

Original Research Paper

Structural analysis of the East Band-e-Lengeh anticline (Southeast of Zagros) based on subsurface data and seismic line interpretation

Zahra Mollaali¹, Seyed Ahmad Alavi^{1*}, Mohsen Ehteshami Moeinabadi¹, Seyed Farajollah Mirhashemi²¹Department of Sedimentary Basins and Petroleum, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran²Department of Exploratory Geology, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Tehran, Iran

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 2025 January 18

Accepted: 2025 April 16

Available online: 2025 July 22

Keywords:

Band-e-Lengeh anticline

Faulted detachment fold

Coastal Fars

Dehram group

Seismic Lines

UGC Map

ABSTRACT

This study investigates the geometry and folding pattern of the East Band-e-Lengeh anticline, located in the Coastal Fars subzone, using 5 structural cross-sections and one longitudinal section derived from seismic line data, geological maps, and exploratory well data. The analysis reveals that the anticline is an almost symmetric fold with an overall elliptical to box-shaped geometry. Based on structural studies and interpretation of seismic lines, the southern limb of the East Band-e-Lengeh structure is affected by a reverse fault originating from the Dashtak formation. According to calculations using the excess area method, the folds detach at a depth of approximately 11 km, indicating that the deformation mechanism of the sedimentary cover in this anticline is a faulted detachment fold. Tectonic thickening of evaporites in the Dashtak formation (Middle Triassic) occasionally forms a detached horizon within the sedimentary cover, altering the geometry of Mesozoic and Cenozoic formations compared to the reservoir horizon of the Dehram group (Permo-Triassic) and causing axial shift. A UGC map of this horizon has been generated to explore the saddle-shaped relationship between the central segment of the anticline and its eastern segment and evaluate the exploration target horizon (Dehram group). Based on cross-section balancing using the bed-length conservation method, the shortening of the anticline is estimated at approximately 4%.

1. Introduction

The Coastal Fars region and the Iranian sector of the Persian Gulf basin are among the largest gas-rich areas in Iran (Haghi et al., 2013). Over 90% of the natural gas and condensates in this region are stored in the carbonate reservoirs of the Dalan formation (Upper Permian) and Kangan formation (Lower Triassic). These

formations, which are part of the Dahram group and equivalent to the Khuff formation in Saudi Arabia (Szabo and Kheradpir, 1978), have been identified as potential hydrocarbon exploration targets in the Fars geological province.


The Dalan and Kangan formations, located in the Zagros

* Corresponding author: Seyed Ahmad Alavi; E-mail: a-alavi@sbu.ac.ir

Citation:

Mollaali, Z., Alavi, S.A., Ehteshami Moeinabadi, M., Mirhashemi, S.F., 2025. Structural analysis of the East Band-e-Lengeh anticline (Southeast of Zagros) based on subsurface data and seismic line interpretation. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences*, 35(2), 136, 101-122. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.500479.2176>.

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

 doi: 10.22071/gsj.2025.500479.2176

 dor: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.6.9



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

Fold-Thrust Belt, were deposited in a tectonic setting along the passive margin of the Arabian Plate, forming a carbonate platform (Szabo and Kheradpir, 1978). However, tectonic and sedimentary factors have resulted in uneven distribution of these formations in the Permo-Triassic basin, altering their reservoir characteristics vertically and laterally (Sherkati et al., 2005; Sepehr et al., 2006). These factors also affect other elements of the petroleum system, determining whether these formations contain economically viable oil and gas reserves. For example, the placement of anticline structures over basement highs plays a key role in enabling reservoirs to be charged by Paleozoic source rocks (Motamedi et al., 2012; Hasani et al., 2010).

Although geological studies on the Band-e-Lengeh anticline are limited, the structure has been included in some regional studies. During the 1960s and 1970s, several anticline structures near the study area were evaluated by operating companies. These assessments identified the Band-e-Lengeh anticline as the primary exploration target within the Ultramar company's concession area. Drilling on the Band-e-Lengeh anticline began in 1975, targeting the Asmari, Jahrum, and Dehram formations. However, due to the significant thickness of the Cretaceous formations, access to the Triassic and Permian formations was not achieved. Drilling stopped at -3926 meters in the Surmeh formation (Motamedi et al., 2005).

The East Band-e-Lengeh structure is situated on a basement high, with a potential for suitable closure at the target exploration horizon (Dehram group). Due to the influence of ductile formations, the surface geometry of this anticline does not accurately reflect its subsurface geometry, leading to challenges in correlating surface and subsurface structures. To resolve these ambiguities, seismic surveys were conducted over the area.

In this regard, in 2012, five transverse seismic lines and one longitudinal seismic line were acquired over the Band-e-Lengeh anticline, with three located in its eastern segment. Utilizing these new data, the present study provides a novel analysis of the structure and geometry of the Eastern Band-e-Lengeh anticline, with its results applied to evaluating the target exploration horizon (Dehram group).

This study presents 5 structural cross-sections (totaling 116 km in length and 12 km in depth) and one longitudinal structural section (68 km in length and 12 km in depth), constructed through seismic line interpretation, to analyze the structural and geometrical characteristics of the East Band-e-Lengeh anticline. Given the proven presence of gas in the Dehram reservoir horizon, a UGC map of the Dehram group was prepared to evaluate and calculate its closure. Since the accurate calculation of the amount and direction of axial shift is crucial in determining drilling locations, this study also investigates the impact and role of the Dashtak formation (as the mid-cover detachment horizon) and its axial shift relative to the

top of the Dehram group on the geometry of the mentioned fold.

2. Research methodology

The structural analysis of the East Band-e-Lengeh anticline in this study was conducted by constructing six structural sections (five cross-sections and one longitudinal section). These were based on data from reflection seismic lines, information from the Band-e-Lengeh-1 well, the geological map of the area, a Digital Elevation Map (DEM), and measurements of bedding geometry (strike and dip). The cross-sections were designed using the kink method in 2D-3D-Move software.

The preparation process involved georeferencing maps in ArcGIS, creating topographic profiles in Global Mapper, and interpreting seismic data in Petrel software. The cross-sections were designed to cover critical points such as culminations and saddle zones, providing more accurate data for the UGC map. Before structural interpretation, the seismic profiles were converted to depth using appropriate velocity models. The balance test of the cross-sections, fault slip analysis, and calculation of layer shortening percentage in each section assuming layer length conservation, were performed in the 2D-3D-Move software. Finally, after constructing the structural sections, a depth map (UGC map) of the exploration target horizon (Dehram group) was prepared in Petrel software.

To determine the folding geometry model, folding indexes along each section were calculated using the methods of Twiss and Moores (1992), Fleuty (1964), Lisle et al. (2006), and Bastida et al. (2005) (Figure 12).

3. Results

3.1. Structural Cross-Sections and Longitudinal Sections

Five structural cross-sections and one longitudinal section have been constructed to conduct a structural analysis of folding and calculate the amount of shortening in the Band-e-Lengeh anticline, which is discussed in this part. The paths of the sections CC', DD', EE', and FF' correspond to seismic lines. Transverse sections AA', BB', and CC' have been balanced using the layer-length conservation method. The measured geometric indices for the cross sections are presented in Tables 1, 2, 3, 4, and 5.

3.2. Cross-Section AA'

This section is oriented north-south with a length of approximately 26 kilometers and is nearly perpendicular to the axial plane of the anticline. It represents the westernmost cross-section along the East Band-e-Lengeh anticline (Figure 5-a, b). This anticline is asymmetric, with a steeper southern limb that dips southward and is classified as a gentle fold with a box-shape geometry. The oldest exposed formation in this section is the Gachsaran formation. Normal faults are observed within the Gachsaran formation,

extending only to shallow layers. The southern limb of the anticline is affected by a reverse fault originating from the Dashtak formation and extending to the Mishan formation. This fault has caused the thickness of the Dashtak formation to increase from 830 meters to 1267.6 meters, indicating a thickening of 437.6 meters. The depth of detachment to the base detachment horizon in this cross-section is estimated at -10765 meters, and the average shortening calculated for this section is 3.54% (Figure 5-c).

