



Research Article

Application of fold style elements for estimation of strain parameters (Case study: Asmari horizon of Karanj oil field)

Babak Samani¹ * , Afshin Cheraghi¹, Abbas Charchi¹

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

Received: 28 Oct 2024 Accepted: 11 May 2025

Extended Abstract

Introduction

Strain analysis in natural deformed rocks is very important for understanding the strain states in different parts of the earth's crust. Using data that can be collected in the field, and applying different methods in strain studies, geologists will be able to measure quantitative amounts of strain in various geological structures. Since geologists are always dealing with the latest deformed products in the earth's crust, they will be able to perform finite strain analysis in structural features or deformed rocks (Ramsay and Hubber, 1983). If geologists need to investigate the changes of incremental strain values at any moment of time in different parts of a structure, the use of laboratory and numerical modeling will be inevitable. In carrying out numerical analysis of strain, it is very important to find elements that can be used as indicators in strain measurement. Several methods have been presented by different researchers to estimate strain values in metamorphic rocks. Methods such as R_f/Φ method (Ramsay and Hubber, 1983), Fry method (Fry, 1979), Bridin method, Wellman method, and the method of preparing balanced cross sections (Ferhner and Grasemann, 2012; Lopez-Mir, 2019) are the most common methods of strain studies, which are used by Structural geologist in different natural deformed areas. Usually, two-dimensional strain studies can help to understand the characteristics of strain ellipsoid in three dimensions. There are several mathematical methods that help to structural geologist for understand the 3D nature of strain from 2D studies. Using of graphical functions is very common in many strain studies. In recent decades, the use of graphical functions (Nomograms) as a quick and simple method in strain analysis is used by many researchers (Ramsay and Hubber, 1983; Imber et al, 2012; Fossen, 2016; Sarkarinrjad et al, 2017, Keshavarz and Faghih, 2020). In this research, the amounts of strain ratio and shortening value in deferent parts of Karanj anticline oil field have been calculated with application of seismic profiles and using fold style elements.

Materials and Methods

In this research, using interpreted seismic sections, some parameters of the fold style elements in the Karanj anticline oil field have been investigated. Interlimb angle, folding angle, geometry of the axial surface, bluntness and fold aspect ratio were determined. Also the Ramsay and Fourier classification were made for deferent part of anticline. By applying the interlimb angle value and by using graphical functions, the fold aspect ratio of Karanj anticline was calculated in different parts. Also, using the fold aspect ratio-shortening and shortening-strain ratio nomograms, the values of shortening and strain ratio were estimated for different parts of anticline.

Citation: Samani, B. et al, 2025. Application of fold style elements for estimation of strain parameters, *Res. Earth. Sci:* 16(2), (19-35) DOI: 10.48308/esrj.2025.237325.1238

* Corresponding author E-mail address: b.samani@scu.ac.ir



Results and Discussion

The analyzes based on the value of the curvature of the folded surfaces between the hinge and inflection points of the fold show that the Karanj anticline is located in the range of sinusoidal to parabolic folds based on the Fourier division and according to the almost equal curvature of the folded surfaces and uniformity. The real thickness of the folded layer is placed in the class 1B group of folds. The fold bluntness parameter is measured based on the ratio of the radius of curvature at the fold closure to the radius of curvature tangent to the edges of the fold at the inflection points of the fold. According to the results, the Karanj anticline with the value of $b=0.22$ to $b=0.64$ is sub-angular to sub-rounded folds. The measurement of the interlimb angle in different parts of the Asmara horizon shows a gentle to open fold. Using the interlimb angle values and application of interlimb angle-fold aspect ratio nomogram, the values of the fold aspect ratio of the Karanj anticline were determined in the range of 0.15 to 0.44. Based on this amounts, the general geometry of the Karanj anticline is placed in the group of broad to wide folds. In order to determine the amount of shortening and the strain ratio in Asmari folded layer, various mathematical relationships and graphical functions have been presented (Ramsay and Hubber, 1983; Bastida et al., 2005, 2007; Ghassemi et al., 2010). It is possible to measure the shortening values by using the fold aspect ratio and using equation 1.

Eq. 1)

$$P = 0.5(1/(1+e)^2 - 1)^{0.5}$$

Also, by using shear strain and determining the values of the square of elongation (Equation, 2), it is possible to determine the values of the strain ratio (Equation, 3).

Eq. 2)

$$\lambda_1 \text{ or } \lambda_3 = 1/2 (\gamma^2 + 2 \pm \gamma(\gamma^2 + 4)^{1/2})$$

Eq 3)

$$R^2 = \lambda_1 / \lambda_3$$

In order to determine the values of the strain ratio using equation 4, it is also possible to use the values of the fold aspect ratios (Ghassemi et al, 2010).

Eq 4)

$$P = 0.5(R-1)^{0.5} \quad \text{or} \quad R = 4P^2 + 1$$

Also, by using the equation 5, it is possible to establish a relationship between the shortening values and the strain ratio.

Eq 5)

$$e = (1/R^{0.5}) - 1$$

In this research, using graphical functions, the values of shortening and strain ratio were determined along the seismic profiles in different parts of the Asmari horizon for the Karanj anticline. The results of this research show that the Karanj oil field anticline is an asymmetric fold with different amounts of interlimb angle along the anticline. Based on the analysis, the values of interlimb angle are not the same throughout the Karanj anticline and it shows lower values in the central parts than in the northern and southern parts of the anticline. Based on the amounts of interlimb angles in different parts, the Karanj anticline is mainly can be categorized in the gentle to open folds. Based on the amounts of bluntness the Karanj anticline is placed in the sub-angular to sub-rounded folds. According to the dip isogon patterns (Ramzay method) and Fourier analysis the Karanj anticline is categorized in the 1B and Sinusoidal to parabolic folds. Based on the strain analyses the values of the strain ratio and shortening percentage in the central parts of the anticline show higher values than the northern and southern parts.

Conclusion

Based on the fold style elements and strain analyses of the Karanj anticline oil field, the following results were obtained:

- The interlimb angles along the Karanj anticline are varying between 74 to 140 degrees.
- The bluntness values of the Karanj anticline oil field is $0.22 < b < 0.64$ and shows the geometry of sub-angular to sub-rounded fold.
- The fold aspect ratio for the Karanj anticline is between (0.15 to 0.44) and based on these amounts shows the geometry of broad to wide folds.
- Also, the results show the shortening values between 7.5% to 32% and strain ratio values in the range of 1.25 to 1.45 in different parts of the anticline.

Keywords: Interlimb angle, Fold bluntness, Fold aspect ratio, Strain ratio, Shortening percentage.

بکارگیری عناصر سبک چین جهت برآورد پارامترهای واتنش (مطالعه موردی: افق آسماری میدان نفتی کرنج)

بابک سامانی^{۱*}، افشین چراغی^۱، عباس چرچی^۱

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۰۷ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۲/۲۱

چکیده گسترده

مقدمه

بررسی و تعیین مقادیر واتنش یکی از مباحث مهم جهت فهم چگونگی الگوی واتنش در قسمت‌های مختلف و دگرشکل شده پوسته زمین می‌باشد. به کارگیری روش‌های مختلف در تعیین مقادیر واتنش، زمین‌شناسان را قادر می‌سازد تا به تعیین مقادیر کمی واتنش در نواحی دگرشکل شده بپردازند. استفاده از داده‌های قابل برداشت در صحرا و داده‌های استخراج شده از نقشه‌ها و مقاطع لرزه‌ای، اولین گام در به کارگیری روش‌های تعیین مقادیر کمی واتنش می‌باشد. با توجه به اینکه زمین‌شناسان با آخرین محصولات دگرشکلی در پوسته زمین مواجه هستند از این رو همواره به انجام تحلیل‌های واتنش نهایی (Finite strain) در سنگ‌های دگرشکل شده می‌پردازند. در مطالعات واتنش نهایی محصول نهایی دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر کمی واتنش در آخرین مرحله از دگرشکلی مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در صورتیکه نیاز باشد تا تغییرات مقادیر واتنش در هر لحظه از زمان در بخش‌های مختلف یک ساختار مورد بررسی قرار گیرد استفاده از مدل‌های آزمایشگاهی و عددی امری اجتناب‌ناپذیر بوده و تحلیل‌های واتنش پیشرونده (Incremental strain) صورت می‌پذیرد. فرایند تحلیل‌های عددی واتنش، بر پایه یافتن عناصری که بتوان از آنها بعنوان نشانگر در اندازه‌گیری‌های واتنش استفاده نمود. روش‌های متفاوتی بوسیله محققین مختلف جهت برآورد مقادیر کمی واتنش در سنگ‌های دگرریخت شده ارائه شده است. روش‌هایی همچون روش R/Φ (Ramsay and Hubber, 1983)، روش Fry (Fry, 1979)، روش بریدین (Breddin, 1956)، روش ولمن، روش تهیه مقاطع عرضی موازنه شده (Lopez-Mir, 2019; Ferhner and Grasemann, 2012) و ... از متداول‌ترین روش‌های مطالعات واتنش می‌باشند که توسط بسیاری از زمین‌شناسان ساختاری مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات واتنش سه بعدی و فهم کامل ماهیت واتنش در سه بعد نیازمند انجام برداشت‌های مناسب از صفحات مختلف بیضوی واتنش می‌باشد. معمولاً مطالعات دو بعدی واتنش می‌توانند به درک ویژگی‌های بیضوی واتنش در سه بعد کمک نمایند. روش‌های ریاضی مختلفی جهت درک ماهیت سه بعدی واتنش از طریق بررسی‌های دو بعدی واتنش ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983). در تحلیل‌های واتنش، جهت تعیین مقادیر کمی واتنش استفاده از توابع ریاضی امری متداول می‌باشد. از آنجا که استفاده از برخی روابط و توابع ریاضی بسیار دشوار و نیازمند مهارت ریاضی و صرف زمان زیادی می‌باشد در دهه‌های اخیر استفاده از برخی توابع تصویری (Nomograms) به عنوان روشی سریع و ساده در تحلیل‌های واتنش مورد استفاده بسیاری از محققین زمین‌شناسی قرار گرفته است.

