

Original Research Paper

Strain and shortening variations along the Maroon anticline oil field, Khuzestan province

Babak Samani^{1*}, Ladan Tahmasebi¹, Abbas Charchi¹, and Hossein Talebi²

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

² National Iranian South Oil Company, Ahvaz, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2024 May 17

Accepted: 2024 November 24

Available online: 2024 December 21

Keywords:

Dezful embayment

Maroon oil field

Shear strain

Strain ratio

Shortening

ABSTRACT

The Maroon Oil Field is one of the largest oil fields in the Zagros basin located in the eastern part of the Dezful embayment, adjacent to Aghajari, Ahvaz and Kupal oil fields. In this research, the Asmari folded horizon was investigated and with application of interpreted seismic sections, the interlimb angle and axial surface geometry were determined in different sections. Based on the inclination angle of axial surface and using graphical functions, the amounts of shear strain, anticline aspect ratio, strain ratio and shortening values were determined in different parts of the Maroon oil field anticline. Shear strain, strain ratio and shortening zoning maps were prepared along the anticline. Based on the results, the shear strain values vary from 0.15 in the central part and the curvature of the anticline axis to 0.01 in the anticline noses. Also, the results show the shortening values between 2% to 20% and strain ratio values in the range of 1.35 to 1.07 in different parts of the anticline.

1. Introduction

The topic of strain analysis in natural deformed areas is one of the most important subjects for understanding the strain pattern 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 Rf/Φ method (Ramsay and


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

Citation:

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, 34(4), 134, 87-98. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.458043.2142>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2024.458043.2142

 dor: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.6.6



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

Hubber, 1983), Fry method (Fry, 1979), Bridin method, Wellman method, and the method of preparing balanced cross sections are the most common methods of strain studies, which are used by Structural geologist in different natural deformed areas. Conducting strain studies in three dimensions and understanding the three-dimensional nature of strain requires proper data of different planes of the strain ellipsoid. 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 deferent graphical functions is very important in many strain studies. Since the use of some mathematical functions is very difficult, 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). So far, several studies have been conducted to estimate the amount of shortening in different orogeny belts over the world. In these studies, different methods have been used, such as the use of balanced cross-sections, the use of different strain markers in the microscopic and mesoscopic scales. In this research, using perpendicular seismic sections to the axis of the Maroon anticline oil field, the analyses of the fold style, strain and shortening values in different parts of this structure has been done.

2. Research methodology

In this research, using interpreted seismic sections (ten seismic sections), some parameters of the folding style in the Maroon anticline oil field have been investigated. In different section, the characteristics of the interlimb angle and the geometry of the axial surface were determined using stereographic analysis. Using the values of the deviation angle of the axial surface from the vertical surface, the values of shear angle and shear strain along the oil field were determined and the zoning map of these parameters was prepared. By applying the values of the interlimb angle and by using graphical functions, the fold aspect ratio of the Maroon 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 during different parts of anticline.

3. Discussions

The Maroon subsurface anticline has an approximate length of 70 km and a width of 10 km, and the maximum height of the fold at the hinge location is -2300 meters. The true thickness of the Asmari formation has been measured at about 450 meters. 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 Maroon

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 sharpness 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 (Twiss and Moores, 2007). According to the results, the Maroon anticline with the value of $b=0.43$ to $b=0.65$ is part of the semi-circular folds. The dip of Asmari horizon indicates a decrease in the slope of the folded layers from the limbs towards the fold hinge. The slope of the layers in the limbs is around 35 to 40 degrees and in the fold hinge it decreases to 5 to zero degrees. According to the dip direction map of the Asmari horizon, the average direction of the layers in the northern limb has an azimuth of 50 degrees and the average direction of the layers in the southern limb has an azimuth of 230 degrees. 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 Maroon anticline were determined in the range of 0.1 to 0.35. Based on these amounts, the general geometry of the Maroon anticline is placed in the group of broad to wide folds. In this research, an approach was taken to determine the shear angle (Ψ) and shear strain (γ) by using the amount of the axial surface inclination from the vertical plane in different sections of the Maroon anticline. Based on the asymmetry of the axial surface, and the inclination degree of the axial surface from the vertical plane, the values of the shear angle and shear strain were calculated along the Maroon anticline.

In order to determine the amount of shortening and the strain ratio in folded layers, 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).

$$p = 0.5(1/(1+e)^2 - 1)0.5 \quad (1)$$

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).

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

$$R2 = \lambda 1 / \lambda 3 \quad (3)$$

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).

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

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

$$e = (1/R0.5) - 1 \quad (5)$$

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 Maroon anticline.

4. Results

The results of this research show that the Maroon 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 Maroon 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 interval angles in different parts, the Maroon anticline is mainly can be categorized in the gentle to open folds. Based on the amounts of bluntness the maroon anticline is placed in the sub-rounded folds. According to the dip isogon patterns (Ramzay method) and Fourier analysis the Maroon anticline is categorized in the 1B and Sinusoidal to parabolic folds. Based on the strain analysis the values of the strain ratio and percent of shortening in the central parts of the anticline show higher values than the northern and southern parts.

Considering the importance of oil field reservoir rock studies in

order to determine areas with high strain and density of fractures, therefore, by using the geometric features of subsurface folds, it is possible to make a quick and low-cost diagnosis of prone areas with high fracture density.

5. Conclusion

Based on the geometry studies and strain analyses of the Maroon anticline oil field, the following results were obtained:

- The interlimb angles along the Maroon anticline are vary between 102 to 170 degrees.
- The bluntness values of the Maroon anticline oil field is $0.43 < b < 0.65$ and shows the geometry of sub-rounded fold.
- The fold aspect ratio for the Maroon anticline is between (0.1 to 0.35) and based on these amounts shows the geometry of broad to wide folds.
- Based on the results, the shear strain values vary from 0.15 in the central part and the curvature of the anticline axis to 0.01 in the anticline noses.
- Also, the results show the shortening values between 2% to 20% and strain ratio values in the range of 1.35 to 1.07 in different parts of the anticline.

تغییرات کرنش و کوتاه شدگی در طول تاقدیس میدان نفتی مارون، استان خوزستان

بابک سامانی^{۱*}، لادن طهماسبی^۱، عباس چرچی^۱ و حسین طالبی^۲

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

^۲ شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب، اهواز، ایران

چکیده

میدان نفتی مارون یکی از بزرگ‌ترین میدان‌های نفتی حوضه زاگرس است، که در بخش خاوری منطقه ساختاری فروافتادگی دزفول، در مجاورت میدان نفتی آغاچاری، میدان نفتی اهواز و میدان نفتی کویال قرار دارد. در این پژوهش با استفاده از مقاطع لرزه‌ای تفسیر شده و بررسی سیمای چین‌خورده افق آسماری، مقادیر زاویه بین یالی و هندسه سطح محوری در مقاطع مختلف اندازه‌گیری شد. براساس مقادیر انحراف سطح محوری و با به کارگیری توابع تصویری، مقادیر کرنش برشی، نسبت ابعادی تاقدیس و مقادیر نسبت کرنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مختلف تاقدیس میدان نفتی مارون تعیین گردید. نقشه‌های پهنه‌بندی برای پارامترهای کرنش برشی، نسبت کرنش و کوتاه‌شدگی در طول تاقدیس تهیه شد. براساس نتایج، مقادیر کرنش برشی از ۰/۱۵ در بخش مرکزی و انحنا محور تاقدیس تا ۰/۰۱ در دماغه‌های تاقدیس متغیر است. همچنین نتایج، نشان‌دهنده دامنه تغییرات مقادیر کوتاه‌شدگی بین ۲ تا ۲۰ درصد و مقادیر نسبت کرنش در محدوده ۱/۳۵ تا ۱/۰۷ در بخش‌های مختلف تاقدیس می‌باشد.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۸

