این پهنه در نظر گرفت. احتمالاً ماهیت ناهمگون رفتار پوسته و رخداد پدیده توزیع کرنش (Strain partitioning) را بتوان از مهم ترین عوامل در شکل گیری مقادیر مختلف عدد جنبش شناختی تاوایی و مقادیر کوتاه شدگی در بخش های مختلف پهنه دگرشکل شده سندیج-سیرجان دانست. در مطالعات مربوط به تعیین مقادیر کوتاه شدگی از روش های مختلفی همچون استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده، استفاده از داده های لغزش و حل صفحه گسل، به کارگیری روش های ژئودزی زمینی و فضایی و استفاده از نشانگرهای مختلف کرنش در مقیاس های میکروسکوپی و موزوسکوپی استفاده شده است (Jackson et al., 1995; Twiss and Unruh, 1998; McQuarrie, 2004; Sarkarinrjad et al., 2010, 2012, 2016; Mouthereau et al., 2012; Samani, 2013; Samani et al., 2019). هر کدام از روش های یاد شده دارای مزایا، معایب و محدودیت هایی نسبت به یکدیگر

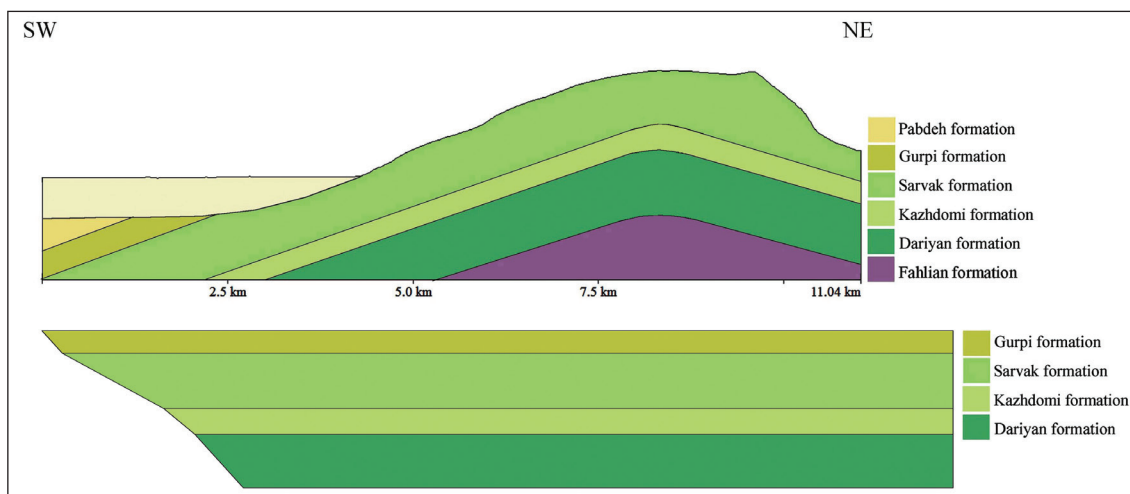
در سال های اخیر مورد توجه پژوهشگران زمین شناس قرار گرفته است. برخی نشانگرها همچون فسیل ها، اولیت ها، پزولیت ها و قلوه های دگرشکل شده مهم ترین نشانگرهای مزوسکوپی و نشانگرهایی همچون بلورهای کوارتز و کلسیت و سایر کانی ها از مهم ترین نشانگرهای میکروسکوپی می باشند. در این پژوهش، با استفاده از نتایج تحلیل کرنش بر روی نودول های دگرشکل شده در واحدهای آهکی سازند سروک مقادیر کوتاه شدگی در راستای یک مقطع در تاقدیس پیون مورد ارزیابی قرار گرفت. با استفاده از تابع تصویری ($Wk-Rxz-S$)، (عدد جنبش شناسی تاوایی-نسبت کرنش-کشیدگی) (Passchier, 1988) مقادیر کشیدگی برای هر محدوده تعیین و در نهایت مقادیر کوتاه شدگی پیکری در تاقدیس پیون محاسبه گردید (شکل ۹). بر این اساس، مقادیر کوتاه شدگی پیکری در تاقدیس پیون در حدود ۴۷ تا ۵۰ درصد تعیین گردید. تهیه مقطع موازنه شده از تاقدیس مقدار کوتاه شدگی برابر با ۱۲ درصد را ارائه می نماید (شکل ۱۰). مقادیر کوتاه شدگی به دست آمده با استفاده از نشانگرهای دگرشکل شده مقادیر کوتاه شدگی بزرگ تری را نسبت به روش های استفاده از تهیه مقاطع عرضی موازنه شده ارائه می دهند. مهم ترین عامل اختلاف مقادیر کوتاه شدگی بین دو روش در ارتباط با ضعف روش مقاطع موازنه شده در اندازه گیری کوتاه شدگی پیکری و کوتاه شدگی های پیش از چین خوردگی در بدنه سنگ می باشد. تحلیل های حاصل از مقادیر کرنش زمین ساختی و عدد جنبش شناختی تاوایی گویای تغییرات مکانی متفاوت این پارامترها در بخش های مختلف تاقدیس می باشد (شکل ۱۱).