3.3. Cross-Section BB'

This section, oriented north-south with a length of approximately 27.7 kilometers, is also nearly perpendicular to the axial plane of the anticline (Figure 6a). The fold in this section is gentle and has a southward vergence. The oldest exposed formation is the Chehel member of the Gachsaran formation. A thrust fault on the southern limb of the anticline originates from the Dashtak formation and terminates within the Mishan formation. This fault has caused the thickness of the Dashtak formation to increase from 830 meters to 1271.3 meters, resulting in a thickening of 441.3 meters. The depth of detachment to the base detachment horizon in this cross-section is estimated at -10509 meters, and the average shortening for this section is calculated to be 4.2% (Figure 6-b).

3.4. Cross-Section CC'

The CC' section, with a length of 25.6 kilometers, was drawn using seismic line data (Figure 7-a and b). This fold is asymmetric, with a southward inclination, and falls within the category of gentle folds with an elliptical to box-shaped geometry. Based on the interpretation of seismic lines (Figure 7-a), a reverse fault on the southern limb originates from the Dashtak and has caused the thickness of the Dashtak formation to increase from 830 meters to 1338 meters, resulting in a tectonic thickening of 508 meters. The axial shift from the top of the Dashtak formation relative to the top of the Dehram group is calculated to be 802.7 meters, and the depth to the detachment horizon is estimated at -10591 meters. The average shortening in this section is 4.11% (Figure 7-c).

3.5. Cross-Section DD'

This section, with a length of 19.6 kilometers, is located in the eastern segment of the Band-e-Lengeh anticline and has been drawn based on seismic data (Figures 8). The fold in this section is almost symmetrical, with a fold symmetry index (S) of 1.04. According to field studies conducted during this research, normal faults parallel to the axial surface of the fold have been observed on the southern limb. These faults are shallow, and their displacements dissipate within the Gachsaran formation (Figure 11-c). Based on subsurface information derived from the interpretation of seismic lines (Figure 8-a), the southern limb is influenced by a reverse fault originating

from the Dashtak and extending to the Mishan formation. This fault has caused the thickness of the Dashtak formation to increase from 830 meters to 1204 meters around the fault, resulting in an axial shift of 858 meters (towards the backland) relative to the top of the Dehram group (Table 5).

3.6. Cross-Section EE'

The EE' section, with a length of 17 kilometers along a north-south orientation, represents the easternmost cross-section drawn in the Band-e-Lengeh anticline (Figure 9). In this section, the oldest exposed formation is the Gachsaran formation, and the Bakhtiari conglomerate deposits rest unconformably overlying the Aghajari formation. This anticline is asymmetric, with a fold symmetry index (S) of 0.7, indicating a northward vergence. Based on the subsurface information obtained from the interpretation of seismic lines, no fault is observed in this section (Figure 9-a). The thickness of the Dashtak formation remains constant, and there is no increase in thickness or axial shift from the top of the Dashtak formation to the top of the Dehram group.

3.7. Longitudinal Section FF'

The longitudinal section, parallel to the anticline axis and 68 kilometers in length, was drawn to examine the relationship between the eastern, central, and western segments of the Band-e-Lengeh anticline and to validate the cross sections. This section was also used to generate the UGC map of the Dehram group (Figure 10-b). Based on the interpretation of the longitudinal seismic line (Figure 10-a), the Band-e-Lengeh anticline is divided into three segments: eastern, central, and western. Depressions between sections AA', BB', and CC', resulting from gentle saddle-like structures, are observed between the anticline segments. From sections AA' to DD', the Dashtak formation is slightly thicker in the southern limb due to reverse faults. However, between sections DD' and EE', the thickening decreases, and within the EE' section, no significant changes in the thickness of the Dashtak formation are observed.

4. Discussions

In this part, using subsurface data and the structural sections drawn, the folding pattern, the behavior of detachment horizons, and their impact on the folding mechanism and the evaluation of the reservoir geometry of the Dehram group are discussed.

4.1. Detachment Horizons and Folding Mechanism in the Band-e-Lengeh anticline

The almost symmetrical geometry of the anticlines in the Lengeh depression area and the development of thrust and reverse faults in their limbs, or in other words, the development of structures with a backland-facing tilt, indicate the presence of a significant

detachment horizon with low viscosity and friction at the base of the folding formations (Motamedi et al., 2012). The divergent pattern of seismic reflectors towards the core of the anticline at the base of the folded layers suggests that folding occurred entirely above this detachment horizon. Based on the folding style and the presence of salt plugs (the Champe salt plug at the western segment of the Band-e-Lengeh anticline, Figure 11-b), it can be inferred that the evaporites of the Hormuz series, dating back to the Infra-Cambrian period, are the main detachment horizon in the region (Motamedi et al., 2012). According to calculations using the excess area method, the detachment depth for the Band-e-Lengeh anticline is estimated to be around 11 kilometers (Figure 13), which is consistent with the basement depth calculated from aeromagnetic data by Tabatabaei (1997).

In this study, based on the cross sections drawn from the Band-e-Lengeh anticline, it was observed that reverse faults developed in the limbs of the anticline. This structural geometry is similar to two mechanisms of fault-related folding: fault propagation and faulted detachment folding. According to the criteria proposed by Mitra (2002 and 2003), the primary kinematic pattern in the studied area is faulted detachment folding and detachment folding. The reasons for this are as follows:

In the East Band-e-Lengeh anticline, the presence of synclines under the developed reverse faults in the southern limb of the folds, steep reverse faults, and the narrowing of folds at depth due to rotation of the limbs and migration of the hinge point indicates the characteristic of transferring the deformational behavior from detachment folding to faulted detachment folding with an increase in shortening (Figures 5-a, 6-a, 7-a, 7-b, 8). In faulted detachment folds, the fault slip shows a complex displacement pattern depending on the fault history. Fault slip may be constant in some formations and increase or decrease towards the top of the section (Figures 14-a, 14-b, 14-c, 14-d). Still, in fault-propagation folds, fault slip regularly decreases towards the top of the section (at the top of the fault, slip becomes zero), and fault slip can be predicted based on the length of the trailing limb (McNaught and Mitra, 1993; Mitra, 2002). Many faulted detachment folds form with long wavelengths and short amplitudes. In contrast, in fault-propagation folds, the wavelength of the fold is directly related to the amount of shortening (Mitra, 2002). In the Band-e-Lengeh anticline, the displacement along the reverse fault in the fold's limb is minor compared to the development of the fold (Figures 5-a, 6-a, 7-b, 8). In fact, the short amplitude of the folds compared to the small fault displacement indicates that most of the folding occurred before faulting. Such evidence for the Band-e-Lengeh anticline is consistent with the criteria proposed by Mitra (2002 and 2003) for faulted detachment folding.

In addition to the Hormuz series (the base detachment horizon),

the structural interpretation of seismic profiles, combined with the location of source formations in the Band-e-Lengeh-1 well and nearby wells, as well as the drawing of structural sections, indicated the presence of a significant detachment horizon in the middle of the sedimentary cover. As shown by the divergent pattern of seismic reflectors, the Dashtak evaporitic formation, dating back to the Triassic period, in four of the drawn cross sections from the Band-e-Lengeh structure (Figures 5-a, 6-a, 7-a, 7-b, 8-a, 8-b), shows an increase in structural thickness due to the activity of reverse faults in the southern limb, which has caused a shift in the fold axis between the Kangan horizon (top of the Dehram group) and younger horizons (Table 5). This could complicate the selection of drilling locations. However, in the EE' cross-section (Figure 9), this formation does not show detachment behavior and does not exhibit thickening.