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۹/۰۴

تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۱۰/۰۱

کلیدواژه‌ها:

فروافتادگی دزفول

میدان نفتی مارون

کرنش برشی

نسبت کرنش

کوتاه‌شدگی

۱- پیش‌نویس

امری گریزناپذیر خواهد بود. در انجام تحلیل‌های عددی کرنش، یافتن عناصری که بتوان از آن‌ها به‌عنوان نشانگر در اندازه‌گیری کرنش استفاده نمود بسیار اهمیت دارد. تاکنون روش‌های گوناگونی به‌وسیله پژوهشگران مختلف جهت برآورد مقادیر کرنش در سنگ‌های دگرریخت شده ارائه شده است. روش‌هایی همچون روش Rf/Φ (Ramsay and Hubber, 1983)، روش فرای (Fry, 1979)، روش بریدین، روش ولمن و روش تهیه مقاطع عرضی موازنه شده از متداول‌ترین روش‌های مطالعات کرنش می‌باشند که توسط بسیاری از زمین‌شناسان ساختاری در جایگاه‌های مختلف مورد استفاده قرار گرفته است. انجام مطالعات کرنش در سه بعد و فهم کامل ماهیت سه بعدی 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 سه بعدی کرنش از طریق بررسی‌های دو بعدی کرنش توسط پژوهشگران

مبحث تحلیل کرنش در مناطق دگرشکل شده طبیعی یکی از موضوعات با اهمیت جهت فهم چگونگی الگوی کرنش در بخش‌های مختلف پوسته زمین می‌باشد. با استفاده از داده‌های قابل برداشت در صحرا، و به کارگیری روش‌های مختلف در مطالعات کرنش، زمین‌شناسان قادر به اندازه‌گیری مقادیر کمی کرنش در ساختارها و پدیده‌های مختلف زمین‌شناسی خواهند بود. از آنجا که زمین‌شناسان همواره با آخرین محصولات دگرشکلی در پوسته زمین مواجه هستند، از این رو قادر به انجام تحلیل‌های کرنش نهایی (Finite strain) در سیمای ساختاری یا سنگ‌های دگرشکل شده خواهند بود. در مطالعات کرنش نهایی محصول نهایی دگرشکلی مورد بررسی قرار گرفته و مقادیر کمی کرنش در آخرین مرحله دگرشکلی مورد تحلیل قرار خواهد گرفت. در صورتی که زمین‌شناسان نیاز داشته باشند تا تغییرات مقادیر کرنش پیش‌رونده (Incremental Strain) در هر لحظه از زمان در بخش‌های مختلف یک ساختار را مورد بررسی قرار دهند، استفاده از مدل‌سازی‌های آزمایشگاهی و عددی

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

ماخذنگاری:

سامانی، ب.، طهماسبی، ل.، چرچی، ع. و طالبی، ح.، ۱۴۰۳، تغییرات کرنش و کوتاه‌شدگی در طول تاقدیس میدان نفتی مارون، استان خوزستان. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۴(۴)، ۸۷-۹۸. <https://doi.org/10.22071/gsj.2024.458043.2142>

doi: 10.22071/gsj.2024.458043.2142

doi: 20.1001.1.10237429.1403.34.4.6.6

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



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

شامل سه بخش اصلی: کمربند ماگمایی ارومیه دختر، کمربند دگرگونی سنندج-سیرجان، و کمربند چین و رانده زاگرس با روند عمومی شمال باختر- جنوب خاور می باشد (Mohajjel and Fergossen, 2000; McQuarrie, 2004). ستون چینه‌شناسی زاگرس حدوداً شامل ۱۲ کیلومتر واحدهای سنگی فانروزویک بوده که بر روی پی‌سنگ پرکامبرین قرار گرفته است (Alavi, 2003; Falcon, 1974; Blance et al., 2003). این واحدهای سنگی تاریخچه پیچیده زمین‌ساختی 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; Faghih et al., 2023). کمربند چین و راندگی زاگرس یک پهنه ترفشارشی (transpression) است که در اثر برخورد بین صفحه سنگ کره‌ای آفریقا-عربی و خرد قاره ایران مرکزی با زاویه‌ای حدود ۲۵ درجه ایجاد شده است (Sarkarinejad and Azizi, 2008). این همگرایی در قسمت جنوب خاور تقریباً عمودی بوده و در قسمت شمال باختر از تمایل بیشتری برخوردار می‌باشد (Teyssier, 2004; Talebian and Jackson, 1985). بربریان (Berberian, 1995) 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. محدوده مطالعاتی در پهنه ساختاری فروافتادگی دزفول واقع شده است. منطقه فروافتادگی دزفول یک جلوه ساختمانی در بخش جنوب باختری راندگی زاگرس می‌باشد که به دلیل پوشانده شدن سنگ آهک الیگوسن-میوسن آسماری توسط تبخیری‌های میوسن گچساران، دارنده بیشتر میادین نفتی ایران است. در ابتدا این نام گویای یک خاصیت توپوگرافیک می‌باشد، ولی به طور کلی تر به منطقه‌ای از حوضه زاگرس اطلاق می‌گردد که در آن سازند آسماری فاقد رخنمون بوده (به استثنای سازند آسماری در تاقدیس آسماری) و به وسیله ضخامت فزونی یافته نهشته‌های دوره ترشیری نسبت به نواحی فارس و لرستان مشخص می‌گردد (Alavi, 2004). می‌توان فروافتادگی دزفول را هسته قطعه‌ای از ورقه عربی در نظر گرفت که تحت تاثیر برخورد با صفحه ایران به جنوب باختری ایران فشرده شده است (Alavi, 2004; Saedi et al., 2022). ساختارهای موجود در فروافتادگی دزفول به طور شایان توجهی چین‌خوردگی‌های ملایم‌تری را نسبت به ساختارهای بخش‌های شمالی و زاگرس چین‌خورده نشان می‌دهند (Sherkati et al., 2006). این منطقه حداقل دارای ۴۵ میدان نفتی تاقدیسی با بیش از ۳۶۰ میلیارد بشکه نفت درجا، معادل هشت درصد ذخایر نفت جهان است (Mouthereau et al., 2012). سامانه لایه‌بندی در این میدان‌های تاقدیسی دارای شکستگی‌های فراوان بوده که موجب افزایش کیفیت مخزنی شده است (Ahmadhadi et al., 2008). اصلی‌ترین مخازن در این بخش شامل کربنات‌های الیگومیوسن آسماری و آهک‌های کرتاسه میانی گروه بنگستان و ژوراسیک-کرتاسه گروه خامی هستند (Ahmadhadi et al., 2008; Jahani et al., 2007; Saedi et al., 2022). استان خوزستان از لحاظ تقسیمات ساختاری از جنوب باختر به شمال خاور شامل زیر پهنه‌های: پیش حوضه خلیج فارس- میانرودان (مزوپوتیمین)، دشت‌های ساحلی، فروافتادگی دزفول و کمربند چین‌خورده ساده زاگرس می‌باشد. میدان نفتی مارون با موقعیت جغرافیایی ۲۹° ۳۰ تا ۲۱° ۳۱ عرض شمالی و ۵۸° ۴۸ تا ۳۲° ۴۹ طول خاوری در ۶۰ کیلومتری جنوب خاوری شهرستان اهواز در مجاورت میدان نفتی آغاچاری، میدان نفتی اهواز و میدان نفتی کویال قرار دارد (شکل ۱).