استناد: سامانی، ب. و همکاران، ۱۴۰۴. بکارگیری عناصر سبک چین جهت برآورد پارامترهای واتنش، پژوهش‌های دانش زمین: ۱۶(۲)،

DOI: 10.48308/esrj.2025.237325.1238 (۱۹-۳۵)

E-mail: b.samani@scu.ac.ir

* نویسنده مسئول:



(Ramsay and Hubber, 1983; Imber et al, 2012; Fossen, 2016; Sarkarinrjad et al, 2017, Samani, 2017; Keshavarz) در این تحقیق جهت برآورد مقادیر واتنش از توابع تصویری ارائه شده در تحلیل ساختارهای چین خورده بهره گرفته شده است.

مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از مقاطع لرزه‌ای تفسیر شده عرضی به بررسی برخی از عناصر سبک چین در افق آسماری میدان نفتی کرنج پرداخته شده است. عناصر چین همچون زاویه بین یالی، زاویه چین خوردگی و تیزی چین مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از بررسی خطوط هم شیب و تحلیل فوریه کلاس و ماهیت شکل چین در هر مقطع لرزه‌ای تعیین گردید. با استفاده از مقادیر زاویه بین یالی و تیزی چین، نسبت ابعادی چین (نسبت دامنه به نصف طول موج) در هر مقطع اندازه‌گیری شد و با به کارگیری توابع تصویری مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش در امتداد مقاطع لرزه‌ای مختلف محاسبه گردید. روش مورد استفاده در این پژوهش قابلیت اندازه‌گیری مقادیر کوتاه شدگی پیش از چین خوردگی و کوتاه شدگی پیکری سنگ در چین خوردگی را نداشته از این رو مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش محاسبه شده در این مطالعه مقادیر کمینه این پارامترها را ارائه خواهند نمود.

نتایج و بحث

سطح انحنای سطوح چین خورده در حد فاصل نقاط لولا و عطف چین مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج بر اساس تقسیم‌بندی فوریه در محدوده چین‌های سینوسی تا پارابولیک قرار داشته و با توجه به انحنای تقریباً برابر سطوح چین خورده و یکنواختی ضخامت حقیقی لایه چین خورده در گروه چین‌های کلاس IB قرار می‌گیرد. تیزی چین، بر اساس نسبت شعاع انحنا در محل بستگی چین به شعاع انحنا بر مماس‌های چین در نقطه عطف اندازه‌گیری می‌شود. بر اساس نتایج به دست آمده در تاقدیس کرنج مقادیر پارامتر تیزی در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۶۴ قرار داشته و این ساختار تاقدیسی در محدوده چین‌های تقریباً زاویه‌دار (Subangular) تا تقریباً مدور (Subrounded) قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری زاویه بین یالی در بخش‌های مختلف تاقدیس کرنج نشان می‌دهد که این چین در محدوده چین‌های ملایم تا باز قرار دارد. با استفاده از مقادیر زاویه بین یالی و با به کارگیری تابع تصویری زاویه بین یالی - نسبت ابعادی چین، مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس کرنج در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۴ تعیین گردید. بر این اساس هندسه کلی تاقدیس کرنج در گروه چین‌های وسیع تا پهن قرار می‌گیرد. به منظور تعیین مقادیر کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش در سطوح چین خورده روابط ریاضی و توابع تصویری مختلفی ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983; Bastida et al, 2005, 2007; Ghassemi et al, 2010). با استفاده از مقادیر نسبت ابعادی چین و با استفاده از رابطه ۱ اندازه‌گیری مقادیر کوتاه‌شدگی امکان‌پذیر می‌باشد.

رابطه ۱)

$$P = 0.5(1/(1+e)^2 - 1)^{0.5}$$

با استفاده از هندسه سطح محوری و میزان انحراف سطح محوری چین از حالت قائم و تعیین زاویه برش می‌توان جهت برآورد مقادیر واتنش برشی و تعیین مقادیر مربع کشیدگی (رابطه ۲) و تعیین مقادیر نسبت واتنش اقدام نمود (رابطه ۳).

رابطه ۲)

$$\lambda 1 \text{ or } \lambda 3 = 1/2 (\gamma^2 + 2 \pm \gamma(\gamma^2 + 4)^{1/2})$$

رابطه ۳)

$$R^2 = \lambda 1 / \lambda 3$$

جهت تعیین مقادیر نسبت واتنش (R) با استفاده از رابطه ۴ می‌توان از مقادیر نسبت ابعادی چین (P) نیز بهره جست (Ghassemi et al, 2010).

رابطه ۴)

$$P = 0.5(R-1)^{0.5} \text{ or } R = 4P^2 + 1$$

همچنین با استفاده از رابطه ۵ می‌توان بین مقادیر کوتاه شدگی (e) و نسبت واتنش (R) ارتباط برقرار نمود.

رابطه ۵)

$$e = (1/R^{0.5}) - 1$$

در این پژوهش با بکارگیری عناصر هندسی چین و با استفاده از توابع تصویری، مقادیر کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش در امتداد نیمرخ‌های لرزه‌ای در بخش‌های مختلف افق آسماری برای تاق‌دیس کرنج تعیین گردید. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که تاق‌دیس میدان نفتی کرنج یک چین نامتقارن با مقادیر متفاوت زاویه بین یالی در بخش‌های مختلف در امتداد محور چین می‌باشد. نتایج حاکی از آن است که بخش‌های مرکزی تاق‌دیس مقادیر زاویه بین یالی کمتری را نسبت به بخش‌های شمالی و جنوبی تاق‌دیس نشان می‌دهد. بر اساس مقادیر زاویه بین یالی در بخش‌های مختلف چین، می‌توان تاق‌دیس کرنج را در رده چین‌های ملایم تا باز طبقه‌بندی نمود. براساس مقادیر به دست آمده برای پارامتر تیزی چین، تاق‌دیس کرنج در گروه چین‌های تقریباً زاویه‌دار تا تقریباً مدور قرار می‌گیرد. بر اساس الگوی خطوط هم شیب (روش رمزی) و تحلیل فوریه تاق‌دیس کرنج در گروه چین‌های رده IB و چین‌های سینوسی تا پارابولیک قرار می‌گیرد. بر اساس تحلیل‌های واتنش، مقادیر نسبت واتنش و درصد کوتاه‌شدگی در بخش‌های مرکزی تاق‌دیس، مقادیر بالاتری را نسبت به بخش‌های شمالی و جنوبی تاق‌دیس نشان می‌دهد.

نتیجه‌گیری

بر اساس تحلیل عناصر سبک چین و تحلیل واتنش بر روی تاق‌دیس میدان نفتی کرنج نتایج زیر حاصل گردید:

- مقادیر زاویه بین یالی در طول تاق‌دیس کرنج بین ۷۴ تا ۱۴۰ درجه متغیر می‌باشد.
- مقادیر پارامتر تیزی چین در تاق‌دیس میدان نفتی کرنج بین ۰/۲۲ تا ۰/۶۴ بوده و نشان دهنده هندسه یک چین تقریباً زاویه دار تا تقریباً مدور می‌باشد.
- مقادیر نسبت ابعادی چین برای تاق‌دیس میدان نفتی کرنج بین ۰/۱۵ تا ۰/۴۴ متغیر بوده و بر اساس این مقادیر تاق‌دیس کرنج در محدوده چین‌های پهن تا وسیع قرار می‌گیرد.
- همچنین نتایج نشان می‌دهد که مقادیر کوتاه‌شدگی بین ۷/۵ درصد تا ۳۲ درصد و مقادیر نسبت واتنش بین ۱/۲۵ تا ۱/۴۵ در بخش‌های مختلف تاق‌دیس در حال تغییر می‌باشد.

واژگان کلیدی: زاویه بین یالی، تیزی چین، نسبت ابعادی چین، نسبت واتنش، درصد کوتاه‌شدگی

مقدمه

بررسی قرار خواهد گرفت. در صورتیکه نیاز باشد تا تغییرات مقادیر واتنش در هر لحظه از زمان در بخش‌های مختلف یک ساختار مورد بررسی قرار گیرد استفاده از مدل سازی-های آزمایشگاهی و عددی امری اجتناب ناپذیر بوده و تحلیل‌های واتنش پیشرونده (Incremental strain) صورت می‌پذیرد. فرایند تحلیل‌های عددی واتنش، بر پایه یافتن عناصری که بتوان از آنها بعنوان نشانگر در اندازه‌گیری‌های واتنش استفاده نمود. روش‌های متفاوتی بوسیله محققین مختلف جهت برآورد مقادیر کمی واتنش در سنگ‌های دگرریخت شده ارائه شده است. روش‌هایی همچون روش R/Φ (Ramsay and Hubber, 1983)، روش Fry (Fry, 1979)، روش بریدین (Breddin, 1956)، روش ولمن، روش تهیه مقاطع عرضی موازنه شده (Fernihner and Grasmann, 2012; Lopez-Mir, 2019) و ... از متداول-ترین روش‌های مطالعات واتنش می‌باشند که توسط