Therefore, mechanical stratigraphy is one of the key factors controlling the kinematic folding pattern in the studied anticline. Faulted detachment folds typically form in units with significant differences in mechanical strength, and their deformation behavior changes considerably over time. In contrast, fault-propagation folds, which develop in thinly bedded units with relatively homogeneous lithology, are less influenced by mechanical stratigraphy (Mitra, 2002). Given the significant lithological contrast between ductile horizons and relatively thick stratifications in the sedimentary cover of the region (Figure 3), the necessary conditions for the formation of fault-propagation folding do not exist (Motamedi et al., 2005). In this anticline, lithological variations include conglomerates (Bakhtiari formation), sandstones (Aghajari formation), carbonates (Mishan, Ilam-Sarvak, and Khami group), shales and marls (Pabdeh-Gurpi and Kazhdomi formations), and evaporites (Gachsaran and Dashtak formations). Therefore, the presence of detachment horizons, such as the Dashtak formation, which has played a major role in determining the folding style, indicates the dominance of faulted detachment folding in this anticline.

4.2. Assessment of the Reservoir Geometry of the Dehram group in the Band-e-Lengeh anticline

To investigate the relationship between different segments of the Band-e-Lengeh anticline, including examining the saddle zone connection between the central and eastern segments of the anticline and determining the reservoir geometry of the exploration target horizon, a UGC map for the Dehram group was drawn. Using this map, the horizontal closure was calculated to determine the effective area of the gas storage domain and to identify the structural extent of the anticline, while the vertical closure was calculated to evaluate the reservoir potential of the Band-e-Lengeh anticline (Figure 15).

Based on the prepared UGC map, the Band-e-Lengeh structure

is divided into three segments: East Band-e-Lengeh, Central Band-e-Lengeh, and West Band-e-Lengeh. The East Band-e-Lengeh structure is separated from the Central Band-e-Lengeh structure by a saddle zone at a depth of -5220 meters from sea level, sitting on the Kangan formation. The Central Band-e-Lengeh structure is also separated from the West Band-e-Lengeh structure by a milder saddle zone at a depth of -4620 meters from sea level, also on the Kangan formation. The horizontal closure of the Dehram group in the East Band-e-Lengeh structure is approximately 52.88 square kilometers, and the vertical closure is 890 meters. The horizontal closure of the Dehram group in the Central Band-e-Lengeh structure is approximately 20.34 square kilometers, with a vertical closure of 140 meters.

According to Figure 15, the eastern and central segments of the Band-e-Lengeh anticline are not exposed to faults or salt plugs. The western segment of the anticline is limited to the salt plug, and therefore, the western segment lacks a defined closure for hydrocarbon storage.

5. Conclusion

Based on the measured geometric indexes, the East Band-e-Lengeh anticline belongs to the category of gentle folds. The overall geometry of the anticline is oval to box-shaped, with the anticline being almost symmetrical. The folds in the drawn cross-sections are tilted toward the south, with only one cross-section (EE') tilting towards the north. These variations indicate a differential deformation from west to east.

The primary mechanism of folding in the East Band-e-Lengeh anticline is identified as faulted detachment folding. According to calculations using the method of excess area, the base detachment horizon is located at a depth of approximately 11 kilometers,

aligning with the Hormuz series at the sedimentary cover and basement boundary.

The thick deposits of Triassic evaporites (Dashtak formation) in some areas form a detachment horizon in the middle of the sedimentary cover, leading to the axial shift of the fold. This could complicate the selection of drilling locations for gas exploration.

Balanced cross-sections based on the layer length conservation method show that shortening increases from the deeper formations toward the near-surface formations. The average shortening in the East Band-e-Lengeh anticline is around 4%, which is reasonable considering the gentle nature of the folding in this anticline.

The results from the UGC map of the Dehram group reservoir horizon in the Band-e-Lengeh anticline indicate that the East Band-e-Lengeh anticline, with a suitable reservoir potential for hydrocarbon storage (52.88 square kilometers horizontal closure and 890 meters vertical closure independent of faults), and positioned over the basement high, is a priority for exploratory operations. The West Band-e-Lengeh structure is limited to the Champe salt plug, and based on calculations, it lacks a defined closure for hydrocarbon storage.

Acknowledgments

We want to express our sincere gratitude to the Exploration Manager, the Deputy Director of Earth Sciences, as well as the heads and experts of the Geological Exploration and Research-Technology departments of the Exploration Management at the National Iranian Oil Company, for their comprehensive support, including providing subsurface seismic and well data, supplying the necessary software and hardware, training in specialized software, and their constructive guidance in advancing this research.

تحلیل ساختاری تاقدیس بندلنگه خاوری (جنوب خاور زاگرس) بر اساس اطلاعات زیرسطحی و تفسیر خطوط لرزه نگاری

زهره ملاعلی^۱، سید احمد علوی^{۱*}، محسن احتشامی معین آبادی^۱ و سید فرج‌اله میرهاشمی^۲

^۱ گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

^۲ اداره زمین‌شناسی اکتشافی مدیریت اکتشاف، شرکت ملی نفت ایران، تهران، ایران

چکیده

این پژوهش با ارائه ۵ برش ساختاری عرضی و ۱ برش ساختاری طولی که بر اساس اطلاعات خطوط لرزه‌نگاری، نقشه‌های زمین‌شناسی و داده چاه اکتشافی تهیه شده‌است، به بررسی هندسه و الگوی چین خوردگی در تاقدیس بندلنگه خاوری (واقع در زیرپهنه فارس ساحلی) پرداخته است. بررسی‌ها نشان دادند که این تاقدیس یک چین تقریباً متقارن با هندسه کلی بیضوی تا جعبه‌ای است. بر اساس مطالعات ساختاری و تفسیر خطوط لرزه‌نگاری موجود، یال جنوبی ساختمان بندلنگه خاوری، توسط گسلی معکوس و منشا سازند دشتک متاثر شده‌است. طبق محاسبات انجام شده به روش مساحت برافزوده، چین‌ها در ژرفایی حدود ۱۱ کیلومتر جدایش می‌یابند به گونه‌ای که سازوکار دگرریختی پوشش رسوبی در این تاقدیس، چین خوردگی جدایشی گسل خورده می‌باشد. تبخیری‌های سازند دشتک (تریاس میانی) در مواردی با افزایش ستبرای زمین‌ساختی، افقی گسسته را در میانه پوشش رسوبی تشکیل داده که هندسه واحدهای مزوزویک و سنوزویک را از هندسه افق مخزنی دهرم (پرموتریاس) متفاوت می‌سازد و سبب جابه‌جایی محوری می‌شود. جهت بررسی رابطه زین‌سان بین بخش مرکزی تاقدیس و دماغه خاوری آن و همچنین ارزیابی افق هدف اکتشاف (گروه دهرم)، نقشه ژرفایی این افق تهیه شده‌است. در این پژوهش، بر اساس موازنه برش‌ها به روش پایستگی طول لایه، میزان کوتاه‌شدگی برای این تاقدیس حدود ۴ درصد برآورد شده‌است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۷

تاریخ انتشار: ۱۴۰۴/۰۴/۰۱

کلیدواژه‌ها:

تاقدیس بندلنگه

چین جدایشی گسل خورده

فارس ساحلی

گروه دهرم

خطوط لرزه‌نگاری

نقشه ژرفایی

۱- پیش‌نوشتار

۱- پیش‌نوشتار

منطقه فارس ساحلی و بخش ایرانی حوضه خلیج فارس از بزرگ‌ترین نواحی گازخیز ایران به شمار می‌رود (Haghi et al., 2013). بیش از ۹۰ درصد گاز طبیعی و میعانات این منطقه در مخازن کربناته سازندهای دالان (پرمین بالایی) و کنگان (تریاس پایینی) ذخیره شده‌است. این سازندها که بخشی از گروه دهرم و معادل سازند خوف در عربستان هستند (Szabo and Kheradpir, 1978)، در ایالت زمین‌شناسی فارس به‌عنوان اهداف بالقوه اکتشاف هیدروکربن مطرح شده‌اند. شناخت موقعیت زمین‌شناسی و نقش این سازندها در یک سیستم نفتی گسترده، برای ارزیابی قابلیت آن‌ها به‌عنوان مخازن هیدروکربنی بسیار حائز اهمیت است. سازندهای دالان و کنگان که در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس قرار دارند، در شرایط زمین‌ساختی حاشیه غیرفعال ورق عربی نهشته شده و سکوی رسوبی آن‌ها از نوع کربناته بوده‌است

(Szabo and Kheradpir, 1978). با این حال، عوامل زمین‌ساختی و رسوبی موجب توزیع غیریکنواخت این سازندها در حوضه پرمین-تریاس شده و ویژگی‌های مخزنی آن‌ها را در راستای عمودی و جانبی متغیر ساخته است (Sherkati et al., 2005). همچنین سایر عناصر سیستم هیدروکربنی نیز تحت تأثیر این عوامل قرار دارند و تعامل آن‌ها در نهایت تعیین می‌کند که آیا این سازندها ذخایر اقتصادی نفت و گاز قابل توجهی دارند یا خیر. برای نمونه، قرارگیری ساختارهای تاقدیسی بر روی بلندای پی‌سنگی، نقش مهمی در توانایی شارژ مخازن توسط سنگ‌های منشا پالئوزویک زیرین داشته‌است (معمدی و همکاران، ۱۳۹۱؛ حسنی و همکاران، ۱۳۸۹).