(Mouthereau et al., 2012). پژوهشگران زیادی با استفاده از تهیه مقاطع عرضی موازنه شده به برآورد میزان کوتاه شدگی در بخش های مختلف زاگرس پرداخته اند (Blanc et al., 2003; McQuarrie, 2004; Sherkati et al., 2005; Molinaro et al., 2005; Alavi, 2007; Al-Azzawi, 2008). مک کوثری (McQuarrie, 2004) به وسیله مقاطع عرضی موازنه شده به تعیین مقادیر کوتاه شدگی در بخش های مختلف زاگرس پرداخت. در این مطالعه، مقادیر کوتاه شدگی در پهنه های فارس، فروافتادگی دزفول و لرستان به ترتیب ۱۷، ۳۰ و ۱۹ درصد محاسبه گردید. بلنک و همکاران (Blanc et al., 2003) مقادیر کوتاه شدگی در ناحیه زاگرس لرستان را برابر با ۲۵ درصد محاسبه کردند. تهیه مقاطع عرضی موازنه شده در ناحیه فروافتادگی دزفول و پهنه ایزه مقادیر کوتاه شدگی پوستانه ای را در حدود ۱۳ درصد برآورد نموده است (Sherkati et al., 2005). در ناحیه کمربند زاگرس چین خورده ساده (در شمال بندرعباس) مقادیر کوتاه شدگی معادل ۲۲ درصد محاسبه گردیده است (Molinaro et al., 2005). همچنین کمینه کوتاه شدگی با استفاده از بررسی مقاطع عرضی موازنه شده در کمربند چین خورده - رانده زاگرس بین ۱۶ تا ۳۰ درصد تعیین گردید (Alavi, 2007). هرچند استفاده از نشانگرهای کرنش در تعیین مقادیر کوتاه شدگی پیکری بسیار راهگشا خواهد بود، اما ممکن است یافتن نشانگرهای مناسب به منظور انجام تحلیل های لازم جهت دستیابی به مقادیر کوتاه شدگی امکان پذیر نباشد. تعیین مقادیر کوتاه شدگی با استفاده از نشانگرهای کرنش در مقیاس های منطقه ای