بررسی و تعیین مقادیر واتنش یکی از مباحث مهم جهت فهم چگونگی الگوی واتنش در قسمت‌های مختلف و دگرشکل شده پوسته زمین می‌باشد. به کارگیری روش‌های مختلف در تعیین مقادیر واتنش، زمین شناسان را قادر می‌سازد تا به تعیین مقادیر کمی واتنش در نواحی دگرشکل شده بپردازند. استفاده از داده‌های قابل برداشت در صحرا و داده‌های استخراج شده از نقشه‌ها و مقاطع لرزه‌ای، اولین گام در به کارگیری روش‌های تعیین مقادیر کمی واتنش می‌باشد. با توجه به اینکه زمین شناسان با آخرین محصولات دگرشکلی در پوسته زمین مواجه هستند از این رو همواره به انجام تحلیل‌های واتنش نهایی (Finite strain) در سنگ‌های دگرشکل شده می‌پردازند. در مطالعات واتنش نهایی محصول نهایی دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر کمی واتنش در آخرین مرحله از دگرشکلی مورد

مقاطع عرضی موازنه شده مستلزم تهیه نیمرخ‌های زمین-شناسی با دقت بالا بوده و با توجه به عدم وجود هماهنگی هندسی و تشابه ساختاری از سطح به عمق معمولاً تهیه مقاطع عرضی موازنه شده دچار چالش می‌شود (Frehner and Grasemann, 2012). مقاطع عرضی موازنه شده توانایی محاسبه واتنش پیکری در لایه‌های دگرشکل شده را نداشته و از این رو می‌توان اذعان داشت که مقادیر کوتاه شدگی محاسبه شده از طریق ترسیم مقاطع موازنه شده همواره نشان دهنده مقادیر کمینه کوتاه شدگی می‌باشد (McQuarrie, 2004; Frehner and Grasemann, 2012). در این مطالعه با استفاده از مقاطع لرزه‌ای عمود بر محور تاق‌دیس میدان نفتی کرج به بررسی سبک چین در افق فوقانی سازند آسماری و تحلیل مقادیر واتنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مختلف این ساختار تاق‌دیس‌پراخته شده است. در این تحقیق جهت برآورد مقادیر واتنش از توابع تصویری ارائه شده در تحلیل ساختارهای چین‌خورده بهره گرفته شده است.

منطقه‌ی مورد مطالعه

جایگاه زمین‌ساختی و زمین‌شناسی

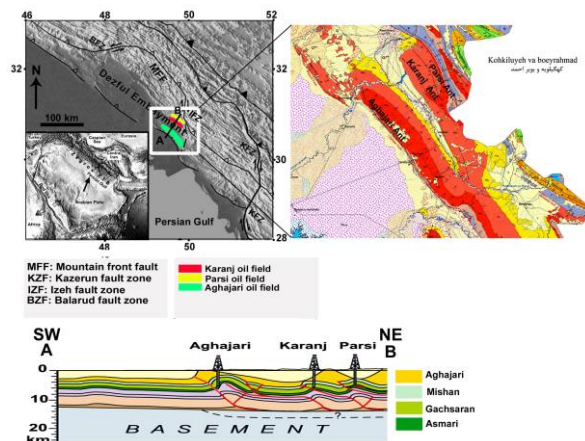
کوهزاد زاگرس بخشی از کمربند کوهزایی آلپ-همیالیای بوده که در حاشیه شمال شرقی صفحه سنگ‌کره‌ای آفریقا-عربی قرار گرفته است (Ricou, 1971; Takin, 1972; Alavi, 2004; Sarkarinejad et al, 2008; Saedi et al, 2022). کمربند کوهزایی زاگرس در نتیجه بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، فرورانش پوسته اقیانوسی به زیر خرده قاره ایران مرکزی و برخورد قاره-قاره از زمان کرتاسه پسین تا ترشیری شکل گرفته است (Stocklin, 1968; Dewey et al, 1973; Berberian and King, 1981; Blanc et al, 2006; Ghasemi and Talbot, 2003). زاگرس یک منطقه دگرشکل شده خطی است (Stocklin, 1968; Berberian and King, 1981; McQuarrie, 2004) که در راستای شمال شرق به جنوب غرب شامل سه بخش اصلی: کمربند ماگمایی ارومیه دختر، کمربند دگرگونی سندانج-سیرجان، و کمربند چین و رانده زاگرس با روند عمومی شمال غرب-جنوب شرق می‌باشد (Mohajjel and Fergossen, 2000; McQuarrie, 2004). ستون چینه‌شناسی زاگرس حدوداً شامل ۱۲ کیلومتر واحدهای سنگی فانروزوئیک بوده که بر روی پی سنگ پرکامبرین قرار گرفته است (Falcon, 2004).

بسیاری از زمین‌شناسان ساختاری مورد استفاده قرار گرفته است. مطالعات واتنش سه بعدی و فهم کامل ماهیت واتنش در سه بعد نیازمند انجام برداشت‌های مناسب از صفحات مختلف بیضوی واتنش می‌باشد. معمولاً مطالعات دو بعدی واتنش می‌توانند به درک ویژگی‌های بیضوی واتنش در سه بعد کمک نمایند. روشهای ریاضی مختلفی جهت درک ماهیت سه بعدی واتنش از طریق بررسیهای دو بعدی واتنش ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983). در تحلیل‌های واتنش، جهت تعیین مقادیر کمی واتنش استفاده از توابع ریاضی امری متداول می‌باشد. از آنجا که استفاده از برخی روابط و توابع ریاضی بسیار دشوار و نیازمند مهارت ریاضی و صرف زمان زیادی می‌باشد در دهه‌های اخیر استفاده از برخی توابع تصویری (Nomograms) به عنوان روشی سریع و ساده در تحلیل‌های واتنش مورد استفاده بسیاری از محققین زمین‌شناسی قرار گرفته است (Ramsay and Hubber, 1983; Imber et al, 2012; Fossen, 2016; Sarkarinejad et al, 2017; Samani, 2017; Keshavarz and Faghiih, 2020; Faghiih et al, 2023; Soleimani et al, 2023, Keshavarz et al, 2024).

وجود دگرشکلی‌های متعدد و همچنین کمبود داده‌های زیرسطحی، محاسبات مربوط به مطالعات واتنش را دچار چالش خواهد نمود. با این وجود در بسیاری موارد می‌توان با استفاده از نشانگرهای مختلف و برخی ساختارهای سطحی و زیرسطحی، مقادیر عددی واتنش را محاسبه نمود. تاکنون مطالعات متعددی جهت برآورد مقادیر کمی واتنش در بخش‌های مختلف پوسته زمین صورت پذیرفته است. در این مطالعات از روش‌های مختلفی همچون استفاده از کانی-های دگرشکل شده کوارتز در پهنه‌های برشی و استفاده از نشانگرهایی همچون قله‌های دگرشکل شده کنگلومرا، فسیل‌های دگرشکل شده (Samani, 2013, 2017; Faghiih et al, 2023; Partabian and Faghiih, 2021; Soleimani et al, 2021, 2023; Keshavarz et al, 2018, 2024) و نیز به کارگیری مقاطع عرضی موازنه شده استفاده شده است (Teyssier, 1985; Espurt et al, 2012; Frehner and Graseman, 2012; Blance et al, 2003; Sherkaty et al, 2005; McQuarrie, 2004; Molinaro et al, 2007; Alavi, 2007). تعیین مقادیر کوتاه شدگی با استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده دارای محدودیت‌هایی است که ممکن است مقادیر محاسبه کوتاه شدگی مقادیری واقعی نباشند (Frehner and Grasemann, 2012). تهیه

ترشیری نسبت به ناحیه فارس و لرستان مشخص می‌شود (Sepehr et al, 2006). این منطقه با وسعت شصت هزار کیلومتر مربع در حدود ۸٪ از ذخایر هیدروکربنی کل دنیا را شامل می‌شود (Bordenave and Hegre, 2005). منطقه ساختمانی فروافتادگی دزفول حدود ۲۲ میدان نفتی از جمله میادین اهواز، مارون، کوپال، آغاجاری، کرنج، پارسی و زیلابی را در بر می‌گیرد. شواهد زمین شناسی حاکی از آن است که این فروافتادگی بصورت یک واحد ساختاری مجزا بین سه پدیده مهم ساختاری قرار گرفته است. این فروافتادگی از شمال بوسیله منطقه گسلی و چپگرد بالارود (BFZ)، از شرق و شمال شرق بوسیله گسل اصلی پیشانی کوهستان (MFF) و از جنوب شرق بوسیله منطقه گسلی و راستگرد کازرون (KFZ) احاطه شده است (شکل ۱). فروافتادگی دزفول نسبت به هر کدام از این عوامل ساختاری دارای فروافتادگی بین ۳۰۰۰ تا ۶۰۰۰ متر بوده و تقریباً از وسط بوسیله منطقه گسلی ایذه (IFZ)، با راستای شمالی- جنوبی به دو ناحیه شمالی و جنوبی تقسیم شده است. عناصر ساختاری فوق مرتبط با فرایند تکوین پوسته و نتیجه عملکرد گسله‌های پی سنگی می‌باشند (Sepehr et al, 2006). میدان نفتی کرنج در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرق اهواز یک میدان نفتی تاقدیسی بوده که بوسیله ساختارهای ناودیدی حاشیه‌ای از میادین نفتی آغاجاری در جنوب غرب و میدان نفتی پارسی در شمال شرق متمایز شده است (شکل ۱).