۲- روش پژوهش

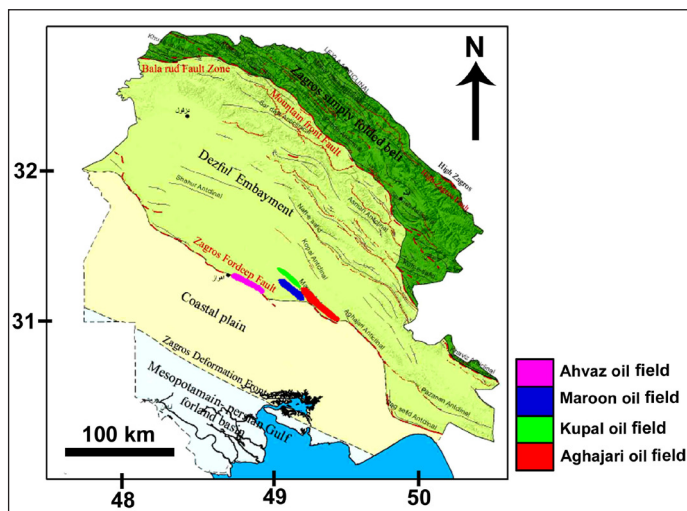
در این پژوهش با استفاده از مقاطع لرزه‌ای تفسیر شده عرضی (ده مقطع لرزه‌ای) به بررسی برخی از پارامترهای سبک چین‌خوردگی در میدان نفتی تاقدیسی مارون پرداخته شده است. در مقاطع مختلف ویژگی‌های زاویه بین یالی و هندسه سطح

مختلف ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983). در مطالعات تحلیل کرنش، استفاده از توابع ریاضی امری متداول جهت برآورد مقادیر عددی کرنش 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 توابع تصویری (Nomograms) به عنوان روشی سریع و ساده در تحلیل‌های کرنش مورد استفاده بسیاری از پژوهشگران زمین‌شناسی قرار گرفته است (Ramsay and Hubber, 1983; Imber et al., 2012; Fossen, 2016; Sarkarinrad et al., 2017; Keshavarz and Faghih, 2020). وجود دگرشکلی‌های گوناگون و همچنین کمبود داده‌های زیرسطحی، محاسبات مربوط به مطالعات کرنش را دچار چالش خواهد نمود. با این وجود در بسیاری موارد می‌توان با استفاده از نشانگرهای مختلف و برخی ساختارهای سطحی، مقادیر کرنش را محاسبه نمود. تاکنون مطالعات متعددی جهت برآورد میزان کوتاه‌شدگی در کوهزادهای مختلف، در سرتاسر جهان صورت پذیرفته است. در این مطالعات، از روش‌های مختلفی همچون استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده، استفاده از نشانگرهای مختلف کرنش در مقیاس میکروسکوپی همچون کانی‌های دگرشکل شده کوارتز در پهنه‌های برشی و استفاده از نشانگرهای مزوسکوپی (متوسط مقیاس) همچون قله‌های دگرشکل شده کنگلومرا استفاده شده است. تیسیر (Teyssire, 1985) با استفاده از مقاطع عرضی متعادل شده در کمربند راندگی بین کراتونی مرکز استرالیا میزان ۵۰ تا ۷۰ درصد کوتاه‌شدگی برای این منطقه تعیین نمود. براون و همکاران (Brown et al., 1997) در مطالعات صورت گرفته در کمربند چین-راندگی پیش بوم جنوب اورال مقدار کوتاه‌شدگی را معادل ۱۷ درصد محاسبه نمودند. اسپرت و همکاران (Espurt et al., 2012) در مطالعات صورت گرفته در ناحیه خارجی پیش‌بوم کوهزاد پیرنه میزان کوتاه‌شدگی را ۲۵ تا ۳۴ درصد تعیین نمودند. در مطالعات صورت گرفته در پهنه زاگرس مرتفع و کمربند چین‌خورده-گسلی کردستان عراق، میزان کوتاه‌شدگی حدود ۱۱ تا ۱۵ درصد برآورد گردید (Frehner and Grasemann, 2012). مطالعات انجام شده بر روی تاقدیس‌های بخیر و قره‌چوق در عراق میزان کوتاه‌شدگی را به ترتیب ۲۶/۱ و ۱۸/۷ درصد نشان می‌دهد (AL-Azzawi, 2008). در ناحیه زاگرس لرستان، میزان کوتاه‌شدگی در حدود ۲۵ درصد برآورد شده است (Blance et al., 2003). در ناحیه فروافتادگی دزفول و پهنه ایده میزان کوتاه‌شدگی ۱۳ درصد برآورد گردید (Sherkati et al., 2005). در ناحیه کمربند زاگرس چین‌خورده ساده (در شمال بندرعباس) مقادیر کوتاه‌شدگی معادل ۲۲ درصد محاسبه شد (Molinario et al., 2005). در کمربند چین‌خورده - رانده زاگرس کمینه کوتاه‌شدگی با استفاده از بررسی مقاطع عرضی موازنه شده بین ۱۶ تا ۳۰ درصد تعیین گردید (Alavi, 2007). تعیین مقادیر کوتاه‌شدگی با استفاده از مقاطع عرضی موازنه شده دارای محدودیت‌هایی است که ممکن است مقادیر محاسبه کوتاه‌شدگی مقادیری واقعی نباشند (Frehner and Grasemann, 2012). تهیه مقاطع عرضی موازنه شده مستلزم تهیه نمرخ‌های زمین‌شناسی 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 کرنش پیکری در لایه‌های دگرشکل شده را نداشته و از این رو می‌توان اذعان داشت که مقادیر کوتاه‌شدگی محاسبه شده از طریق ترسیم مقاطع موازنه شده همواره نشان‌دهنده مقادیر کمینه کوتاه‌شدگی می‌باشد (McQuarrie, 2004; Frehner and Grasemann, 2012). در این مطالعه با استفاده از مقاطع لرزه‌ای عمود بر محور تاقدیس میدان نفتی مارون به تحلیل سبک چین‌خوردگی و تحلیل مقادیر کرنش و کوتاه‌شدگی در بخش‌های مختلف این ساختار تاقدیسی پرداخته شده است. در این تحقیق جهت برآورد مقادیر کرنش از توابع تصویری ارائه شده در تحلیل ساختارهای چین‌خورده بهره گرفته شده است.

زاگرس یک منطقه دگرشکل شده خطی است (Stocklin, 1968; Berberian, 2004) که در راستای شمال خاور به جنوب باختر

ابعادی-کوتاه شدگی و کوتاه شدگی-نسبت کرنش، مقادیر کوتاه شدگی و نسبت کرنش در طول مقاطع مختلف لرزه ای برآورد شد. در این پژوهش فرض بر این است که کوتاه شدگی عموماً در ارتباط با فرایندهای چین خوردگی بوده و فرایندهای گسلس نقش اندکی در کوتاه شدگی منطقه ای داشته و مقادیر کوتاه شدگی پیش از چین خوردگی و کوتاه شدگی پیکری ناچیز است.

محوری با استفاده از تحلیل های استریوگرافی تعیین گردید و با استفاده از مقادیر زاویه انحراف سطح محوری از سطح قائم مقادیر زاویه برشی و کرنش برشی در طول ساختار میدان تعیین و نقشه پهنه بندی این پارامترها تهیه شد. با به کارگیری مقادیر زاویه بین یالی و با استفاده از توابع تصویری، نسبت ابعادی ساختار تاقدیسی مارون در بخش های مختلف محاسبه گردید. همچنین با استفاده از توابع دوتایی نسبت



شکل ۱- نقشه تقسیمات ساختاری استان خوزستان و موقعیت میدان نفتی مارون.