بر روی تاقدیس بندلنگه اگرچه مطالعات زمین‌شناسی زیادی انجام نشده‌است، ولی در مواردی زیرپوشش برخی از مطالعات ناحیه‌ای قرار داشته‌است. در دهه‌های

* نویسنده مسئول: سید احمد علوی؛ E-mail: a-alavi@sbu.ac.ir

ماخذنگاری:

ملاعلی، ز.، علوی، س.، احتشامی معین آبادی، م. و میرهاشمی، س.ف.، ۱۴۰۴، تحلیل ساختاری تاقدیس بندلنگه خاوری (جنوب خاور زاگرس) بر اساس اطلاعات زیرسطحی و تفسیر خطوط لرزه‌نگاری. فصلنامه علمی علوم زمین، ۳۵(۲)، ۱۳۶-۱۰۱، ۱۲۲. <https://doi.org/10.22071/gsj.2025.500479.2176>

doi: 10.22071/gsj.2025.500479.2176

doi: 20.1001.1.10237429.1404.35.2.6.9

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/>)

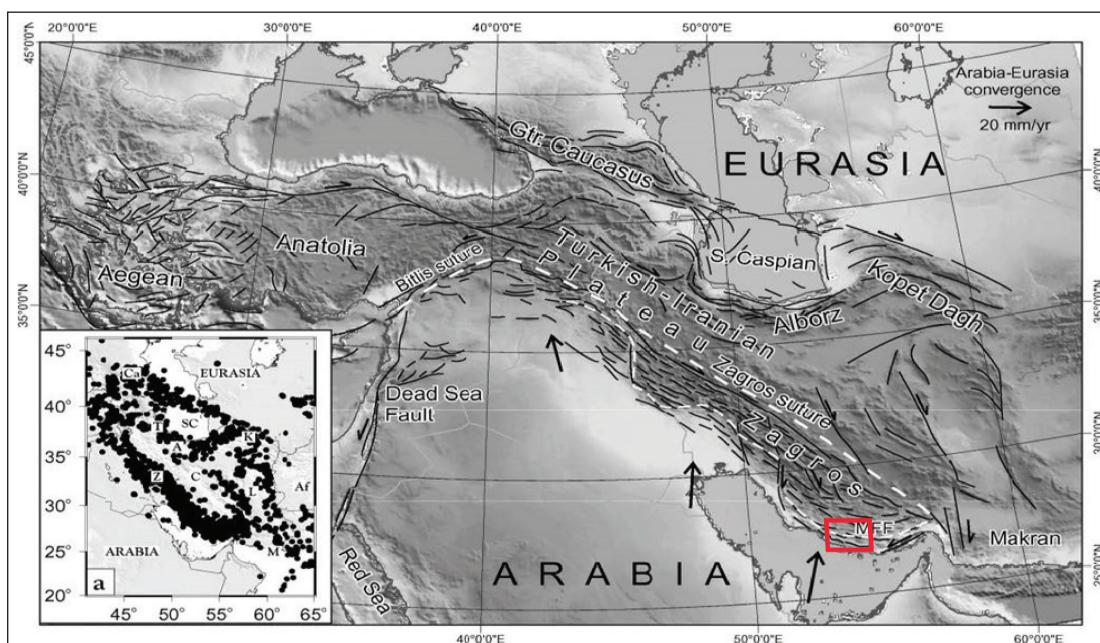
محل حفاری اهمیت بسیار زیادی دارد، در این پژوهش تاثیر و عملکرد سازند دشتک (به عنوان افق گسسته میانی) و جابه‌جایی محوری آن نسبت به راس گروه دهرم بر روی هندسه چین یاد شده نیز مورد بررسی قرار گرفته‌است.

کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس با امتداد شمال باختری-جنوب خاوری در بخش میانی رشته کوه آلپ-همالیای قرار گرفته و یکی از جوان‌ترین برخوردی‌های قاره‌ای جهان به‌شمار می‌رود (Berberian and King, 1981; Snyder and Barazangi, 1986). این کوهزاد فعال و متعلق به دوران سنوزویک، با طولی نزدیک به ۲۰۰۰ کیلومتر و عرضی میان ۲۵۰ تا ۳۵۰ کیلومتر، از کوه‌های تاروس (Taurus) در ۳۰۰ کیلومتری جنوب خاوری گسل آناتولی ترکیه آغاز شده و از شمال عراق و جنوب باختر ایران عبور کرده و تا تنگه هرمز امتداد می‌یابد. در تنگه هرمز، گسل میناب با راستای شمالی-جنوبی، کمر بند زاگرس را از پهنه مکران جدا می‌کند (Falcon, 1974; Berberian and King, 1981; Alavi, 1994; Hessami et al., 2001). این کمر بند نتیجه همگرایی و بسته شدن اقیانوس تیس جوان در سنوزویک پسین است که بین ورقه‌های عربی و اوراسیا رخ داده‌است (Stocklin, 1968; Alavi, 1994; Talbot and Alavi, 1996).

شواهد زمین‌شناسی نشان می‌دهند که کمر بند زاگرس بخشی از حاشیه شمال خاوری ورق عربی بوده و در تمام دوران پالئوزویک به‌عنوان بخشی از سکوی قاره‌ای عربی، جزئی از ابرقاره گندوانا بوده‌اند (Falcon, 1974). در زمان پرموتریاس، فرایند کافت‌شدگی آغاز شد و با گسترش اقیانوس تیس جوان طی ژوراسیک و کرتاسه پیشین، شرایط یک حاشیه قاره‌ای غیرفعال در این منطقه فراهم شد (Berberian and King, 1981). مطالعات اخیر با استفاده از سیستم‌های موقعیت‌یاب جهانی (GPS) طی دو دهه گذشته نشان داده‌اند که نرخ متوسط همگرایی کنونی بین ورقه‌های عربی و اوراسیا حدود ۲۰ میلی‌متر در سال است (Sella et al., 2002; Blanc et al., 2003) که این میزان از جنوب خاوری به سمت شمال باختری زاگرس کاهش می‌یابد (شکل ۱).

۶۰ و ۷۰ میلادی، برخی از ساختمان‌های تاق‌دیس موجود در محدوده نزدیک به منطقه مورد مطالعه توسط شرکت‌های عامل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته‌است. ارزیابی صورت گرفته به در نظر گرفتن تاق‌دیس بندلنگه به‌عنوان اصلی‌ترین هدف اکتشافی واقع در محدوده شرکت اولترامار (Ultramar) انجامید. چاه بندلنگه-۱ در سال ۱۹۷۵ با هدف دستیابی به سازندهای آسماری، جهرم گروه بنگستان، گروه خامی و دهرم در سال ۱۹۷۵ حفاری گردید ولی به علت ستبرای زیاد سازندهای کرتاسه، دستیابی به سازندهای تریاس و پرمین مقدور نشد و حفاری این چاه در بخش بالایی سازند سورمه در ژرفای ۳۹۲۶- متری متوقف گشت (معمدی و همکاران، ۱۳۸۴).