1974; Blanc et al, 2003; Alavi, 2007; Fergosson et al, 2016). این واحدهای سنگی تاریخچه پیچیده زمین- ساختی این منطقه را در خود حفظ کرده و معرف تمام مراحل تکامل یک حوضه از فلات قاره غیرفعال تا کافت و در نهایت مراحل مختلف تغییر شکل در ارتباط با فرارانش افیولیت‌ها و برخورد قاره‌ای است (Takin, 1972; Alavi, 2007; Sadeghi and Yassaghi, 2016; Faghieh et al, 2023). کمربند چین و راندگی زاگرس یک زون ترافشارشی (Transpression) است که در اثر برخورد بین صفحه سنگ کره‌ای آفریقا-عربی و خرد قاره ایران مرکزی با زاویه‌ای حدود ۲۵ تا ۴۵ درجه ایجاد شده است (Talebian and Jackson, 2004; Sarkarinejad and Azizi, 2008; Sadeghi and Yassaghi, 2016). این همگرایی در قسمت جنوب خاور تقریباً عمودی بوده و در قسمت شمال باختر از تمایل بیشتری برخوردار می‌باشد (Talebian and Berberian, 2004; Teyssier, 1985). بربریان (Jackson, 2004; Teyssier, 1985) بر پایه انباشته‌های نمکی سری هرمز، کمربند 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 مطالعاتی در پهنه ساختاری فروافتادگی دزفول واقع شده است. فروافتادگی دزفول (Dezful Embayment) یک منطقه ساختمانی در جنوب غربی کمربند چین و رانده شده زاگرس می‌باشد (Sepehr et al, 2006). در این منطقه سازند آهکی آسماری (مخزن اصلی نفت) فاقد رخنمون بوده و با افزایش ضخامت رسوبات



شکل ۱: جایگاه زمین ساختی فرو افتادگی دزفول و موقعیت میدان نفتی کرنج. مقطع زمین شناسی شماتیک، برگرفته از: شرکتی و همکاران (Sherkati et al, 2006).

Fig 1: Geological setting of Dezful embayment and the Karanj oil field. Geological cross section from (Sherkati et al, 2006).

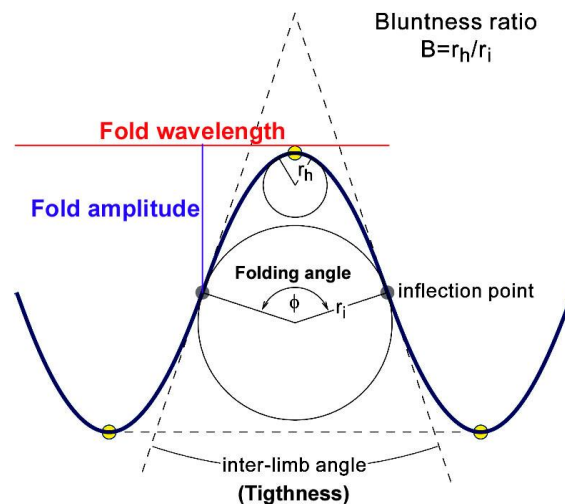
مواد و روش‌ها

در این پژوهش با استفاده از مقاطع لرزه‌ای تفسیر شده عرضی به بررسی برخی از عناصر سبک چین در افق آسماری میدان نفتی کرنج پرداخته شده است. عناصر چین همچون زاویه بین یالی، زاویه چین خوردگی و تیزی چین مورد بررسی قرار گرفته است. با استفاده از بررسی خطوط هم شیب و تحلیل فوریه کلاس و ماهیت شکل چین در هر مقطع لرزه‌ای تعیین گردید. با استفاده از مقادیر زاویه بین یالی و تیزی چین، نسبت ابعادی چین (نسبت دامنه به نصف طول موج) در هر مقطع اندازه‌گیری شد و با به کارگیری توابع تصویری مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش در امتداد مقاطع لرزه‌ای مختلف محاسبه گردید. روش مورد استفاده در این پژوهش قابلیت اندازه‌گیری مقادیر کوتاه شدگی پیش از چین خوردگی و کوتاه شدگی پیکری سنگ در حین چین خوردگی را نداشته از این رو مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش محاسبه شده در این مطالعه مقادیر کمینه این پارامترها را ارائه خواهند نمود.

عناصر سبک چین در افق آسماری

سبک چین شامل مجموعه‌ای از شاخص‌ها است که شکل چین را توصیف می‌کنند. طی سال‌های طولانی مطالعه چین‌ها، زمین‌شناسان شاخص‌های خاصی را

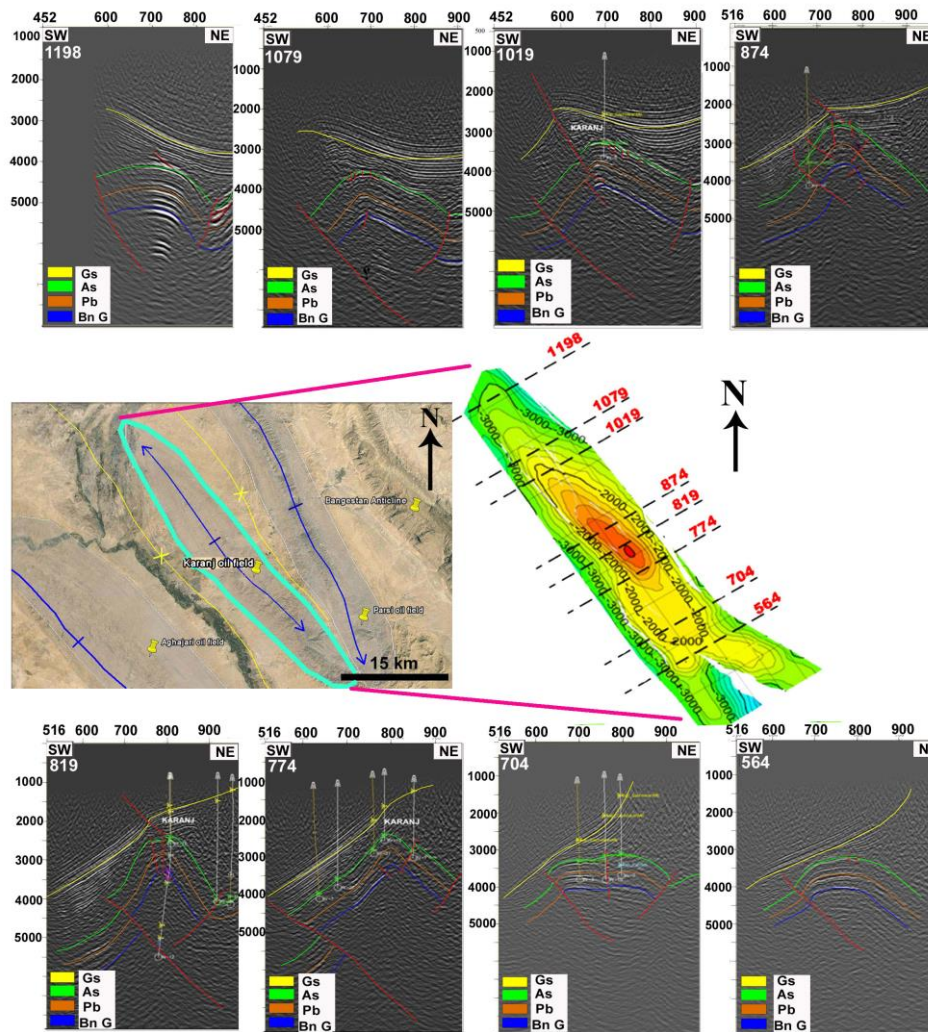
توصیف کرده‌اند که در تشریح و فهم چگونگی توسعه چین‌ها بسیار مفید است. مهمترین این شاخص‌ها شامل: زاویه چین خوردگی (Folding angle)، زاویه بین یالی یا تنگی (Interlimb angle or Tightness)، تقارن (Symmetry)، تیزی (Bluntness) و نسبت ابعادی (Aspect ratio) می‌باشد. زاویه چین خوردگی، زاویه بین خطوط عمود بر مماس‌هایی است که از نقاط عطف می‌گذرد (زاویه θ) و زاویه بین یالی یا تنگی چین، زاویه بین خطوط مماس بر نقاط عطف چین می‌باشد (زاویه i) (شکل ۲). زاویه چین خوردگی و زاویه بین یالی مکمل یکدیگر می‌باشند ($i=180-\theta$). درجه استوانه‌ای بودن چین بوسیله میزان نزدیکی یک چین به حالت استوانه‌ای سنجیده می‌شود و معمولاً بوسیله تحلیل‌های استریوگرافیکی قابل بحث می‌باشد. درجه تقارن چین بوسیله زاویه انحراف (B) بین نیمساز زاویه چین خوردگی و سطح میانی تعیین می‌شود این زاویه برای چین‌های متقارن برابر با ۹۰ درجه و برای چین‌های نامتقارن مقداری غیر از ۹۰ درجه می‌باشد. تیزی چین، نسبت شعاع انحنا در محل بستگی چین (r_h) به شعاع انحنا بر مماس‌های چین در نقطه عطف (r_i) و نسبت ابعادی چین، نسبت دامنه به نصف طول موج چین می‌باشد (شکل ۲).



شکل ۲: نمایش عناصر زاویه چین خوردگی، زاویه بین یالی و تیزی چین.
Fig. 2: Illustration of fold angle, interlimb angle and Bluntness

شکل ۳ موقعیت، راستا و مقاطع لرزه‌ای تهیه شده از میدان نفتی کرنج را نشان می‌دهد.

در این پژوهش از هشت مقطع لرزه‌ای عرضی جهت بررسی عناصر سبک چین و تحلیل‌های واتنش استفاده شده است.