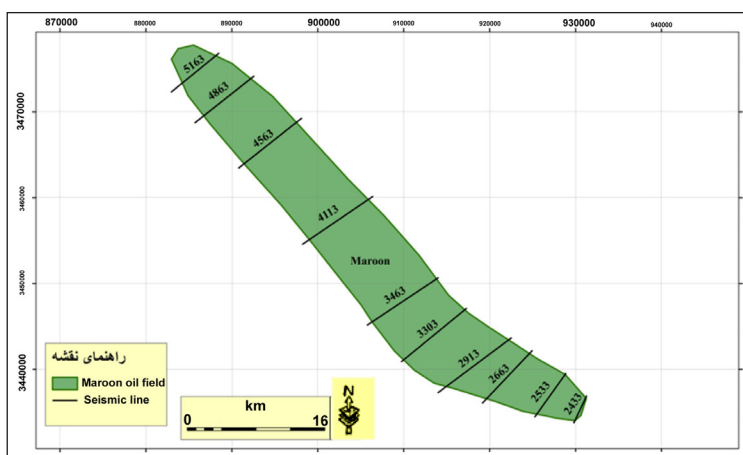
Figure 1. Structural divided map of Khuzestan province and location of Maroon oil field

(ratio)، تنگی (Tightness) و تیزی (Bluntness) می باشد. با استفاده از مقاطع لرزه ای به تفسیر هندسی و تعیین برخی عناصر سبک چین خوردگی در ساختمان این تاقدیس زیر سطحی پرداخته شده است. در این پژوهش از ۱۰ مقطع لرزه ای عرضی جهت بررسی های هندسی و تحلیل های کرنش استفاده شده است. شکل ۲ موقعیت و راستای مقاطع لرزه ای تهیه شده از میدان نفتی مارون را نشان می دهد.

۳- داده ها و اطلاعات

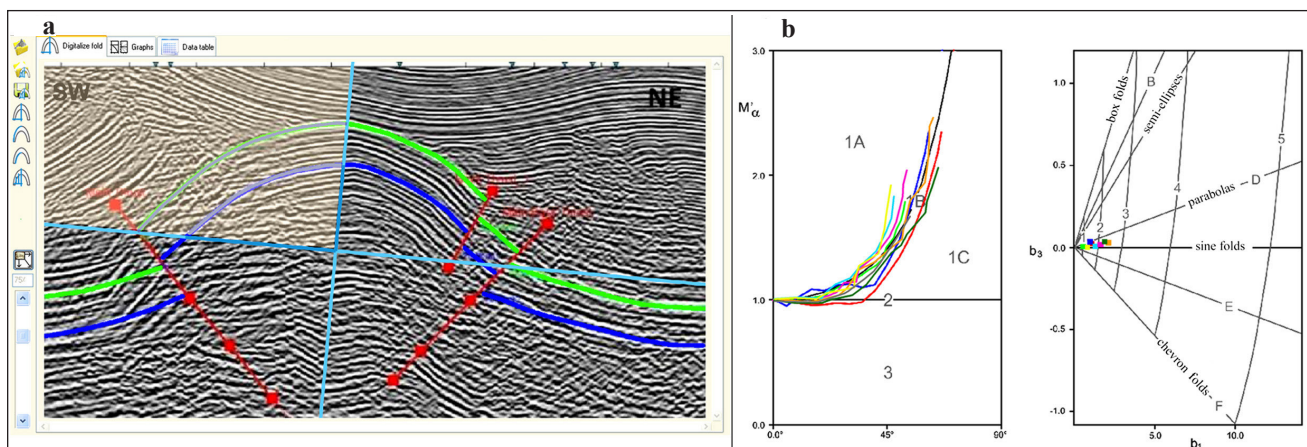
۳-۱- سبک چین خوردگی و ساختار تاقدیس مارون

تاقدیس زیر سطحی مارون دارای طول تقریبی ۷۰ کیلومتر و عرض ۱۰ کیلومتر بوده و بیشینه ارتفاع چین در محل لولای چین برابر با ۲۳۰۰ متر می باشد. سبک برای واقعی سازند آسماری در حدود ۴۵۰ متر اندازه گیری شده است (Ahmadhadi et al., 2008). عناصر سبک چین خوردگی شامل پارامترهایی همچون میزان استوانه ای بودن (Cylindricity)، تقارن (Asymmetry)، نسبت ابعادی (Aspect)



تاقدیس مارون یک تاقدیس نامتقارن با تمایل اندک به سمت جنوب باختری می باشد. تحلیل ها بر اساس مقدار انحنا سطح چین خورده در حد فاصل نقاط لولا و عطف چین نشان می دهد که تاقدیس مارون بر اساس تقسیم بندی فوریه در محدوده چین های سینوسی تا پارابولیک قرار داشته و با توجه به انحنا تقریباً برابر سطوح چین خورده و یکنواختی ستبرای حقیقی لایه چین خورده در گروه چین های کلاس 1B قرار می گیرد. شکل ۳-ا تحلیل صورت گرفته در راستای مقطع لرزه ای

۲۹۱۳ توسط نرم افزار Sta Tect و شکل ۳-ب نتایج تحلیل های صورت گرفته برای تعداد ۱۰ مقطع لرزه ای از تاقدیس زیرسطحی میدان مارون را نشان می دهد. پارامتر تیزی چین بر اساس نسبت شعاع انحنا در محل بستگی چین (Fold closure) به شعاع انحنا مماس بر یال های چین در نقاط عطف چین اندازه گیری می شود (Twiss and Moores, 2007). بر اساس مطالعات انجام شده تاقدیس مارون با دارا بودن مقدار $b=0.43$ تا $b=0.65$ جزو چین های نیمه مدور می باشد.

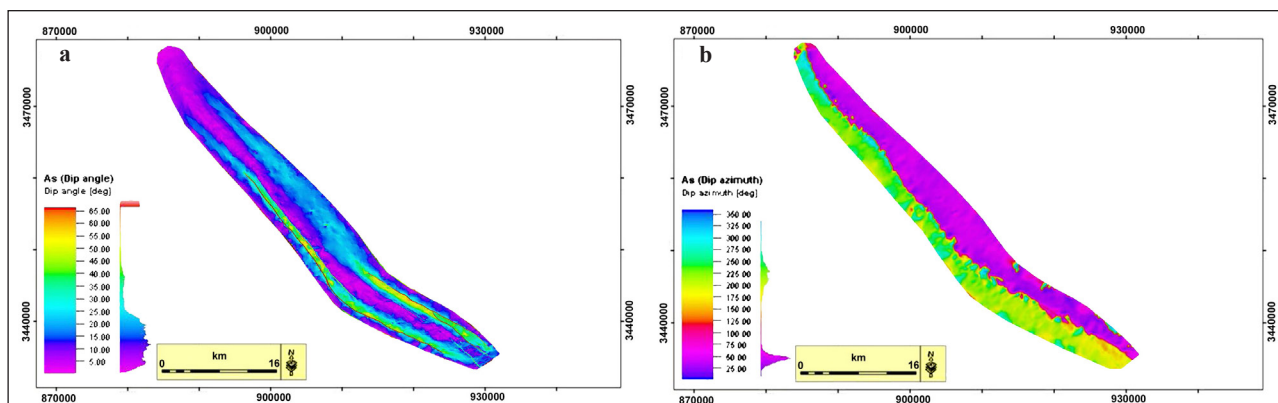


شکل ۳- ا) تحلیل سطح چین خورده افق آسماری در مقطع لرزه ای ۲۹۱۳. ب) تحلیل فوریه و رمزی در مقاطع لرزه ای عمود بر محور تاقدیس مارون.