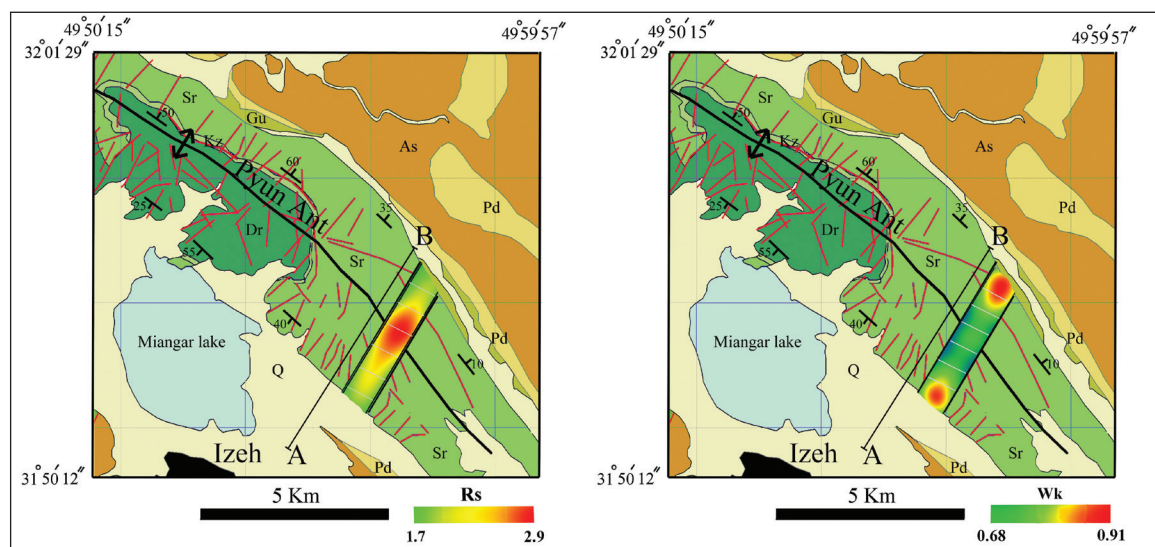
شکل ۹- تعیین مقادیر کشیدگی و درصد کوتاه شدگی در امتداد مقطع مطالعه شده در تاقدیس پیون.

Figure 9. Determination of stretching and percent of shortening along the study direction in the Pyun anticline.



شکل ۱۰- تعیین مقادیر کوتاه شدگی در تاقدیس پیون با استفاده از مقطع عرضی تراز شده.

Figure 10. Determination the amounts of shortening using balanced cross section in the Pyun anticline.



شکل ۱۱- نقشه تغییرات کرنش زمین‌ساختی و عدد جنبش شناختی تاوایی در امتداد راستای مطالعه شده در تاقدیس پیون.

Figure 11. Map of tectonic strain and kinematic vorticity variations along study direction in the Pyun anticline.

۶- نتیجه‌گیری

خمش برشی (flexural shear) نشان‌دهنده مقادیر بزرگ‌تری از مؤلفه برش ساده در یال چین نسبت به لولای چین می‌باشد، احتمالاً این الگوی مکانی در تغییرات عدد جنبش شناختی تاوایی و بیشتر بودن مقادیر این پارامتر در بخش‌های حاشیه‌ای و یال‌های چین را می‌توان در ارتباط با عملکرد سازوکار خمش برشی در تکامل ساختاری تاقدیس پیون مرتبط دانست. احتمال دیگر در ارتباط با بالاتر بودن مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی در طرفین تاقدیس پیون را می‌توان به عملکرد گسل‌های پیش‌رواندگی (Fore thrust) و پس‌رواندگی (Back thrust) و تجمع کرنش برش ساده در حوالی این گسل‌ها مرتبط دانست. هر چند در نقشه زمین‌شناسی، این گسل‌ها ترسیم نشده‌اند اما می‌توان وجود چنین گسل‌هایی را محتمل دانست. نتایج حاصل از تحلیل‌های کرنش گویای رخداد کوتاه‌شدگی پیکری در حدود ۴۷ تا ۵۰ درصد در تاقدیس پیون می‌باشد.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های مالی و معنوی صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG1401.341) در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی می‌گردد.