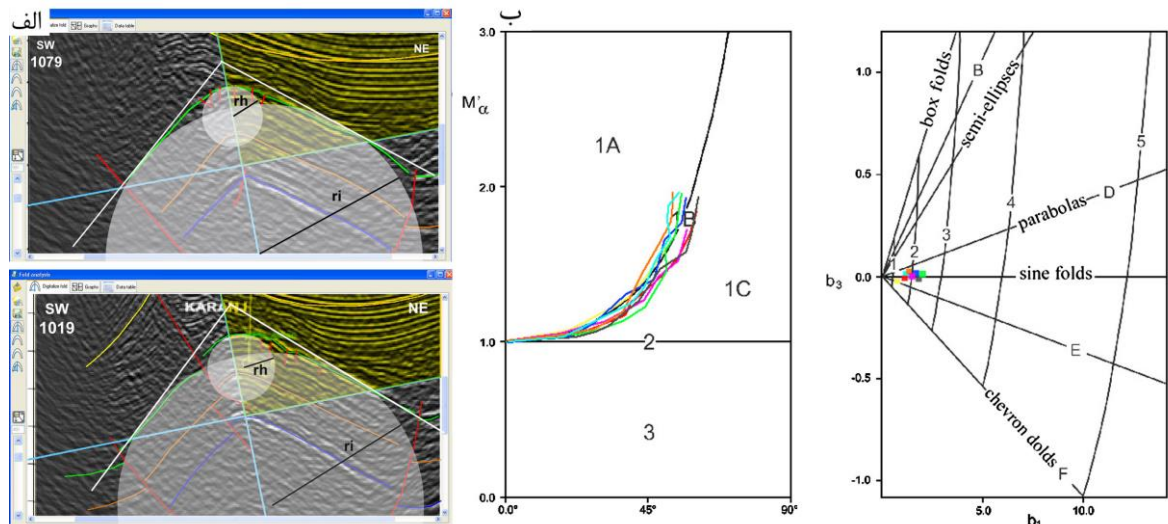


شکل ۳: راستای مقاطع لرزه‌ای و مقاطع لرزه‌ای تهیه شده در امتداد عمود بر محور تاقدیس کرنج.

Fig. 3: Direction of seismic lines and seismic profiles normal to the Karanj anticline axis.

بدست آمده برای پارامتر تیزی چین این ساختار تاقدیسی در محدوده چین‌های تقریباً زاویه‌دار (Subangular) تا تقریباً مدور (Subrounded) قرار می‌گیرد. با به کارگیری مقاطع لرزه‌ای عرضی و استفاده از نرم‌افزار StaTect مقدار سطح انحناى سطوح چین خورده در حد فاصل نقاط لولا و عطف چین مورد بررسی قرار گرفت (شکل ۴ الف). نتایج نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج بر اساس تقسیم‌بندی فوریه (Stabler, 1968) در محدوده چین‌های سینوسی تا پارابولیک قرار داشته و با توجه به انحناى تقریباً برابر سطوح چین خورده و یکنواختی ضخامت حقیقی لایه چین خورده در گروه چین‌های کلاس IB قرار می‌گیرد (شکل ۴ ب).

تحلیل‌های هندسی جهت تعیین عناصر سبک چین صورت پذیرفت. شکل ۴ الف، تحلیل‌های صورت گرفته بر روی مقاطع لرزه‌ای ۱۰۷۹ و ۱۰۱۹ جهت تعیین زاویه چین خوردگی، زاویه بین یالی و پارامتر تیزی چین را نشان می‌دهد. بر این اساس مقادیر زاویه چین خوردگی در محدوده ۴۷ تا ۱۰۶ درجه، زاویه بین یالی ۷۴ تا ۱۴۰ درجه و مقادیر پارامتر تیزی در محدوده ۰/۲۲ تا ۰/۶۴ قرار می‌گیرد. جدول ۱ مقادیر عددی عناصر چین در راستای مقاطع لرزه‌ای مختلف را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که بر اساس مقادیر زاویه بین یالی تاقدیس کرنج در محدوده چین‌های ملایم تا باز قرار دارد. همچنین بر اساس مقادیر



شکل ۴: استفاده از مقاطع لرزه‌ای و به کارگیری نرم افزار Sta Tect جهت: الف: تحلیل عناصر زاویه چین خوردگی، زاویه بین یالی، تیزی چین و هندسه چین و ب: تحلیل رمزی و فوریه برای افق آسماری میدان نفتی کرانج.

Fig. 4: Using seismic profiles and application of Sta Tect software. a: Analyses of folding angle, interlimb angle, bluntness and fold geometry and b: Ramsay and Fourier analyses of Asmari horizon of Karanj oil field

جدول ۱: مقادیر زاویه چین خوردگی، زاویه بین یالی، تیزی و نسبت ابعادی چین

Table 1: The amounts of Folding angle, interlimb angle, bluntness and fold aspect ratio

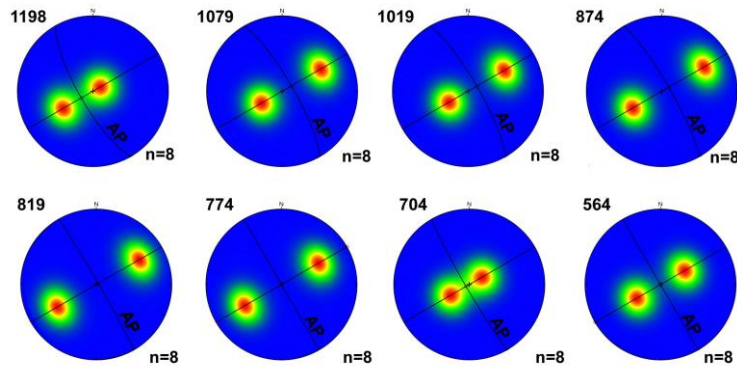
Seismic profile	Folding angle	Interlimb angle	Bluntness	Fold Aspect ratio
1198 (1)	47	133	0.54	0.18
1079 (2)	75	105	0.38	0.27
1019 (3)	70	110	0.35	0.25
874 (4)	91	89	0.28	0.35
819 (5)	106	74	0.22	0.44
774 (6)	94	86	0.25	0.37
704 (7)	40	140	0.64	0.15
564 (8)	60	120	0.61	0.21

رابطه (۱)

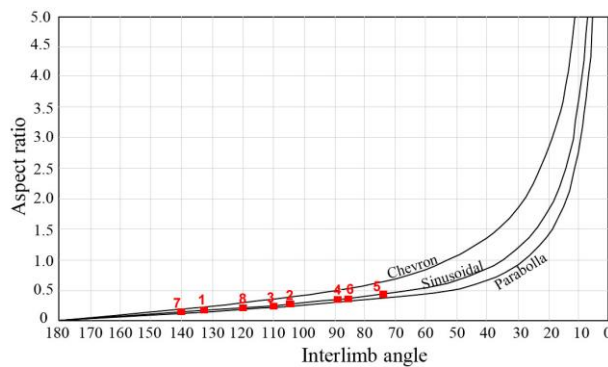
$$i = 2 \arctan 1/2p$$

در این رابطه i زاویه بین یالی و p نسبت ابعادی چین (نسبت دامنه به نصف طول موج) می‌باشد. با استفاده از تحلیل ریاضی زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین خوردگی‌های مختلف، توابع تصویری جهت تعیین مقادیر نسبت ابعادی چین برای چین‌های جناغی، سینوسی و پارابولیک ارائه گردیده است (Ghassemi et al, 2010). با استفاده از مقادیر زاویه بین یالی و با به کارگیری تابع تصویری زاویه بین یالی - نسبت ابعادی چین (شکل ۶)، مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس کرنج در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۴ تعیین گردید. بر این اساس هندسه کلی تاقدیس کرنج در گروه چین‌های وسیع تا پهن قرار می‌گیرد. به منظور درک بهتر چگونگی تغییرات مکانی زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین، نقشه پهنه‌بندی تغییرات این پارامترها در امتداد تاقدیس کرنج تهیه گردید (شکل ۷).

بررسی هندسه سطح محوری در مقاطع مختلف نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج در امتداد محور خود هندسه یکسانی ندارد. جهت تحلیل استریوگرافی هندسه سطح محوری، میانگین شیب یال‌های چین بوسیله ترسیم خطوط مماس بر سطح چین خورده در هر مقطع لرزه‌ای اندازه‌گیری شد. بدین منظور در هر یال با ترسیم حداقل چهار خط مماس بر سطح چین خورده میانگین شیب یال‌ها در هر مقطع لرزه‌ای بدست آمد. نتایج تحلیل‌های استریوگرافیک نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج در گروه تاقدیس‌های نامتقارن قرار می‌گیرد (شکل ۵). با استفاده از شکل هندسی سطوح چین خورده و انجام تحلیل‌های ریاضی می‌توان برای چین خوردگی‌های مختلف بین برخی عناصر سبک چین ایجاد ارتباط نمود. به عنوان مثال در چین‌های جناغی بین زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین رابطه ۱ حاکم می‌باشد (Ghassemi et al, 2010).

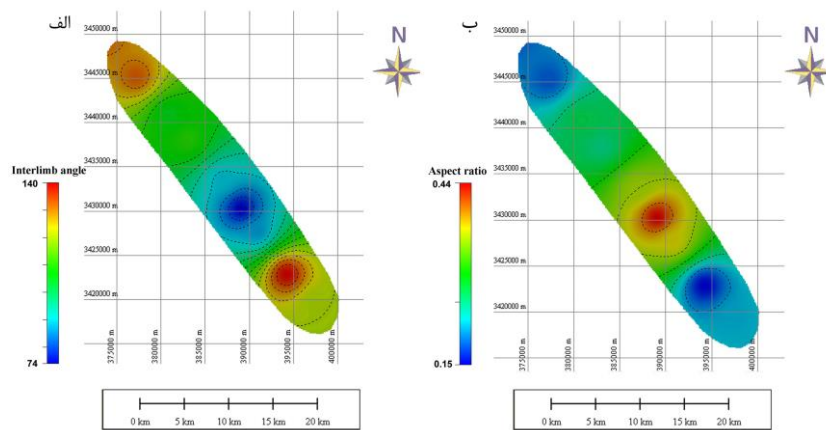


شکل ۵: تصویر اندازی استریوگرافی سطح محوری تاقدیس کرنج در امتداد مقاطع لرزه‌ای مختلف. (AP: سطح محوری).
 Fig. 5: Stereographic projections of axial surface of Karanj anticline along different seismic profiles. (AP: axial surface)



شکل ۶: تعیین مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس کرنج با استفاده از مقادیر زوایای بین یالی با به کارگیری تابع تصویری (Ghassemi et al., 2010).