Figure 3- a) Analysis of Asmari folded horizon in the 2913 seismic profile. b) Fourier and Ramsay analyses in the seismic profiles normal to the Maroon anticline axis.

جهت شیب لایه ها در افق آسماری، میانگین جهت شیب لایه ها در یال شمالی دارای آزیموت ۵۰ درجه و میانگین جهت شیب لایه ها در یال جنوبی دارای آزیموت ۲۳۰ درجه می باشد (شکل ۴-ب).

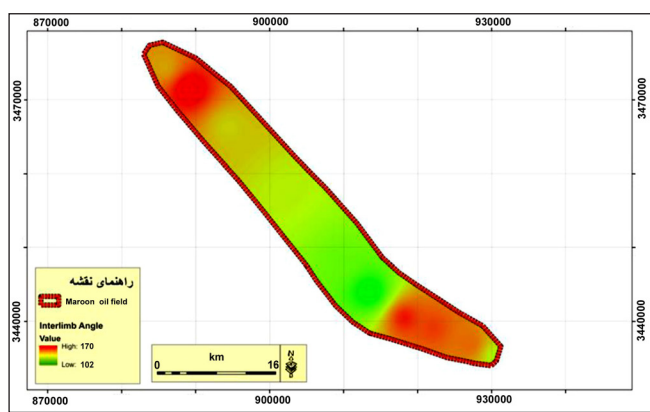
نقشه هم شیب افق آسماری گویای کاهش شیب لایه های چین خورده از یال ها به سمت لولای چین می باشد. شیب لایه ها در یال ها در حدود ۳۵ تا ۴۰ درجه بوده و در لولای چین با کاهش به ۵ تا صفر درجه می رسد (شکل ۴-ا). بر اساس نقشه



شکل ۴- ا) مقادیر شیب لایه بندی در افق آسماری، ب) مقادیر راستای جهت شیب لایه بندی در افق آسماری.

Figure 4- a) The amounts of layering dip in the Asmari horizon, b) The amounts of dip direction of layering in the Asmari horizon.

اندازه گیری زاویه بین یالی در بخش های مختلف افق آسماری نشان می دهد که یک چین با تنگی اندک بوده و در گروه چین های ملایم تا باز قرار می گیرد. پهنه بندی تاقدیس مارون بر اساس زاویه بین یالی نشان می دهد که بخش های مرکزی نسبت به دماغه های چین دارای زاویه بین یالی کمتری می باشد (شکل ۶).



شکل ۶- نقشه پهنه بندی تاقدیس میدان نفتی مارون بر اساس زاویه بین یالی.

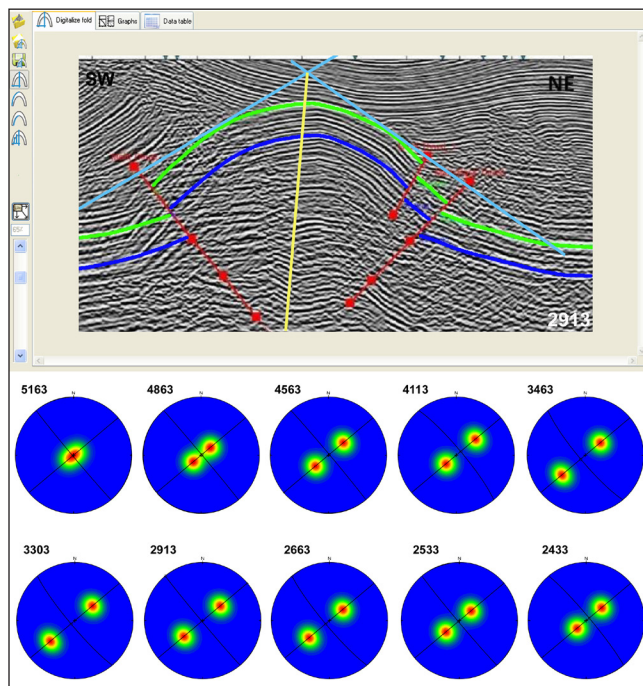
Figure 6. Zoning map of the Maroon anticline oil field, based on the interlimb angle.

می باشد. با استفاده از تحلیل ریاضی زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین خوردگی های مختلف، توابع تصویری جهت تعیین مقادیر نسبت ابعادی چین برای چین های جناغی، سینوسی و پارابولیک ارائه گردیده است. با استفاده از مقادیر زاویه بین یالی و با به کارگیری تابع تصویری زاویه بین یالی-نسبت ابعادی چین (شکل ۷)، مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس مارون در محدوده ۰/۱ تا ۰/۳۵ تعیین گردید. بر این اساس هندسه کلی تاقدیس مارون در گروه چین های وسیع تا پهن قرار می گیرد.

شکل ۷- تعیین مقادیر نسبت ابعادی تاقدیس مارون با استفاده از مقادیر زوایای بین یالی با به کارگیری تابع تصویری (Ghassemi et al., 2010).

Figure 7. Determination of the Maroon anticline aspect ratio using the amounts of interlimb angle with application of graphical function (Ghassemi et al., 2010).

با استفاده از مقاطع لرزه ای و تعیین خطوط مماس بر سطح چین خورده در افق آسماری مقادیر زاویه بین یالی و موقعیت سطح محوری چین حاصل گردید. شکل ۵ اندازه گیری زاویه بین یالی در مقطع لرزه ای ۲۹۱۳ و ترسیم استریوگرافی وضعیت لایه بندی و سطح محوری چین در راستای مقاطع لرزه ای را نشان می دهد.



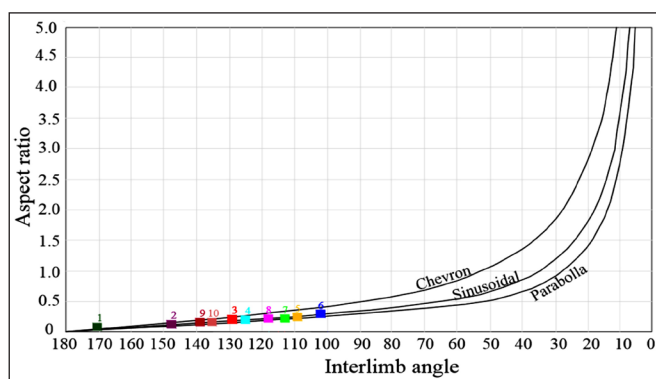
شکل ۵- تعیین مقادیر زاویه بین یالی و استریوگراف مشخصات هندسی صفحه محوری در مقاطع لرزه ای مختلف در امتداد محور تاقدیس.

Figure 5. Determination of interlimb angle amounts and the stereography of axial surface geometry properties in the deferent seismic profiles.