ساختار بندلنگه خاوری بر روی بلندای پی‌سنگی قرار داشته و احتمال بستگی (Closure) مناسب در افق هدف اکتشاف (گروه دهرم) وجود دارد. در این تاق‌دیس به دلیل تاثیر سازندهای شکل‌پذیر، هندسه سطحی قادر به انعکاس دقیق هندسه ژرفایی نیست و با چالش‌هایی در تطابق هندسه سطحی و ژرفایی روبرو است به همین دلیل جهت رفع ابهامات، عملیات لرزه‌نگاری بر روی آن انجام شده‌است. در این راستا، در سال ۱۳۹۱ تعداد ۵ خط لرزه‌نگاری عرضی و ۱ خط لرزه‌نگاری طولی بر روی تاق‌دیس بندلنگه برداشت گردید که از این میان ۳ خط لرزه‌نگاری عرضی بر روی قسمت خاوری بندلنگه واقع است. پژوهش حاضر با بهره‌گیری از این داده‌های جدید، امکان ارائه تحلیلی نوین از ساختار و هندسه تاق‌دیس بندلنگه خاوری را فراهم کرده و نتایج آن در ارزیابی افق هدف اکتشاف (گروه دهرم) به کار گرفته شده‌است. این مطالعه با ارائه ۵ برش عرضی ساختاری (مجموعاً به طول ۱۱۶ کیلومتر و ژرفای ۱۲ کیلومتر) و ۱ برش طولی ساختاری (به طول ۶۸ کیلومتر و ژرفای ۱۲ کیلومتر) که با استفاده از تفسیر خطوط لرزه‌نگاری رسم شده‌اند، به تحلیل ساختاری و هندسی تاق‌دیس بندلنگه خاوری می‌پردازد. باتوجه به اثبات گاز در افق مخزنی دهرم، جهت ارزیابی و محاسبه بستگی افق هدف اکتشاف، نقشه ژرفایی گروه دهرم تهیه شده‌است. از آن‌جا که محاسبه دقیق میزان و جهت جابه‌جایی محوری در تعیین



شکل ۱- توپوگرافی و ساختار کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس و آهنگ کنونی برخورد عربستان-اوراسیا. نرخ همگرایی برخورد عربستان-اوراسیا از سلا و همکاران (Sella et al., 2002) موقعیت گسل جبهه کوهستان (MFF) تفسیر از بربریان (Berberian, 1995) (عکس برگرفته از بلاتش و همکاران-Blanc et al., 2003). محل قرارگیری تاق‌دیس بندلنگه در این شکل با مستطیل قرمز نشان داده شده‌است.

Figure 1. Topography and structure of the Zagros Fold-Thrust Belt and the current rate of Arabia-Eurasia collision. The convergence rate of the Arabia-Eurasia collision is from Sella et al. (2002). The location of the Mountain Front Fault (MFF) is interpreted from Berberian (1995). (Image adapted from Blanc et al., 2003). The red rectangle in this figure indicates the location of the Band-e-Lengeh anticline.

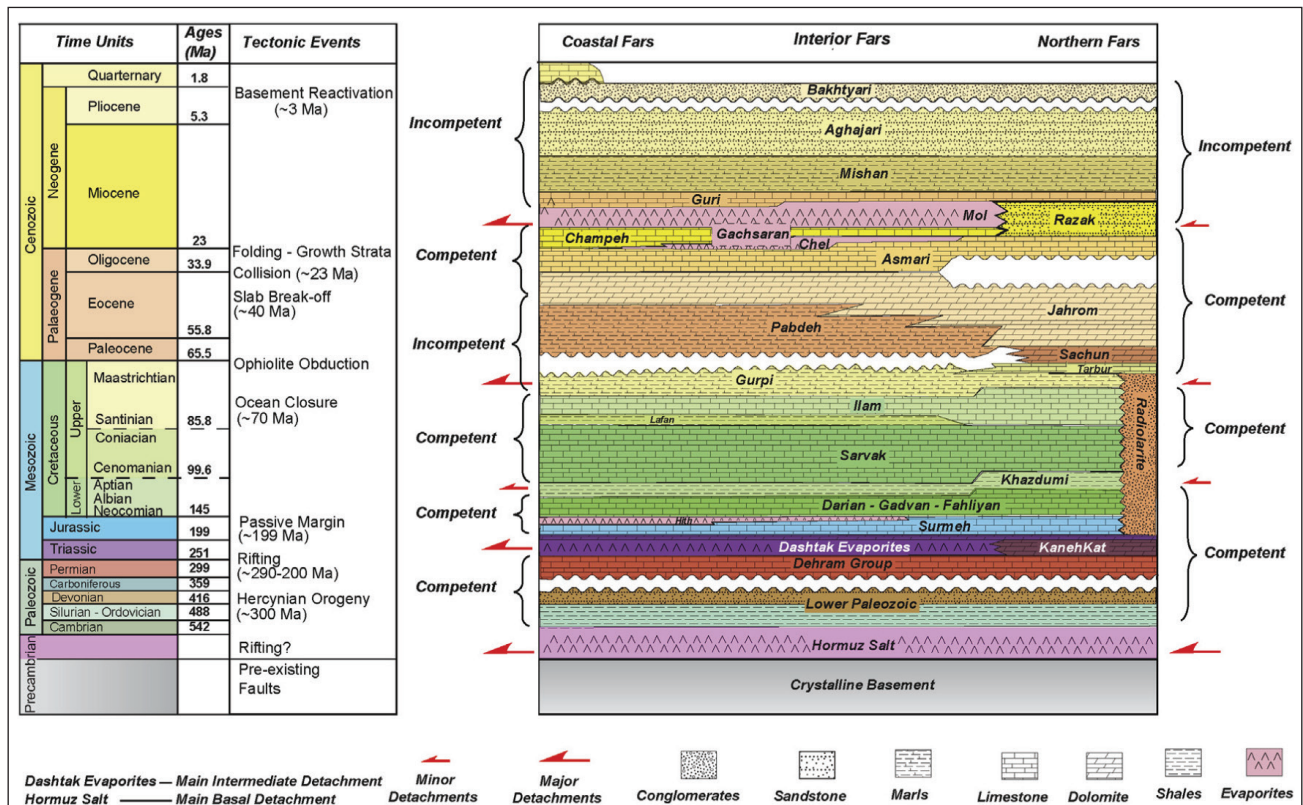
در این پژوهش، تاق‌دیس بندلنگه خاوری واقع در کمربند چین‌خورده ساده زاگرس، در ایالت زمین‌شناسی فارس و زیرحوضه فارس ساحلی مورد مطالعه قرار گرفته‌است. تاق‌دیس بندلنگه با روند خاوری-باختری، در شمال باختری جزیره قشم قرار دارد و نزدیک‌ترین شهر به آن بندر لنگه است. این تاق‌دیس در محدوده طول‌های جغرافیایی ۰۵° ۵۵' تا ۲۳° ۵۵' و عرض‌های جغرافیایی ۴۵° ۲۶' تا ۵۴° ۲۶' واقع شده و مرز جنوبی آن بر خط ساحلی خلیج فارس منطبق می‌باشد (شکل ۲). ستبری زیاد توالی چینه‌ای جوان‌تر از سازند آسماری (گروه فارس)، یکی از ویژگی‌های برجسته این بخش از زیرحوضه فارس ساحلی است که به نام فروافتادگی لنگه شناخته می‌شود (مطیعی، ۱۳۷۲). مطیعی (۱۳۷۲)، شکل‌گیری فروافتادگی لنگه را به اوایل دوره کرتاسه نسبت می‌دهد که تا سواحل عمان امتداد داشته و در سمت شمال توسط سکوی جهرم محدود می‌شده‌است. نقشه‌های مغناطیس‌سنجی هوایی

موقعیت فروافتادگی لنگه را با یک فروافتادگی پی‌سنگی مرتبط می‌دانند که به دلیل شدت کم میدان مغناطیسی مشخص می‌شود (معتدی و همکاران، ۱۳۹۱). همچنین، اطلاعات مغناطیس‌سنجی هوایی نشان می‌دهند که بخش خاوری ساختمان بندلنگه روی بلندای پی‌سنگی لیدان قرار گرفته‌است (معتدی و همکاران، ۱۳۹۱).
شکل ۳ ستون چینه‌شناسی و چینه‌شناسی مکانیکی ناحیه فارس را نشان می‌دهد. توالی‌های رسوبی کمربند زاگرس متشکل از واحدهای مقاوم و نامقاوم اند که سبب ناهمسانی مکانیکی می‌شود که مقیاس و سبک چین‌های ایجاد شده را کنترل می‌کند (Sepehr et al., 2006). در این پژوهش، ویژگی‌ها و ستبری واحدها بر اساس اطلاعات حاصل از چاه بندلنگه-۱، نقشه‌های هم‌ستبر، برخی بیرون‌زدگی‌ها در نواحی مجاور و گزارش‌های چینه‌شناسی اداره زمین‌شناسی مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران تعیین شده‌اند.