Fig. 6: Determination of Karanj anticline aspect ratio using the amounts of interlimb angles with application of nomogram (Ghassemi et al., 2010).



شکل ۷: الف و ب: نقشه پهنه‌بندی تغییرات زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین در امتداد تاقدیس کرنج
 Fig. 7: a and b: Zoning map of interlimb angle and fold aspect ratio along Karanj anticline.

بسیاری از زمین شناسان ساختاری قرار گرفته است. تحلیل‌های واتنش راهکاری کاربردی جهت شناسایی مکانیزم‌های عمل کننده در رخداد دگرشکلی‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Vernant and Chery, 2006;)

بحث و نتایج

برآورد پارامترهای واتنش

بررسی کمی و کیفی پارامترهای واتنش در مناطق دگرشکل شده پوسته زمین در سال‌های اخیر مورد توجه

نسبت واتنش و مقادیر کوتاه شدگی افق آسماری در تاقدیس میدان نفتی کرنج پرداخته شده است. با استفاده از مقادیر نسبت ابعادی چین و با استفاده از رابطه ۱ اندازه گیری مقادیر کوتاه شدگی امکان پذیر می باشد (Ghassemi et al, 2010).

رابطه (۱)

$$P = 0.5(1/(1+e)^2 - 1)^{0.5}$$

که در آن P نسبت ابعادی چین و e کوتاه شدگی می باشد. با استفاده از هندسه سطح محوری و میزان انحراف سطح محوری چین از حالت قائم و تعیین زاویه برش می توان جهت برآورد مقادیر واتنش برشی و تعیین مقادیر مربع کشیدگی (رابطه ۲) و تعیین مقادیر نسبت واتنش اقدام نمود (رابطه ۳)، (Ramsay and Hubber, 1983).

رابطه (۲)

$$\lambda_1 \text{ or } \lambda_3 = 1/2 (\gamma^2 + 2 \pm \gamma(\gamma^2 + 4)^{1/2})$$

رابطه (۳)

$$R^2 = \lambda_1 / \lambda_3$$

در روابط فوق λ ، γ و R به ترتیب عکس مربع کشیدگی، استرین برشی و نسبت واتنش می باشند. جهت تعیین مقادیر نسبت واتنش (R) با استفاده از رابطه ۴ می توان از مقادیر نسبت ابعادی چین (P) نیز بهره جست (Ghassemi et al, 2010).

رابطه (۴)

$$P = 0.5(R-1)^{0.5} \text{ or } R = 4P^2 + 1$$

همچنین با استفاده از رابطه ۵ (Ghassemi et al, 2010) می توان بین مقادیر کوتاه شدگی (e) و نسبت واتنش (R) ارتباط برقرار نمود.

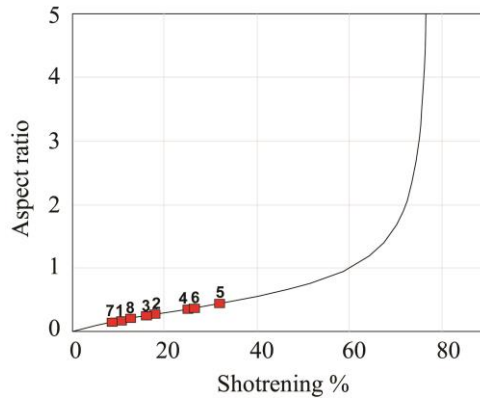
رابطه (۵)

$$e = (1/R^{0.5}) - 1$$

در این پژوهش با بکارگیری عناصر هندسی چین و با استفاده از توابع تصویری، مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش در امتداد نیمرخ های لرزه ای در بخش های مختلف افق آسماری برای تاقدیس کرنج تعیین گردید (اشکال ۸ و ۹). شکل ۱۰ الف و ب، نقشه پهنه بندی تغییرات جانبی نسبت واتنش و مقادیر کوتاه شدگی در افق آسماری میدان نفتی کرنج را نشان می دهد.

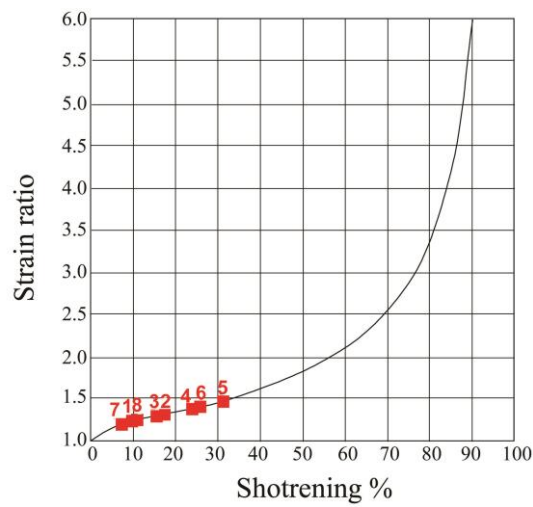
(Fossen, 2016). در تحلیل های جنبش شناختی و دینامیکی مناطق دگرشکل شده برآورد مقادیر نسبت واتنش و کوتاه شدگی یکی از اهداف مهم در اینگونه مطالعات می باشد (Fossen, 2016). در پهنه های دگرگونی استفاده از برخی نشانگرهای واتنش و به کارگیری روش های مطالعات تاوایی جنبش شناختی (Kinematic vorticity) می تواند بعنوان ابزاری جهت برآورد مقادیر نسبی واتنش و مقادیر کوتاه شدگی مورد استفاده قرار گیرد (Samani, 2017; Sarkarinejad et al, 2017; Keshavarz and Faghieh, 2020; Partabian and Faghieh, 2021). فرآیندهای چین خوردگی، گسل خوردگی و کوتاه شدگی همگن به موازات لایه بندی سه مکانیزم متداول برای ایجاد واتنش و کوتاه شدگی در کمربندهای کوهزایی می باشند (Dixon and Liu, 1992).

توابع مختلفی جهت بررسی جنبش شناختی و دینامیکی چین ها ارائه شده است که می توان آنها را در دو گروه اصلی طبقه بندی نمود: توابع تکرار پذیر غیرمتناوب و توابع تکرار پذیر یا متناوب (Jeng et al, 2002; Aller et al, 2004; Bastida et al, 2007). در کمربندهای چین خورده استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده یکی از روش های متداول جهت تعیین مقادیر کوتاه شدگی می باشد (Alavi, 2004, 2007; Blance et al, 2003; McQuarrie, 2004; Frehner and Grasemann, 2012). بمنظور تعیین مقادیر کوتاه شدگی و نسبت واتنش در سطوح چین خورده روابط ریاضی و توابع تصویری مختلفی ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983; Bastida et al, 2005, 2007; Ghassemi et al, 2010). در مدل های مکانیکی چین خوردگی، میزان و توسعه نسبت ابعادی چین و کوتاه شدگی افقی کلی با مقدار ویسکوزیته لایه ها در ارتباط می باشد. مقدار ویسکوزیته کمتر باعث کوتاه شدگی و ضخیم شدگی بیشتر لایه و مقدار نسبت ویسکوزیته بیشتر باعث کوتاه شدگی و ضخیم شدگی کمتر لایه می شود (Schmalholz, 2006). از این رو مدل های چین خوردگی چند لایه ای با توجه به تفاوت رفتاری لایه های مختلف پیچیدگی های بیشتری داشته و مقادیر متفاوت نسبت واتنش و کوتاه شدگی را برای هر لایه می توان انتظار داشت. از این جهت در این مطالعه به بررسی



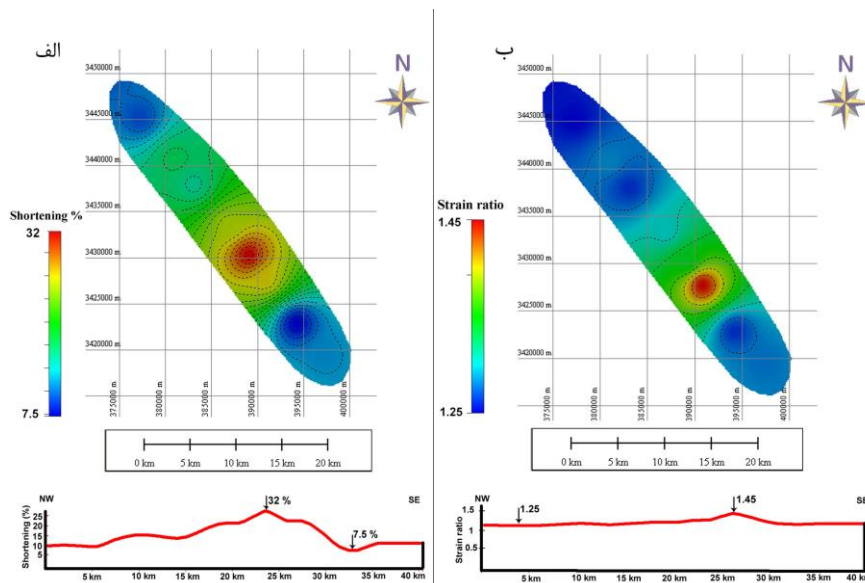
شکل ۸: تعیین مقادیر درصد کوتاه‌شدگی افق آسماری در مقاطع مختلف تاقدیس کرنج

Fig. 8: Determination of shortening percent of Asmari horizon in the different profiles of Karanj anticline.