قاسمی و همکاران (Ghassemi et al., 2010) با استفاده از بررسی هندسی اشکال سطوح چین خورده به تحلیل ریاضی پارامترهای زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین ها پرداختند. به عنوان مثال در چین های جناغی رابطه ریاضی بین زاویه بین یالی و نسبت ابعادی چین به صورت رابطه زیر می باشد:

$$i = 2arctan1/2p$$

در این رابطه i زاویه بین یالی و p نسبت ابعادی چین (نسبت دامنه به نصف طول موج)

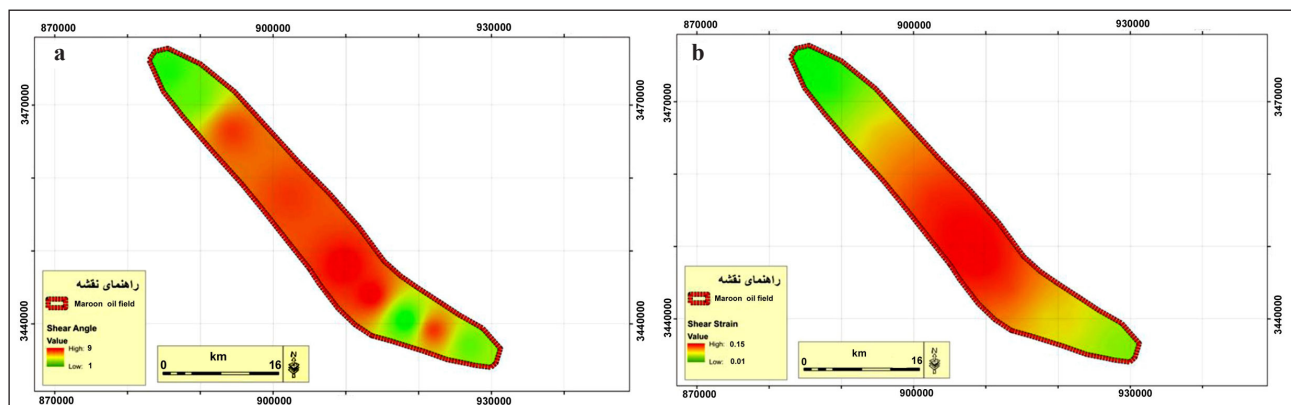


۴- بحث

۴-۱- تحلیل کرنش و مقادیر کوتاه شدگی در افق آسماری، تاقدیس مارون

تعیین مقادیر کوتاه شدگی در بخش های مختلف کمربندهای کوهزایی یکی از موضوعات مورد علاقه زمین شناسان ساختاری می باشد. تعیین مقادیر کوتاه شدگی می تواند به عنوان کلیدی جهت شناخت و فهم سازوکارهای (مکانیسم های) عمل کننده در توسعه دگرشکلی ها مورد استفاده قرار گیرد (Vernant and Chery, 2006; Ghassemi et al., 2010, Fossen, 2016). در پهنه های دگرگونی استفاده از برخی نشانگرهای کرنش و به کارگیری روش های مطالعات تاوایی جنبش شناختی (Kinematic vorticity) می تواند به عنوان ابزاری جهت برآورد مقادیر کوتاه شدگی در این پهنه ها مورد استفاده قرار گیرد (Samani, 2017, Sarkarinejad et al., 2017; Keshavarz and Faghih, 2020; Partabian and Faghih, 2021). پهنه های 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). در این پژوهش با استفاده از میزان رانش یا انحراف صفحه محوری از حالت قائم در مقاطع مختلف

تاقدیس مارون، به رهیافتی جهت تعیین زاویه برش (ψ) و کرنش برشی (γ) اقدام گردید. مفهوم رانش برای جهتی که سطح محوری یک چین به آن سمت چرخش می نماید به کار برده می شود. همچنین مفهوم رانش برای بیان حرکت ساختارهای زمین ساختی که طی تکامل خود جهت حرکت را نشان می دهند به کار برده می شود. براساس عدم تقارن سطح محوری، و میزان انحراف زاویه صفحه محوری از حالت قائم یا خط میانی چین، مقادیر زاویه برشی و کرنش برشی ایجاد شده بر روی مقاطع مختلف تاقدیس مارون تعیین گردید. زاویه برش (ψ) عبارت است از تغییر زاویه بین دو خط که پیش از کرنش بر هم عمود بوده اند. تاثرات زاویه برش نیز مقادیر کرنش برشی را به دست خواهد داد ($\tan \psi = \gamma$) (Ramzay and Hubber, 1983). براساس تحلیل های استریوگرافی، نقشه پهنه بندی مقادیر زاویه برشی (شکل ۸-ا) و کرنش برشی (شکل ۸-ب) در بخش های مختلف تاقدیس مارون تهیه گردید (شکل ۸). براین اساس میزان انحراف سطح محوری و مقادیر کرنش برشی در بخش های مختلف تاقدیس مارون یکسان نبوده و مقادیر متفاوتی را نشان می دهد.



شکل ۸-ا و ب) نقشه پهنه بندی مقادیر زاویه برشی و کرنش برشی در بخش های مختلف تاقدیس مارون.

Figure 8. a and b) Zoning map of the amounts of shear angle and shear strain in deferent parts of Maroon anticline.

جهت تعیین مقادیر نسبت کرنش با استفاده از رابطه (۴) می توان از مقادیر نسبت ابعادی چین نیز بهره جست (Ghassemi et al., 2010).

$$P = 0.5(R-1)^{0.5} \text{ or } R = 4p^2 + 1 \quad \text{(رابطه ۴)}$$

همچنین با استفاده از رابطه (۵) می توان بین مقادیر کوتاه شدگی و نسبت کرنش ارتباط برقرار نمود.

$$e = (1/R^{0.5}) - 1 \quad \text{(رابطه ۵)}$$

در این پژوهش، با استفاده از توابع تصویری، مقادیر کوتاه شدگی و نسبت کرنش در امتداد نیمرخ های لرزه ای در بخش های مختلف افق آسماری برای تاقدیس مارون تعیین گردید (شکل های ۹ و ۱۰). شکل ۱۱-ا و b، نقشه پهنه بندی تغییرات جانبی نسبت کرنش و مقادیر کوتاه شدگی در افق آسماری میدان نفتی مارون را نشان می دهد.

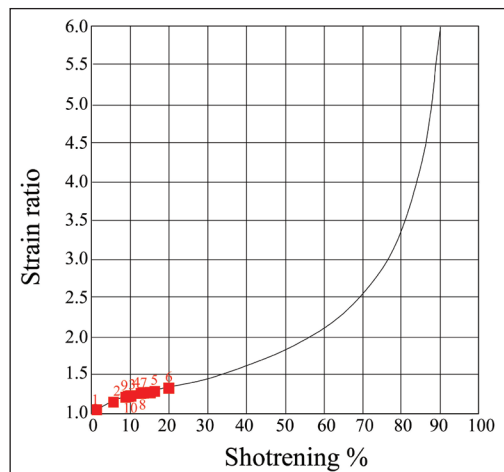
به منظور تعیین مقادیر کوتاه شدگی و نسبت کرنش در سطوح چین خورده روابط ریاضی و توابع تصویری مختلفی ارائه شده است (Ramsay and Hubber, 1983; Bastida et al., 2005, 2007; Ghassemi et al., 2010). با استفاده از مقادیر نسبت ابعادی چین و با استفاده از رابطه (۱) اندازه گیری مقادیر کوتاه شدگی امکان پذیر می باشد.

$$p = 0.5(1/(1+e)^2 - 1)^{0.5} \quad \text{(رابطه ۱)}$$

همچنین با استفاده از کرنش برشی و تعیین مقادیر مربع کشیدگی (رابطه ۲) می توان به تعیین مقادیر نسبت کرنش اقدام نمود (رابطه ۳).