شکل ۲- تاق‌دیس بندلنگه (مستطیل زرد رنگ) و موقعیت آن نسبت به ساختمان‌های مجاور. محل گسل پیش‌زرفای زاگرس (ZFF) و گسل پیشانی کوهستان (MFF) بر روی این نقشه نشان داده شده‌است.



Figure 2. The Band-e-Lenge anticline (yellow rectangle) and its position relative to adjacent structures. The locations of the Zagros Foredeep Fault (ZFF) and the Mountain Front Fault (MFF) are indicated on this map.

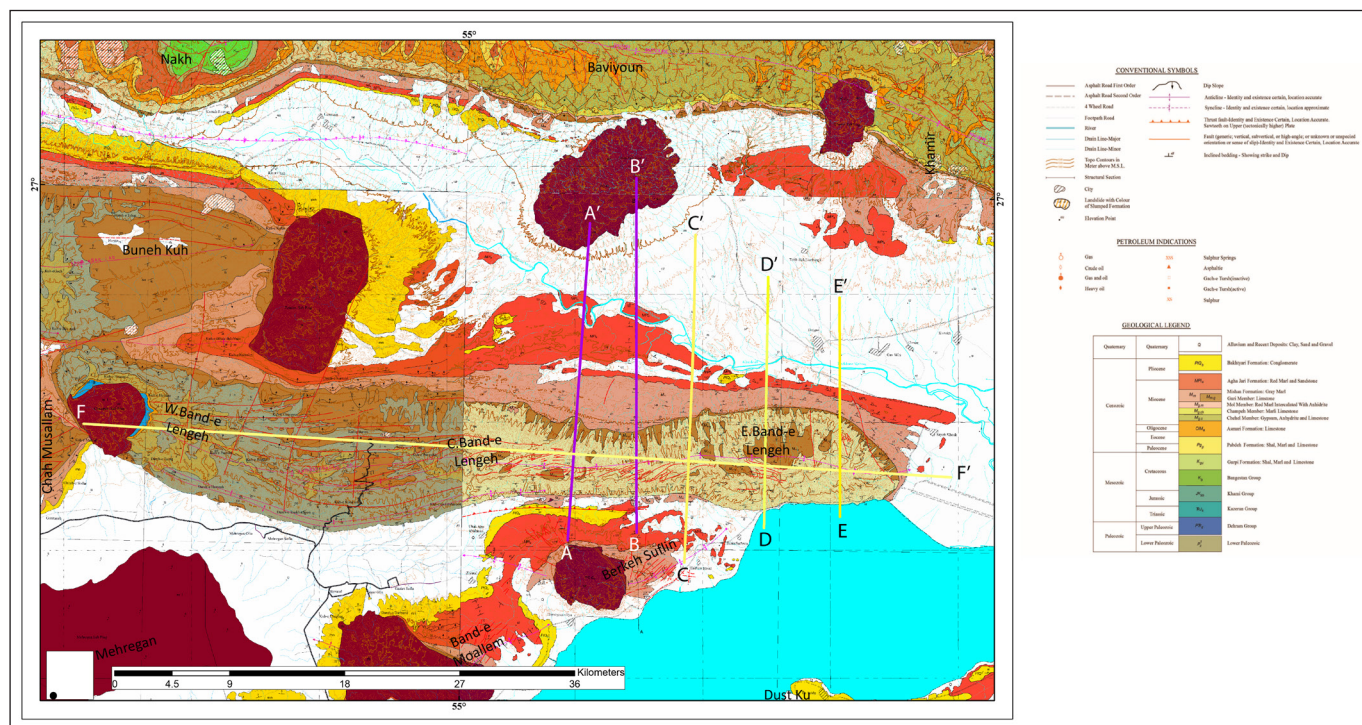


شکل ۳- ستون چینه‌شناسی و چینه‌شناسی مکانیکی ناحیه فارس (Motamedi and Gharabegli, 2019).

Figure 3. Stratigraphy column and mechanical stratigraphy of Fars geological province (Motamedi and Gharabegli, 2019).

(معمدی و همکاران، ۱۳۸۴). سازند کژدمی به‌طور عمده شامل شیل بوده و ستبرای آن در چاه بندلنگه-۱ حدود ۲۴۰ متر برآورد شده‌است. سازند مارنی گورپی با ستبرایی حدود ۲۸۷ متر، جوان‌ترین سازند کرتاسه است. مرز بالایی این سازند با سازند پابده به‌صورت ناپوستگی موازی می‌باشد (معمدی و همکاران، ۱۳۸۴). سازند پابده که توسط سازند معادل آسماری پوشیده شده‌است شامل مارن‌های سیلتی و میان‌لایه‌های فرعی ماسه‌سنگ بوده و ستبرای آن حدود ۷۴۰ متر برآورد شده‌است. سازند معادل آسماری با ستبرای حدود ۴۰ متر در زیر بخش چهل از سازند گچساران قرار دارد. سازند گچساران (شامل بخش‌های چهل، چمپه و مول) متشکل از لایه‌های انیدریت، مارن و نمک است و ستبرای میانگین آن در چاه بند لنگه-۱ حدود ۱۰۷۰ متر می‌باشد. بخشی از ستبرای سازند میشان در منطقه مطالعاتی را بخش آهکی گوری در برمی‌گیرد. آهک گوری با ستبرای بیشینه ۶۰ متر در یال شمالی تاق‌دیس بندلنگه دیده می‌شود. عملکرد گسل‌های عادی در امتداد خاوری-باختری ساختمان بندلنگه منجر به ظهور مکرر این بخش در این تاق‌دیس شده‌است؛ به‌گونه‌ای که در برخی از نقاط به دفعات قابل مشاهده است (معمدی و همکاران، ۱۳۸۴). سازند میشان با سن میوسن در منطقه مورد مطالعه از گسترش وسیعی برخوردار است که عمدتاً شامل مارن‌های خاکستری با میان‌لایه‌های فرعی از آهک‌های شیلی است و در حدود ۶۰۰ تا ۷۰۰ متر ستبرای دارد. در یال شمالی ساختمان بندلنگه، سازند آغاچاری از تناوب ماسه‌سنگ، سیلتستون و مارن تشکیل شده‌است. جوان‌ترین سازند گروه فارس یعنی کنگلومرای بختیاری با سن پلیوسن که به‌طور پراکنده در ناحیه مورد مطالعه دیده می‌شود، به‌صورت ناپوسته بر روی سازند آغاچاری یا سازندهای قدیمی‌تر گروه فارس قرار گرفته است. شکل ۴ نقشه رخمون واحدهای سنگی را در محدوده تاق‌دیس بندلنگه نشان می‌دهد که موقعیت برش‌های ساختاری رسم‌شده در پژوهش حاضر بر روی آن نشان داده شده‌است.