شکل ۹: تعیین مقادیر نسبت واتنش در مقاطع مختلف تاقدیس کرنج

Fig. 9: Determination the amounts of Strain ratio in different profiles of Karanj anticline.

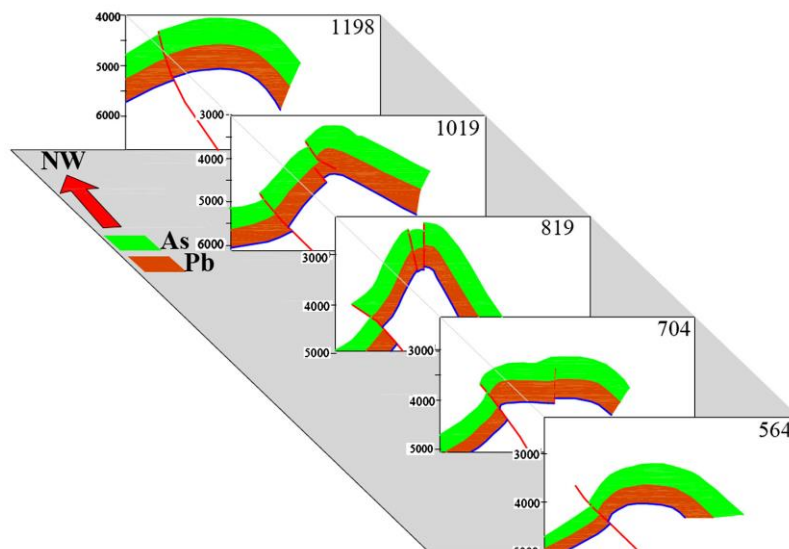


شکل ۱۰: الف و ب: نقشه پهنه‌بندی و نمودار تغییرات جانبی مقادیر درصد کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش در افق آسماری میدان نفتی کرنج.

Fig. 10: a and b: Zoning map and along-different of shortening percentage and strain ratio for Asmari horizon in the Karanj oil field.

تاق‌دیس به سمت بخش‌های مرکزی، یک روند افزایشی را نشان می‌دهد (شکل ۱۱). نتایج حاصل از داده‌های حفاری نیز مقادیر جابجایی قائم بیشتری را برای مرز فوقانی سازند آسماری در بخش‌های مرکزی میدان نفتی کرنج نسبت به بخش‌های انتهایی و دماغه‌های میدان نشان می‌دهد (Vatandoust, 2019). شاید بتوان لغزش‌های بیشتر گسل پیش‌راندگی در بخش‌های مرکزی میدان نفتی کرنج را در ارتباط با مقادیر بالاتر کوتاه‌شدگی افقی در جهت جبران مقادیر بالاتر واتنش در این بخش‌ها نسبت به سایر نواحی دانست. به عبارت دیگر گسل پیش‌راندگی در جهت جبران مقادیر بالاتر واتنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مرکزی نسبت به سایر بخش‌ها، لغزش و جابجایی بیشتری را در بخش‌های مرکزی میدان از خود بروز داده است. عموماً با توجه به تراکم پهنه‌های شکستگی (Fracture zones) در مناطق با واتنش بالا و اهمیت شناسایی این پهنه‌ها در میدان نفتی، انجام مطالعات اولیه و کم‌هزینه در شناسایی مناطق با واتنش بالا بسیار حائز اهمیت می‌باشد. نتایج تحلیل‌های هندسی و واتنش در میدان نفتی مارون و مقایسه آن با نتایج نقشه‌های تراکم شکستگی حاصل از نمودارهای تصویرگر انطباق بالایی را بین مناطق با شکستگی بالا و مقادیر واتنش بالا نشان می‌دهد (Samani et al, 2024).

مطالعات صورت گرفته جهت بررسی مکانیزم‌های چین‌خوردگی در تکامل تاق‌دیس میدان نفتی کرنج حاکی از آن است که این میدان دارای پیچیدگی‌های ساختاری فراوانی بوده و نمی‌توان یک ساز و کار مشخص و واحد را برای تکامل آن در نظر گرفت. مدل‌های جدایش گسلی، توسعه گسلی، گسلش‌راندگی-پس‌راندگی از مهمترین مکانیزم‌های پیشنهاد شده برای تکامل ساختاری این تاق‌دیس می‌باشند (Azizi et al, 2012; Vatandoust, 2019). با این حال بررسی‌ها و تحلیل الگوی گسلش بر روی مقاطع لرزه‌ای عرضی، حاکی از وجود و عملکرد دو سیستم گسلش در تکامل و خیزش تاق‌دیس کرنج می‌باشد. گسل‌راندگی جنوب غربی (پیش‌راندگی) گسلش غالب و اصلی در این سامانه چین‌خورده بوده که بوسیله گسل شمال شرقی (گسل پس‌راندگی) به عنوان گسلش فرعی همراهی می‌شود. بررسی نقشه‌های پهنه‌بندی درصد کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش نشان می‌دهد که بخش‌های مرکزی تاق‌دیس نسبت به دماغه‌های چین‌مقادیر بالاتری از کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش را نشان می‌دهد. این حقیقت را احتمالاً می‌توان در ارتباط با بالاتر بودن مقادیر لغزش در بخش‌های مرکزی گسل پیش‌راندگی نسبت به بخش‌های انتهایی آن مرتبط دانست. بر اساس نیم رخ‌های زمین‌شناسی تهیه شده از مقاطع لرزه‌ای و با توجه به میزان جابجایی واحدهای سنگی، مقادیر جابجایی حاصل از گسلش در دماغه‌های



شکل ۱۱: نمایش بالاتر بودن مقدار لغزش در بخش‌های مرکزی گسل پیش‌راندگی جهت جبران مقادیر بالاتر کوتاه‌شدگی و نسبت واتنش در تاق‌دیس میدان نفتی کرنج.

Fig. 11: Illustration the higher amounts of slip in the central parts of fore-thrust in order to compensate of greater amounts of shortening and strain ratio in the Karanj anticline oil field.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه با استفاده از مقاطع لرزه‌ای عمود بر محور تاقدیس میدان نفتی کرنج، پارامترهای سبک چین و تغییرات مقادیر نسبت واتنش و مقادیر درصدی کوتاه شدگی در افق آسماری در طول این تاقدیس مورد بررسی قرار گرفت. بررسی الگوی هندسی چین نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج در امتداد محور خود هندسه یکسانی ندارد. بر اساس هندسه سطح محوری، تاقدیس کرنج در گروه تاقدیس‌های نامتقارن قرار می‌گیرد. مقادیر زاویه بین یالی (۷۴ تا ۱۴۰ درجه) نشان می‌دهد که تاقدیس کرنج در محدوده چین‌های ملایم (Gentle) تا باز (Open) قرار دارد. بر اساس مقادیر بدست آمده برای پارامتر تیزی چین (۰/۲۲ تا ۰/۶۴) ساختار تاقدیس در محدوده چین‌های تقریباً زاویه دار (Subangular) تا تقریباً مدور (Subrounded) قرار می‌گیرد. مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس کرنج در محدوده ۰/۱۵ تا ۰/۴۴ تعیین گردید. بر این اساس هندسه کلی تاقدیس کرنج در گروه چین‌های وسیع (Broad) تا پهن (wide) قرار می‌گیرد. براساس مقادیر انحنای سطوح چین خورده در حد فاصل نقاط لولا و عطف چین، تاقدیس کرنج طبق تقسیم‌بندی فوریه در محدوده چین‌های سینوسی تا پارابولیک قرار داشته و با توجه به انحنای تقریباً برابر سطوح چین خورده و یکنواختی ضخامت حقیقی لایه چین خورده در گروه چین‌های کلاس 1B قرار می‌گیرد. با توجه به اهمیت هندسه و مکانیزم تکامل چین در میادین نفتی تاقدیسی و به ویژه شناخت مناطق با مقادیر واتنش بالا و احتمالاً با تراکم شکستگی بیشتر بتوان مناطق مناسب

حفاری در جهت توسعه میادین را با هزینه کمتری شناسایی نمود. همچنین به واسطه اهمیت شناخت ویژگی‌های سنگ مخزن میادین نفتی از منظر تعیین مناطق با واتنش و تراکم شکستگی بالا و با توجه به هزینه بالا و زمان‌بر بودن انجام برخی روش‌های تخصصی همچون به کارگیری نمودارهای تصویرگر، استفاده از ویژگی‌های هندسی چین‌ها در شناخت سریع و کم هزینه مناطق مستعد بسیار راهگشا خواهد بود. تحلیل‌های واتنش و کوتاه‌شدگی در تاقدیس کرنج نشان دهنده مقادیر متفاوت نسبت واتنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مختلف این تاقدیس می‌باشد. مقادیر نسبت واتنش بین ۱/۲۵ تا ۱/۴۵ و مقادیر درصدی کوتاه‌شدگی بین ۷/۵ تا ۳۲ درصد در طول تاقدیس کرنج می‌باشد. مقادیر نسبت واتنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مرکزی تاقدیس مقادیر بیشتری را نسبت به بخش‌های شمالی و جنوبی نشان می‌دهد. مهمترین عامل در مقادیر متفاوت نسبت واتنش و مقادیر کوتاه‌شدگی در بخش‌های مختلف میدان نفتی کرنج را می‌توان در ارتباط با میزان لغزش متفاوت بر روی سطوح گسلی مرتبط با توسعه تاقدیس در نظر گرفت.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت‌های صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG1402.341) کمال تشکر و قدردانی به عمل می‌آید.