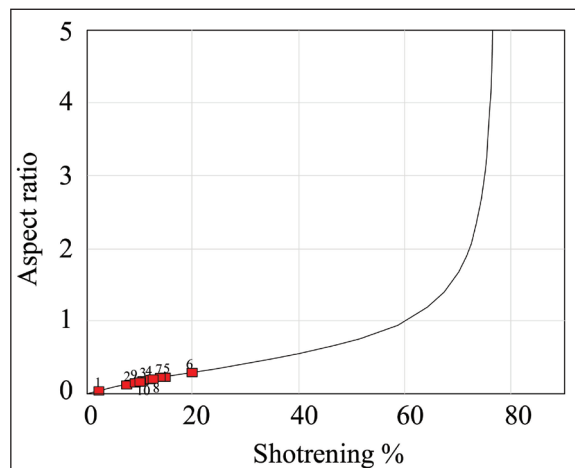
$$\lambda_1 \text{ or } \lambda_3 = 1/2 (\gamma^2 + 2 \pm \gamma(\gamma^2 + 4)^{1/2}) \quad \text{(رابطه ۲)}$$

$$R^2 = \lambda_1 / \lambda_3 \quad \text{(رابطه ۳)}$$



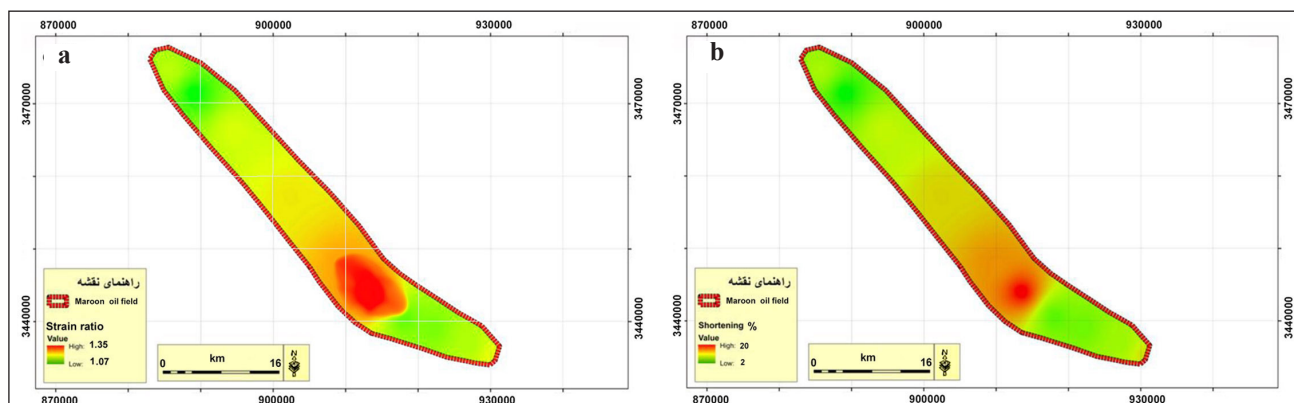
شکل ۱۰- تعیین مقادیر نسبت کرنش در مقاطع مختلف تاقدیس مارون.

Figure 10. Determination of the amounts strain ratio in the deferent profiles of the Maroon anticline.



شکل ۹- تعیین مقادیر درصد کوتاه شدگی در مقاطع مختلف تاقدیس مارون.

Figure 9. Determination of the amounts of shortening percent in the deferent profiles of the Maroon anticline.



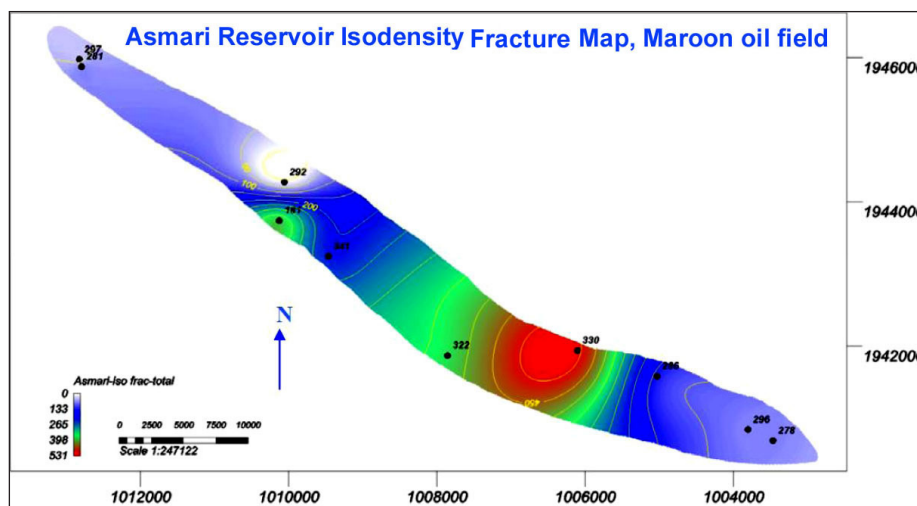
شکل ۱۱- a و b) نقشه پهنه بندی تغییرات جانبی مقادیر نسبت کرنش و درصد کوتاه شدگی در افق آسماری میدان نفتی مارون.

Figure 11- a and b) Along-variation zoning map of strain ratio and shortening percent in the Asmari horizon of the maroon oil field.

میدان نفتی مارون را می توان به وجود گسل های پی سنگی شمالی-جنوبی مرتبط دانست (Mahdevar et al., 2015). هرچند می توان تفاوت در مقادیر لغزش بر روی گسل های معکوس یا میزان لغزش متفاوت بر روی سطح جدایش را نیز به عنوان عاملی در خمش بخش های مرکزی میدان نفتی مارون دانست. از این رو، می توان افزایش میزان لغزش گسل های مرتبط با چین خوردگی در بخش های مرکزی را مهم ترین عامل در بالاتر بودن مقادیر کرنش و کوتاه شدگی در بخش های مرکزی تاقدیس میدان نفتی مارون در نظر گرفت.

مطالعات صورت گرفته با استفاده از تفسیر نمودارهای تصویر گر در میدان نفتی مارون جهت تعیین مناطق با تراکم شکستگی بالا (Mohammadiyan, 2008) گویای انطباق مناطق با تراکم شکستگی بالا و مناطق با نسبت کرنش و درصد کوتاه شدگی بالا و تعیین شده در این پژوهش می باشد (شکل ۱۲).

مطالعات صورت گرفته بر روی سازوکارهای دگرشکلی در تکامل تاقدیس میدان نفتی مارون و سوگیری محورهای تنش افقی بیشینه و کمینه (Mahdevar et al., 2015) نشان می دهد که این میدان دارای پیچیدگی های ساختاری فراوانی بوده و نمی توان یک ساز و کار مشخص و واحد را برای تکامل آن در نظر گرفت. براساس نتایج این مطالعات، می توان ترکیبی از دو ساز و کار خمشی-لغزشی و چین خوردگی با سطح جدایش را برای تکامل ساختاری این تاقدیس متصور شد (Mahdevar et al., 2015). همچنین نتایج حاصل از مطالعات تنش های برجا با استفاده از نمودارهای تصویرگر گویای پیچیدگی جهت یابی میدان تنش در دماغه ها و بخش هایی از یال شمال خاوری می باشد. قرارگیری متناوب لایه های کم مقاومت شیل و مارن را می توان مهم ترین عامل در پیچیدگی های میدان تنش در نظر گرفت (Mahdevar et al., 2015). خمش ایجاد شده و انحنای محور تاقدیس



شکل ۱۲- نقشه تراکم شکستگی ها در میدان نفتی مارون با استفاده از تفسیر نمودارهای تصویر گر (Mohammadiyan, 2008).

Figure 12. Isodensity fracture map in the Maroon oil field using interpretation of image logs.