سری نمکی هرمز به سن اینفراکامبرین در قاعده پوشش رسوبی و بر روی پی‌سنگ قرار دارد. بر روی سری هرمز واحدهای سنگی پالئوزویک زیرین واقع شده‌اند. تفسیر برش‌های لرزه‌ای توسط شرکت ملی نفت ایران، ستبرای حدود ۳ کیلومتر را برای واحد پالئوزویک زیرین در پهنه فارس ساحلی پیشنهاد کرده‌است (Motamedi and Gharabeigli, 2019). در این پژوهش با استفاده از نقشه‌های هم‌ستبرای و گزارش‌های چینه‌شناسی زاگرس برای واحد پالئوزویک زیرین ستبرای ۳۱۰۰ متر برآورد گشته و با خطوط لرزه‌ای تبدیل به ژرفا شده نیز کنترل شده‌است. گروه دهرم با سن پرموتریاس شامل سازندهای کنگان و دالان (آهک، دولومیت و انیدریت) در بالا و سازند فراقان (ماسه سنگ و شیل) در قاعده است (Szabo and Kheradpir, 1978; Rahimpour et al., 2010). این گروه مخزنی ذخایر گازی را در منطقه فارس تشکیل می‌دهد. به‌طور کلی ستبرای میانگین این گروه ۱۱۰۰ متر تخمین زده شده‌است. سازند دشتک به سن تریاس میانی به‌عنوان سنگ پوشش سازندهای دالان و کنگان عمل می‌کند و عمدتاً متشکل از لایه‌های انیدریت، آهک و دولومیت به همراه شیل و مارن است (مطیعی، ۱۳۷۲) و ستبرای آن ۸۳۰ متر می‌باشد. مرز بالایی سازند دشتک، سازند نیریز با ستبرایی حدود ۷۰ متر قرار دارد که بر روی آن گروه خامی واقع شده‌است (حسنی و همکاران، ۱۳۸۹). گروه خامی به سن ژوراسیک شامل سازندهای سورمه، هیث، فهلیان، گدوان و داریان است و بیشتر متشکل از آهک و دولومیت و همچنین مقداری شیل می‌باشد (مطیعی، ۱۳۷۲). ستبرای سازندهای داریان، گدوان، فهلیان و هیث از گروه خامی در مجموع و با تلفیق اطلاعات چاه و نقشه‌های هم‌ستبرای تقریباً ۱۰۶۰ متر تخمین زده شده‌است. سازند سورمه از گروه خامی به سبب ستبرای شایان توجه آن (۵۴۰ متر) به‌صورت جداگانه رسم شده‌است. گروه بنگستان شامل سازندهای کژدمی، سروک، سورگه و ایلام می‌باشد که در منطقه مورد مطالعه سازند سورگه گسترش پیدا نکرده است



شکل ۴- نقشه زمین‌شناسی رخمون سطحی گستره مطالعاتی (چاپ شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۵). موقعیت مسیر برش‌های عرضی و طولی بر روی این نقشه مشخص شده‌است. خطوط زرد رنگ در تصویر، مسیر برش‌هایی را نشان می‌دهد که منطبق بر خطوط لرزه‌نگاری برداشت شده می‌باشند.

Figure 4. Geological map of the surface outcrops in the study area (published by the National Iranian Oil Company, 2016). The locations of the cross-sections and longitudinal section are marked on this map. The yellow lines in the image indicate the paths of cross-sections corresponding to the acquired seismic lines.

۲- روش پژوهش

لايه مورد بررسی قرار گرفت. افزون بر این، شاخص‌های هندسی مانند فشردگی چین (Fold Tightness)، تقارن چین (Fold Symmetry)، نسبت ابعاد در برش (Aspect Ratio in Profile) و شاخص سطح هم‌تراز شده (Normalised Area) محاسبه شد. ارزیابی شاخص‌های چین‌خوردگی در راستای هر برش با استفاده از روش‌های متداول (Twiss and Moores, 1992; Fleuty, 1964; Lisle et al., 2006; Bastida et al., 2005) انجام شده‌است.

۳- داده‌ها و اطلاعات

۳-۱- برش‌های ساختاری عرضی و طولی

به‌منظور تحلیل ساختاری چین‌خوردگی و نیز محاسبه میزان کوتاه‌شدگی در تاق‌دیس بندلنگه، ۵ برش ساختاری عرضی و ۱ برش ساختاری طولی رسم شده‌است که در این بخش به آن‌ها پرداخته می‌شود. مسیر برش‌های AA', BB', CC' و FF' منطبق بر خطوط لرزه‌نگاری هستند. برش‌های عرضی AA', BB' و CC' به روش پایستگی طول لایه موازنه شده‌اند.

۳-۲- برش عرضی AA'

این برش در راستای شمالی-جنوبی و با طولی حدود ۲۶ کیلومتر و تقریباً عمود بر سطح محوری تاق‌دیس رسم شده‌است و باختری‌ترین برش عرضی رسم شده در مسیر تاق‌دیس بندلنگه خاوری می‌باشد (شکل‌های ۵-a, b). این تاق‌دیس نامتقارن با پهلوی جنوبی شیب‌دارتر، به سمت جنوب تمایل داشته و در دسته چین‌های ملایم با هندسه جعبه‌ای قرار می‌گیرد. شاخص‌های هندسی محاسبه شده در راستای این برش در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. قدیمی‌ترین رخنمون این برش سازند گچساران است. در سازند گچساران گسل‌های عادی مشاهده می‌شود که البته در ژرفای زیادی ادامه ندارند و در خود سازند گچساران تمام می‌شوند (شکل ۵-a). پهلوی جنوبی تاق‌دیس تحت تاثیر گسل وارون قرار دارد که از سازند دشتک آغاز و در سازند میشان پایان می‌یابد. این گسل موجب افزایش ستبرای سازند دشتک در نزدیکی خود شده‌است؛ به طوری که ستبرای سازند از ۸۳۰ متر به ۱۲۶۷/۶ متر افزایش یافته و ستبرشدگی ۴۳۷/۶ متری را نشان می‌دهد (جدول ۵). در این برش سازند دشتک به‌عنوان افق جدایش میانی فعال بوده و جابه‌جایی محوری از راس آن نسبت به گروه دهرم ۱۸۱۶/۵ متر به سمت پس‌بوم است. ژرفای جدایش تا سطح افق جدایش قاعده‌ای در این برش به روش محاسبه مساحت برافزوده (Excess Area) برای سازند معادل آسماری ۱۰۷۶۵- متر برآورد شده‌است. میانگین کوتاه‌شدگی بر اساس موازنه برش به روش پایستگی طول لایه در این برش ۳/۵۴ درصد محاسبه شده‌است (شکل‌های ۵-b, c).