References

- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran, and its proforeland evolution. *American Journal of Science*, v. 304, p.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*, v. 307, p. 1064-1095.
- Aller, J., Bastida, F., Toimil, N.C. and Bobillo-Ares, N.C., 2004. The use of conic sections for the geometrical analysis of folded surface profiles. *Tectonophysics*, v. 379, p. 239-254.
- Azizi, E., Khatib, M.M. and Ghorbani Ghashgaei, A., 2012. Analysis of a fault-related folding a blind fault in karanj oil field. *Iranian Geology Journal*, v. 18, p. 31-40.
- Bastida, F., Aller, J., Bobillo-Ares, N.C. and Toimil, N.C., 2005. Fold geometry: a basis for their kinematical analysis. *Earth Science Reviews*, v. 70, p. 129e164.
- Bastida, F., Aller, J., Toimil, N.C., Lisle, R.J. and Bobillo-Ares, N.C., 2007. Some considerations on the kinematics of chevron folds. *Journal of Structural Geology*, v. 29, p. 1185-1200.
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics, *Tectonophysics*, v. 241, p. 193-224.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, v. 18, p. 210-265.
- Blance, E.J.P., Allen, M.B., Inger, S. and Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros Simple Folded Zone, Iran. *J. Geol. Soc.*, v. 160, p. 401-412. doi:10.1144/0016-764902-110.

- Bordenave, M.L. and Hegre, J.A., 2005. The influence of tectonics on the entrapment of oil in the Dezful Embayment, Zagros Foldbelt, Iran. *Journal of petroleum geology*, v. 28(4), p. 339-368.
- Bredden, H., 1956. Die tektonische Deformation der Fossilien im Rheinischen Schiefergebirge. *Zeitschrift Deutsche Geologische Gesellschaft*, v. 106, p. 227-305.
- Dixon, J.M. and Liu, S., 1992. Centrifuge modelling of the propagation of thrust faults. In: McClay, K.R. (Ed.), *Thrust Tectonics*. Chapman & Hall, London, p. 53e69.
- Espurt, N., Hippolyte, J.C., Sillard, M. and Bellier, O., 2012. Geometry and kinematic evolution of a long-living foreland structure inferred from field data and cross section balancing, the Sainte-Victoire System, Provence, France. *Tectonics*, v. 31, TC4021, doi: 10.1029/2011TC002988.
- Faghih, A., Dehghan, M. and Sobhani, S.S., 2023. Study of deformation pattern and kinematic characteristics in the Gelmandeh metamorphic complex, Saghand region, Central Iran. *Advanced Applied Geology*, v. 12(4), p. 617-634.
- Falcon, N.L., 1974. Problems of the relationship between surface structures and deep displacements illustrated by the Zagros range. *Geological Society of London. Spec. Pub.*, v. 3, p. 9-22.
- Fergusson, C., Nutman, A., Mohajjel, M. and Bennett, V.C., 2016. The Sanandaj-Sirjan Zone in the Neo-Tethyansuture, western Iran: Zircon U-Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis, *Gondwana Research*, v. 58, p. 216-238.
- Frehner, M.D. and Grasemann, B., 2012. Mechanical versus kinematical shortening reconstructions of the Zagros High Folded Zone (Kurdistan region of Iraq), *Tectonics*, v. 31, TC3002, doi:10.1029/2011TC003010.
- Fry, N., 1979. Random point distribution and strain measurements in rocks. *Tectonophysics* 60:89-105.
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology*, Cambridge University Press.
- Jeng, F.S., Lai, Y.C. and Teng, M.H., 2002. Influence of strain rate on buckle folding of an elasto-viscous single layer. *Journal of Structural Geology*, v. 24, p. 501-516.
- Ghassemi, M.R., Schmalholz, S.M. and Ghassemi, A.R., 2010. Kinematics of constant arc length folding for different fold shapes. *Journal of Structural Geology*, v. 32, 755e765.
- Imber, J., Perry, T., Jones, R. and Wightman, Rh., 2012. Do cataclastic deformation bands form parallel to lines of no finite elongation (LNFE) or zero extension direction? *Journal of Structural Geology*, v. 45, p. 158-172.
- Keshavarz, S. and Faghih, F., 2020. Heterogeneous sub-simple deformation in the Gol-e-Gohar shear zone (Zagros, SW Iran): insights from microstructural and crystal fabric analyses. *Int. J. Earth Sci.*, v. 109, p. 421-438. DOI: 10.1007/s00531-019-01812-9.
- Keshavarz, S., Faghih, A., Shahpasandzadeh, M. and Zarei, S., 2018. Steady state deformation in the shear zones of the Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Neyriz region, *Journal of Tectonics*, v. 2(5), p. 97-109.
- Keshavarz, S., Faghih, A., Asadi, S., Soleimani, M. and Zarei, S., 2024. PT conditions of deformation of the Gol-e-Gohar shear Zone, SW Iran: Insights from analysis of quartz c-axis fabrics, recrystallization mechanisms and syndeformational fluid inclusions. *Journal of Asian Earth Sciences*, v. 262, 106010.
- Lopez-Mir, B., 2019. Cross section construction and balancing: example from the Spanish Pyrenees, *Development in Structural Geology and Tectonics*, v. 5, p. 3-23.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, v. 26, p. 519-535.
- Mohajjel, M. and Fergusson, C.L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran, *Journal of Structural Geology*, v. 22, p. 1125-139.
- Molinaro, M., Zeyen, H. and Laurencin, X., 2005. Lithospheric structure beneath the southeastern Zagros Mountains, Iran: Recent slab break-off? *Terra Nova*, v. 17, p. 1-6. doi:10.1111/j.1365-3121.2004.00575.x.
- 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*, v. 14, p. 1-19.
- Ramsay, J.G. and Hubber, M.I., 1983. *The techniques of modern structural geology, 1: strain analysis*. Academic Press, London.
- Rez, J., 2015. Statect software, www.eltekto.cz.
- Sadeghi, S. and Yassaghi, A., 2016. Spatial evolution of Zagros collision zone in Kurdistan, NW Iran: constraints on Arabia-Eurasia oblique convergence. *Solid Earth*, v. 7, p. 659-672, doi: 10.5194/se-7-659-2016.
- Saedi, G., Soleimani, B., Samani, B. and Arzani, A., 2022. The interaction between faults and in-situ stress on the kinematic and subsurface natural fracture of Aghajari oilfield in southwest of Iran. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, v. 208, 109567.
- Samani, B., 2017. Deformation flow analysis and symmetry of Goushti shear zone, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. *Geopersia*, v. 7, p. 117-130.
- Samani, B., 2013. Quartz c-axis evidence for deformation characteristics in the Sanandaj-

- Sirjan metamorphic belt, Iran, *Journal of African Earth Sciences*, v. 81, p. 28-34.
- Samani, B., Tahmasebi, L., Charchi, A. and Talebi, H., 2024. Strain and shortening variations along the Maroon anticline oil field, Khuzestan province, *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, v. 34, p. 87-98 (In Persian).
- Sarkarinejad, K. and Azizi, A., 2008. Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran. *Journal of Structural Geology*, v. 30, p. 116-136.
- Sarkarinejad, K., Keshavarz, S., Fafghih, A. and Samani, B., 2017. Kinematic analysis of rock flow and deformation temperature of the Sirjan thrust sheet, Zagros Orogen, Iran. *Geological Magazine*, v. 154, p. 147-165.
- Schmalholz, S.M., 2006. Scaled amplification equation: a key to the folding history of buckled viscous single-layers, *Tectonophysics*, v. 419, p. 41-53.
- Sepehr, M., Cosgrove, J. and Moinei, M., 2006. The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt, *Tectonophysics*, v. 427(1-4), p. 265-281.
- Sherkati, S., Letouzey, J. and Frizon de Lamotte, D., 2006. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): new insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling. *Tectonics*, v. 25, TC4007. doi:10.1029/2004TC001766.
- 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. *Journal of Structural Geology*, v. 27, p. 1680-1696.
- Soleimani, M., Faghieh, A., Bagherpour, B., Adibinejad, M. and Sobhani, S.S., 2023. Deformation microthermometry in the Toutak gneiss dome based on petrofabric characteristics of quartz crystal, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran, *Advanced Applied Geology* (In Press).
- Soleimani, M., Faghieh, A. and Kusky, T., 2021. Mesozoic compressional to extensional tectonics in the Central East Iranian Microcontinent: evidence from the Boneh Shurow metamorphic core complex, *Journal of the Geological Society*, v. 178(6), jgs2020-123.
- Stabler, C.L., 1968. Simplified Fourier analysis of fold shapes, *Tectonophysics*, v. 6, p. 343-350.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, a review, *A. A. P. G. Bull.*, v. 52(7), p. 1229-1258.
- Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature*, v. 235, p. 147-150.
- Talebian, M. and Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysics*, v. 156, p. 506-526.
- Teysier, C., 1985. A crustal thrust system in an intracratonic tectonic environment. *Journal of Structural Geology*, v. 7(6), p. 689-700.
- Vatandoust, M., Faghieh, A. and Asadi, S., 2019. Study of Tectonic Events and Their Role on Characteristics of Hydrocarbon Reservoirs in the Karanj, Paranj and Parsi Oilfields Using Subsurface and Fluid Inclusion Data, PhD thesis, Shiraz University.
- Vernant, P. and Chery, J., 2006. Mechanical modeling of oblique convergence in the Zagros, Iran, *Geophysics*, v. 165, p. 991-1002.