۵- نتیجه گیری

در بخش های مرکزی تاقدیس مقادیر بیشتری را نسبت به بخش های شمالی و جنوبی نشان می دهد. مهم ترین عامل در مقادیر متفاوت نسبت کرنش و مقادیر کوتاه شدگی در بخش های مختلف میدان نفتی مارون را می توان در ارتباط با میزان لغزش متفاوت بر روی سطوح گسلی مرتبط با توسعه تاقدیس در نظر گرفت. شاید بتوان انحنای موجود در روند ساختاری میدان نفتی مارون را در ارتباط با مقدار لغزش بیشتر بر روی گسل های معکوس و سطوح جدایش در تکامل این تاقدیس مطرح نمود. از این رو می توان افزایش مقادیر کوتاه شدگی و نسبت کرنش در بخش های مرکزی تاقدیس را به راحتی توجیه نمود. با توجه به اهمیت مطالعات سنگ مخزن میدان نفتی جهت تعیین مناطق با کرنش و تراکم شکستگی های بالا و هزینه بالا و زمان بر بودن انجام برخی روش های تخصصی همچون استفاده از نمودارهای تصویر گر، از این رو، با استفاده از ویژگی های هندسی چین های زیرسطحی می توان به تشخیصی سریع و کم هزینه از مناطق مستعد با تراکم شکستگی بالا اقدام نمود.

سپاسگزاری

بدین وسیله از حمایت های صورت گرفته توسط معاونت پژوهشی و فناوری دانشگاه شهید چمران اهواز در قالب پژوهانه (GN: SCU.EG1401.341) و بخش پژوهشی شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب در انجام این پژوهش کمال تشکر و قدردانی به عمل می آید.

همان گونه که بیان شد، تعیین مقادیر کوتاه شدگی به وسیله تهیه مقاطع عرضی موازنه شده دارای محدودیت هایی می باشد. تهیه مقاطع عرضی موازنه شده مستلزم تهیه نیمرخ های 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 مشکل می شود. مقاطع عرضی موازنه شده توانایی محاسبه کرنش پیکری در لایه های دگرشکل شده را نداشته و از این رو می توان گفت که مقادیر کوتاه شدگی محاسبه شده از طریق ترسیم مقاطع موازنه شده همواره نشان دهنده مقادیر کمینه کوتاه شدگی می باشد. در این مطالعه با استفاده از مقاطع لرزه ای عمود بر محور تاقدیس میدان نفتی مارون تغییرات مقادیر کرنش برشی، نسبت کرنش و مقادیر درصدی کوتاه شدگی در طول این تاقدیس مورد بررسی قرار گرفت. براساس تحلیل های صورت گرفته، مقادیر زاویه بین یالی در سرتاسر تاقدیس مارون یکسان نبوده و در بخش های مرکزی مقادیر کمتری نسبت به بخش های شمالی و جنوبی تاقدیس نشان می دهد. میزان انحراف سطح محوری به عنوان معیاری جهت محاسبه زاویه برش و کرنش برشی به کار گرفته شد. براین اساس مقادیر زاویه برش و کرنش برشی الگوی متفاوتی را در طول تاقدیس به نمایش می گذارند. تحلیل های کرنش و کوتاه شدگی در تاقدیس مارون نشان دهنده مقادیر متفاوت نسبت کرنش و کوتاه شدگی در بخش های مختلف این تاقدیس می باشد. مقادیر نسبت کرنش بین ۱/۳۵ تا ۱/۰۷ و مقادیر درصدی کوتاه شدگی بین ۲ تا ۲۰ درصد در طول تاقدیس مارون می باشد. مقادیر نسبت کرنش و کوتاه شدگی

References

- Ahmadhadi, F., Daniel, J.M., Azzizadeh, M., and Lacombe, O., 2008. Evidence for pre-folding vein development in the Oligo-Miocene Asmari Formation in the central Zagros fold belt, Iran. *Tectonics* 27, TC1016.
- 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*.
- Bastida, F., Aller, J., Bobillo-Ares, N.C., and Toimil, N.C., 2005. Fold geometry: a basis for their kinematic analysis. *Earth Science Reviews* 70, 129e164.
- Bastida, F., Aller, J., Toimil, N.C., Lisle, R.J., Bobillo-Ares, N.C., 2007. Some considerations on the kinematics of chevron folds. *Journal of Structural Geology* 29, 1185e1200.
- 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.
- 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.* 160, 401–412. doi:10.1144/0016-764902-110.
- Brown, D., Alvarez - Marron, J., Perez - Estafin, A., Gorozjanin, Y., Barysheva, V., and Puchkov, V., 1997. Geometric and kinematic evolution of the foreland thrust and fold belt in the southern Urals. *Tectonics*, VOL. 16, NO. 3, PAGES 551-562, JUNE 1997.
- 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*, VOL. 31, TC4021, doi:10.1029/2011TC002988.
- Faghih, A., Dehghan, M., Sobhani, S.S., 2023. Study of deformation pattern and kinematic characteristics in the Gelmandeh metamorphic complex, Saghand region, Central Iran. *Advanced Applied Geology* 12 (4), 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.* 3, 9–22.
- Fergusson, C., Nutman, A., Mohajjel, M., and Bennett, V.C., 2016. The Sanandaj–Sirjan Zone in the Neo-Tethyan suture, western Iran: Zircon U–Pb evidence of late Palaeozoic rifting of northern Gondwana and mid-Jurassic orogenesis, *Gondwana Research*, 58: 216-238.
- Fossen, H., 2016. *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- 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.
- 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*. 32 (2010) 755e765.
- 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.
- Jahani, S., Callot, J.P., Frizon de Lamotte, D., Letouzey, J., and Leturmy, P., 2007. The Salt Diapirs of the eastern Fars province (Zagros, IRAN): a Brief outline of their past and present. In: Lacombe, O., Lavé, J., Roure, F., Vergés, J. (Eds.), *Thrust Belt and Foreland Basin*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 289–308.
- 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.* 109, 421–438. DOI: 10.1007/s00531-019-01812-9.
- Mahdevar, M.R., Farsimadan, M., and Kamali, Z., 2015. Effects Deliberation of Fractures and Determination of in-situ Stress in Asmari Reservoir Formation in Marun Oilfield (Based on Image Logs Interpretation Results). *Tectonics Journal*, 1: 14-35.
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold–thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology* 26, 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*, 22, 1125-139.
- Mohammadiyan, R., 2008. The report of fracture analysis of Maroon oil field. National Iranian Oil Company. Report no, 6281.
- 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 Vergés, J., 2012. Building the Zagros collisional orogen: timing, strain distribution and the dynamics of Arabia/Eurasia plate convergence. *Tectonophysics* 532, 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.
- Ramsay, J.G., and Hubber, M.I., 1983. *The techniques of modern structural geology*, 1: strain analysis. Academic Press, London.
- 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*. 208, 109567.
- Samani, B., 2017. Deformation flow analysis and symmetry of Goushti shear zone, Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, Iran. *Geopersia*. 7, 117-130.
- Sarkarinejad, K., and Azizi, A., 2008. Slip partitioning and inclined dextral transpression along the Zagros Thrust System, Iran. *Journal of Structural Geology*, 30: 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*. 154, 147–165.
- Sherkati, S., Letouzey, J., and Frizon Delamotte, D., 2006. Central Zagros fold-thrust belt (Iran): new insights from seismic data, field observation, and sandbox modeling. *Tectonics* 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*. 27,1680–1696.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran, a review, *A. A. P. G. Bull.*, 52(7), PP. 1229-1258.
- Takin, M., 1972. Iranian geology and continental drift in the Middle East. *Nature* 235, 147-150.
- Talebian, M., and Jackson, J., 2004. A reappraisal of earthquake focal mechanisms and active shortening in the Zagros mountains of Iran. *Geophysics*. 156, 506–526.
- Teyssire, C., 1985. A crustal thrust system in an intracratonic tectonic environment. *Journal of Structural Geology*. Vol 7. No 6, pp. 689 to 700.
- Twiss, R.G., and Moores, E.M., 2007. *Structural geology*, Freeman and Company, New York.
- Vernant, P., and Chery, J., 2006. Mechanical modeling of oblique convergence in the Zagros, Iran. *Geophysics*. 165, 991–1002.