نتایج تحلیل کرنش نهایی در تاقدیس پیون با استفاده از نشانگر نودول‌های چرتی نشان‌دهنده مقادیر متفاوت کرنش زمین‌ساختی در بخش‌های مختلف این تاقدیس می‌باشد. مقادیر کرنش زمین‌ساختی به‌دست آمده با استفاده از روش Rf/θ نشان‌دهنده تغییر مقادیر R_s در محدوده ۱/۷ تا ۲/۹ است. نتایج نشان‌دهنده افزایش مقادیر کرنش زمین‌ساختی از یال‌های چین به سمت لولای چین می‌باشد. این الگوی افزایشی مقادیر کرنش از یال‌ها به سمت لولای چین را می‌توان در ارتباط با افزایش مؤلفه خمش در بخش‌های لولای چین نسبت به سایر نواحی دانست. مقادیر عددی جنبش شناختی تاوایی (W_k) نشان‌دهنده دامنه تغییرات این پارامتر بین ۰/۶۸ تا ۰/۹۱ بوده و نشان‌دهنده عملکرد همزمان مؤلفه‌های برشی ساده و محض و رخداد پدیده تفکیک کرنش در تکامل ساختاری تاقدیس پیون می‌باشد. الگوی تغییرات مکانی عدد جنبش شناختی تاوایی به گونه‌ای است که بخش‌های مرکزی و لولای چین نسبت به یال‌های چین مقادیر کمتری را نشان می‌دهد. کمتر بودن مقادیر عدد جنبش شناختی تاوایی در بخش‌های لولای چین گویای غلبه مؤلفه برش محض نسبت به مؤلفه برش ساده در این بخش از تاقدیس می‌باشد. همچنین مقادیر بیشتر عدد جنبش شناختی تاوایی در یال‌های تاقدیس پیون نشان‌دهنده غلبه مؤلفه برش ساده در این نواحی نسبت به بخش‌های محوری و لولای تاقدیس می‌باشد. از آنجا که سازوکار چین‌خوردگی

کتابنگاری

آقانباتی، ع.، ۱۳۹۳، زمین شناسی ایران. انتشارات سمر، ۶۴۰ص.

اژدری، ع.، عیبات، ا.، جودکی، م.، ۱۳۹۷، نقشه زمین شناسی ۱/۵۰۰۰۰ استان خوزستان. سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی ایران، درویش زاده، ع.، ۱۳۸۵، زمین شناسی ایران: جنبه شناسی، تکنیک، دگرگونی و ماگماتیسم. انتشارات امیرکبیر، ۴۳۶ص.

References

- Aghanabati, A., 2014. *Geology of Iran. Samar press, 640p. (In Persian).*
- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretation. *Tectonophysics* 229, 211–238, doi: 10.1016/0040-1951(94)90030-2.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science* 304, 1–20, doi: 10.2475/ajs.304.1.1.
- Alavi, M., 2007. Structures of the zagros fold-thrust belt in Iran. *American journal of science*, vol. 307, 1064-1095.
- Al-Azzawi, N. K., 2008. Local Shortening of Folds and Detachment Surface Depth with Examples from the Foreland Belt of Iraq. *Iraqi Journal of Earth Sciences- Vol. 8. No. 1- May.*
- Antonellini, M., Del Sole, L., and Mollema, P.N., 2020. Cherts nodules in plagic limestones as paleo-stress indicators: A 3D geomechanical analysis. *Journal of Structural Geology* 132: 103979.
- Azhdari, A., Abiyat, A., Judaki, M., 2018. *Geological map of Khozestan province 1/50000. Geological survey of Iran. (In Persian).*
- Bailey, C.M., Gilmer, A.K., and Marquis, M.N., 1999. A tale of two shear zones: the vorticity and strain path of two greenschist facies shear zones, *Geological Society of America Abstracts with Programs* 31 (7), 59.
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics*, 241, 193–224.
- Berberian, M., and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences* 18, 210–265.
- Blanc, E.J.P., Allen, M.B., Inger, S., Hassani, H., 2003, Structural styles in the Zagros Simple Folded Zone, Iran. *Journal of Geological Society* 160: 401–412. doi:10.1144/0016-764902-110.
- Darvishzadeh, A., 2006. *Geology of Iran: stratigraphy, tectonic, metamorphism and magmatism. Amirkabir press, 436p. (In Persian).*
- Dunnet, D., 1969. A technique of finite strain analysis using elliptical particles. *Tectonophysics* 7: 117–136.
- Falcon, N.L., 1969. Problems of the relationship between surface structures and deep displacements illustrated by the Zagros range. *Geological Society of London. Spec. Pub. 3*, 9–22.
- Fossen, H., 2010. *Structural geology*, Cambridge University Press, 481p.
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology*, 2nd edn. Cambridge University Press, Cambridge.
- Frehner, M.D., and Grasemann, B., 2012. Mechanical versus kinematical shortening reconstructions of the Zagros High Folded Zone (Kurdistan region of Iraq), *Tectonics*, 31, TC3002, doi:10.1029/2011TC003010.
- Fry, N., 1979. Random point distribution and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* 60: 89–105.
- Galvez, R., and Orozco, M., 1974. Strain determinations using deformed Radiolaria. Malaguide Complex, Southern Spain. *Acta Geologica Hispanica* 14: 129-134.
- Galvez, R., and Orozco, M., 1979. Strain determinations using deformed Radiolaria. Malaguide Complex, Southern Spain. *Acta Geologica Hispanica* 14: 129-134.
- Haynes, S.J., and McQuillan, H., 1974. Evolution of the Zagros Suture zone, southern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 85: 739–744.
- Imber, J., Perry, T., Jones, R., and Wightman, R.H., 2012. Do cataclastic deformation bands form parallel to lines of no finite elongation (LNFE) or zero extension direction? *Journal of Structural Geology* 45:158–172.
- Jackson, J., Haines, J., and William, H., 1995. The accommodation of Arabian-Eurasia plate convergence in Iran. *Journal of Geophysical Research* 100: 15205-15219.
- Jackson, J.A., and McKenzie, D.P., 1984. Active tectonics of the Alpine–Himalayan Belt between Western Turkey and Pakistan. *Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society* 77, 185–284.
- Jessup, M.J., Law, R.D., Frassi, C., 2007. The rigid grain net (RGN): an alternative method for estimating mean kinematic vorticity number (Wm). *Journal of Structural Geology* 29: 411–421.
- Keshavarz, S., and Faghih, A., 2020. Heterogeneous sub-simple deformation in the Gol-e-Gohar shear zone (Zagros, SW Iran): Insights from microstructural and crystal fabric. *International Journal of Earth Sciences* 109: 421- 438.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26: 519–535.
- Means, W.D., Hobbs, B.E., Lister, G.S., and Williams, P.F., 1980. Vorticity and noncoaxiality in progressive deformations. *Journal of Structural Geology* 2:371–378.

- Molinaro, M., Zeyen, H., and Laurencin, X., 2005. Lithospheric structure beneath the southeastern Zagros Mountains, Iran: Recent slab break-off? *Terra Nova* 17, 1–6. doi:10.1111/j.1365-3121.2004.00575.x.
- Mouthereau, F., Lacombe, O., and Verges, J., 2012. Timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics* 532–535: 27–60.
- Partabian, A., and Faghih, A., 2021. Doming along the Zagros transpression zone, SW Iran: insights from microstructural analysis of heterogeneous deformation. *Arabian Journal of Geosciences* 14: 1-19.
- Passchier, C.W., 1988. Analysis of deformation paths in shear zones. *Geologische Rundschau* 77: 309-318.
- Perry, J.T., and Setudehnia, A., 1966. Geological map of Kuh-e Asmari 1/100000. National Iranian oil company.
- Ramsay, J.G., 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568p.
- Ramsay, J.G., and Huber, M.I., 1983. *The Techniques of Modern Structural Geology. Strain Analysis*, Academic Press, London, 1: 307p.
- Samani, B., 2013. Quartz c-axis evidence for deformation characteristic in the Sanandaj-Sirjan belt Iran. *Journal of African Earth Sciences* 81: 28-34.
- Samani, S., Faghih, A., 2014. Finite strain analysis in the Seydan anticline using ammonoid spiral shells, Zagros, Iran. *Journal of African Earth Sciences* 90: 25-30.
- Samani, S., Faghih, A., and Grasemann, B., 2019. Strain pattern and vorticity analysis of deformed conglomerate in the Heneshk area within the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Zagros Mountain, Iran. *International Journal of Earth Sciences* 109: 145-157.
- Sarkarinejad, K., 2007. Quantitative finite strain and kinematic flow analyses along the Zagros transpression zone, Iran. *Tectonophysics* 442: 49–65.
- Sarkarinejad, K., and Gofdari, F., 2019. Thick-skinned and thin-skinned tectonics of the Zagros orogen, Iran: Constraints from structural, microstructural and kinematics analyses. *Journal of Asian Earth Sciences* 170, 249-273.
- Sarkarinejad, K., Faghih, A., and Grasemann, B., 2008. Transpressional deformations within the Sanandaj–Sirjan Metamorphic Belt (Zagros Mountains, Iran). *Journal of Structural Geology* 30: 818–826.
- Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Faghih, A., and Samani, B., 2016. Kinematic analysis of rock flow and deformation temperature of the Sirjan thrust sheet, Zagros Orogen, Iran. *Geological Magazine* 154 (1):147-156.
- Sarkarinejad, K., Partabian, A., Faghih, A., and Kusky, T. M., 2012. Usage of strain and vorticity analyses to interpret large-scale fold mechanisms along the Sanandaj–Sirjan HP-LT metamorphic belt, SW Iran. *Geological Journal*, 47(1), 99-110.
- Sarkarinejad, K., Samani, B., Faghih, A., Grasemann, B., and Moradipoor, M., 2010. Implications of strain and vorticity of flow analyses to interpret the kinematics of an oblique convergence event (Zagros Mountains, Iran). *Journal of Asian Earth Sciences* 38, 34–43.
- Sherkati, S., and Letouzey, J., 2004. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marin and Petroleum Geology* 21:535-554.
- Sherkati, S., Molinaro, M., Frizon deLamotte, D., and Letouzey, J., 2005. Detachment folding in the Central and Eastern Zagros fold-belt (Iran): salt mobility, multiple detachments and late basement control. *J.Struct. Geol.* 27:1680–1696.
- Simpson, C., and De Poar, D.G., 1997. Strain and kinematic analysis in general shear zones, *Journal of Structural Geology*, 15: 1–20.
- Stöcklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran. A review. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 52: 1229–1258.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2002. Offset on the Main Recent Fault of NW Iran and implications for late Cenozoic tectonics of the Arabia–Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International* 150: 422–39.
- Tavakkoli, R., Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., and Hosseini, S.R., 2022. Strain geometry and vorticity analysis of the deformed radiolarian rocks in the Abade-Tashk area, the Zagros suture zone, Iran. *Journal of Earth Science* 33:525-540.
- Tikoff, B., and Teyssier, C., 1994. Strain and fabric analysis based on porphyroclast interaction. *Journal of Structural Geology* 16: 477-492.
- Twiss, R.J., and Moores, E.M., 2004. *Structural Geology* second edition, W.H. Freeman and Company, New York, 552 p.
- Twiss, R.J., and Unruh, J.R., 1998. Analysis of fault slip inversion: Do they constrain stress or strain? *Journal of Geophysical Research* 103: 12205-12222.
- Vernant, P., Nilforoushan, F., Hatzfeld, D., Abbasi, M.R., Vigny, C., Masson, F., Nankali, H., Martinod, J., Ashtiani, A., Bayer, R., Tavakoli, F., and Chery, J., 2000. Present-day crustal deformation and plate kinematics in the Middle East constrained by GPS measurement in Iran and northern Oman. *International Journal of Geophysics* 157: 381–398.
- Vitale, S., and Mazzoli, S., 2008. Heterogeneous shear zone evolution: the role of shear strain hardening/softening. *Journal of Structural Geology* 30:1383–1395.
- Vitale, S., Mazzoli, S., 2008. Heterogeneous shear zone evolution: the role of shear strain hardening/softening. *Journal of Structural Geology* 30:1383–1395.
- Vollmer, F.W., 2011. EllipseFit 2.0. <http://www.frederickvollmer.com/ellipsefit/>.
- Wallis, S.R., 1992. Vorticity analysis in a metachert from the Sanbagawa belt, SW Japan. *Journal of Structural Geology* 14: 271–280.
- Xypolias, P., 2010. Vorticity analysis in shear zones: Areview of methods and applications, *Journal of Structural Geology* 42: 1-21.
- Xypolias, P., Doutsos, T., 2000. Kinematics of rock flow in a crustal-scale shear zone: implication for the rogenic evolution of the southwestern Hellenides. *Geological Magazine* 137, 81–96.