راهکار این نوشتار برای تحلیل ساختاری تاق‌دیس بندلنگه خاوری ترسیم ۶ برش ساختاری (۵ برش عرضی و ۱ برش طولی) با استفاده از داده‌های خطوط لرزه‌نگاری بازتابی، اطلاعات چاه بندلنگه-۱، نقشه زمین‌شناسی منطقه، نقشه‌های هم‌ستبرای، نقشه مدل ارتفاعی-رقومی (DEM) و همچنین اندازه‌گیری‌های صورت گرفته از مشخصات هندسی لایه‌بندی (امتداد و شیب) می‌باشد. جهت رسم برش‌های زمین‌شناسی، تمامی داده‌های سطحی و زیرسطحی در محیط نرم‌افزار 2D-3D-Move (یک نرم‌افزار مدل‌سازی زمین‌شناسی ساختاری و نفتی که در سال ۲۰۱۷ توسط شرکت Petex عرضه شد)، تلفیق شدند. این فرایند شامل چهار گام اصلی و به شرح زیر انجام شد: در ابتدا بررسی و آماده‌سازی نقشه‌های مورد استفاده در برش‌های ساختاری، در محیط نرم‌افزار Arc GIS انجام گرفت. تمامی نقشه‌های مورد نیاز برای رسم برش‌ها در این نرم‌افزار زمین‌مرجع شدند. نیمرخ‌های توپوگرافی با مختصات سه‌بعدی در نرم‌افزار Global Mapper تهیه شد و سپس با فرمت‌های مناسب به محیط نرم‌افزار 2D-3D-Move انتقال داده شده‌اند. در نخستین گام از رسم برش‌ها، داده‌های برداشت شده از مطالعات صحرایی و اطلاعات موجود در نقشه‌های زمین‌شناسی بر روی توپوگرافی مسیر برش پیاده‌سازی شدند. داده‌های سطحی شامل جهت‌یابی لایه‌ها، محل همبری سازندها، گسل‌های برداشت شده در سطح و ناپیوستگی‌ها بود. افزون بر این، داده‌های چاه، از جمله محل سرسازندها و داده‌های شیب‌سنجی لایه‌ها، نیز در مسیر برش طولی اعمال شدند. در گام دوم از رسم برش‌های ساختاری، نیمرخ‌های لرزه‌ای با اعمال مدل‌های سرعتی مناسب از زمان به ژرفا تبدیل شدند. در گام سوم، با تلفیق تمامی داده‌های سطحی و زیرسطحی، تفسیر ساختاری انجام شد. رسم برش‌های ساختاری با استفاده از الگوی شکنجی (Kink Method) و تعیین پهنه‌های شیب (Dip Domain) در محیط نرم‌افزار 2D-3D-Move صورت گرفت. در گام چهارم، برای آزمایش موازنه بودن (Balancing) برش‌های عرضی، آنالیز حرکات و لغزش گسل و محاسبه میزان و درصد کوتاه‌شدگی لایه‌ها در هر برش، با فرض پایستگی طول لایه در محیط نرم‌افزار 2D-3D-Move اقدامات لازم صورت پذیرفت. شایان یادآوری است که کوتاه‌شدگی محاسبه شده در این مطالعه، تنها کوتاه‌شدگی هندسی ناشی از چین‌خوردگی و گسلس را نمایش می‌دهد.

در نهایت، پس از رسم برش‌های ساختاری، نقشه ژرفایی افق هدف اکتشاف (گروه دهرم) در نرم‌افزار Petrel تهیه شد. این نقشه به‌عنوان یکی از مهم‌ترین نتایج این پژوهش، هندسه افق مخزنی را در تاق‌دیس مورد مطالعه مشخص می‌کند.

در این پژوهش، به منظور تعیین مدل هندسی چین و تحلیل کمی-آماری سبک و هندسه چین‌خوردگی تاق‌دیس بندلنگه خاوری، اندازه‌گیری شاخص‌های هندسی این تاق‌دیس بر روی سازند معادل آسماری انجام گرفته است. در این راستا، ویژگی‌های هندسی چین شامل زاویه بین‌یالی، شیب گسل، شیب پس‌یال و پیش‌یال، ستبرای و طول

جدول ۱- تقسیم‌بندی تاق‌دیس بندلنگه خاوری بر اساس شاخص هندسی فشردگی چین (Fleuty, 1964) و میزان ملایم بودن چین (G). در هر برش، اندازه‌گیری‌های لازم بر روی سازند معادل آسماری صورت گرفته‌است. طبق محاسبات انجام شده، به‌طور کلی تاق‌دیس مورد مطالعه در رده یک چین ملایم قرار می‌گیرد.

Table 1. Classification of the East Band-e-Lengeh anticline based on the fold tightness geometric index (Fleuty, 1964) and the fold gentleness geometric index (G). The necessary measurements were taken on the Asmari equivalent formation in each cross-section. The studied anticline is generally classified as a gentle fold according to the calculations.

Cross Section	Dip of the Northern Limb	Dip of the Southern Limb	Interlimb Angle (i)	Folding Angle (ϕ)	Gentleness ($G = i/\phi$)	Descriptive Term
AA'	74.08°	60.06°	134.14°	45.86°	2.92, G>2	Gentle
BB'	81.71°	69.91°	151.62°	28.38°	5.34, G>2	
CC'	78.19°	69.05°	147.24°	32.76°	4.49, G>2	
DD'	72.3°	69.51°	141.81°	38.19°	3.71, G>2	
EE'	57.87°	82.6°	140.47°	39.53°	3.55, G>2	

جدول ۲- اندازه‌گیری شاخص هندسی تقارن چین (S) در برش‌های عرضی ترسیم‌شده از تاقدیس بندلنگه خاوری به روش تویس و مورز (Twiss and Moores, 1992). در هر برش، اندازه‌گیری‌های لازم بر روی سازند معادل آسماری صورت گرفته‌است. میانگین مقدار این شاخص ۱/۰۵. محاسبه شده‌است و به‌طور کلی این تاقدیس در رده یک چین تقریباً متقارن قرار می‌گیرد.

Table 2. Measurement of the fold symmetry geometric index (S) in the drawn cross-sections of the East Band-e-Lengeh anticline using the method of Twiss and Moores (1992). The necessary measurements were taken on the Asmari equivalent formation in each cross-section. The average value of this index is calculated as 1.05, and the anticline is generally classified as an almost symmetric fold.

Cross Section	β_1	β_2	$S = \beta_1/\beta_2$	Descriptive Term
AA'	74.08°	60.06°	$S = 1.23, S > 1$	Asymmetric Fold, Vergence to South
BB'	81.71°	69.91°	$S = 1.16, S > 1$	Asymmetric Fold, Vergence to South
CC'	78.19°	69.05°	$S = 1.13, S > 1$	Asymmetric Fold, Vergence to South
DD'	72.3°	69.51°	$S = 1.04, S > 1$	Almost Symmetric
EE'	57.87°	82.6°	$S = 0.70, S < 1$	Asymmetric Fold, Vergence to North

جدول ۳- محاسبه شاخص هندسی نسبت ابعاد در برش (P) بر اساس تقسیم‌بندی لیزل و همکاران (Lisle et al., 2006). در هر برش، اندازه‌گیری‌های لازم بر روی سازند معادل آسماری صورت گرفته‌است. میزان نسبت ابعاد یال‌ها در یال‌های شمالی به‌طور میانگین ۰/۲۲ و در یال‌های جنوبی به‌طور میانگین ۰/۲۶ می‌باشد. باتوجه به محاسبات صورت گرفته، تاقدیس بندلنگه خاوری در رده چین‌های پهن (یال شمالی) تا گسترده (یال جنوبی) قرار می‌گیرد.

Table 3. Calculation of the fold aspect ratio in profile index (P) based on the classification of Lisle et al. (2006). The necessary measurements were taken on the Asmari equivalent formation in each cross-section. The average aspect ratio of the northern limbs is 0.22, and the average aspect ratio of the southern limbs is 0.26. Based on the calculations, the East Band-e-Lengeh anticline is classified as a wide fold (northern limb) to a Broad fold (southern limb).

Cross Section	Amplitude (A) (m)	Aspect Ratio (P) in the Northern Limb			Aspect Ratio (P) in the Southern Limb		
		Breadth (B) (m)	$P = A/B$	Descriptive Term	Breadth (B) (m)	$P = A/B$	Descriptive Term
AA'	438.8	3210	$P = 0.13$	Wide	2699	$P = 0.16$	Wide
BB'	484.2	4540	$P = 0.11$	Wide	1943	$P = 0.25$	Wide
CC'	622.1	3568.3	$P = 0.17$	Wide	2520.2	$P = 0.28$	Wide
DD'	934.3	2983.5	$P = 0.31$	Broad	3183.7	$P = 0.29$	Broad
EE'	765.2	2044.3	$P = 0.37$	Broad	2459.4	$P = 0.31$	Broad

جدول ۴- محاسبه شاخص هندسی سطح هم‌تراز شده بر اساس تقسیم‌بندی باستیدا و همکاران (Bastida et al., 2005). در هر برش، اندازه‌گیری‌های لازم بر روی سازند معادل آسماری صورت گرفته‌است. هندسه کلی تاقدیس بندلنگه خاوری بر اساس شاخص هندسی سطح هم‌تراز شده، یک چین بیضوی تا جمبه‌ای می‌باشد.

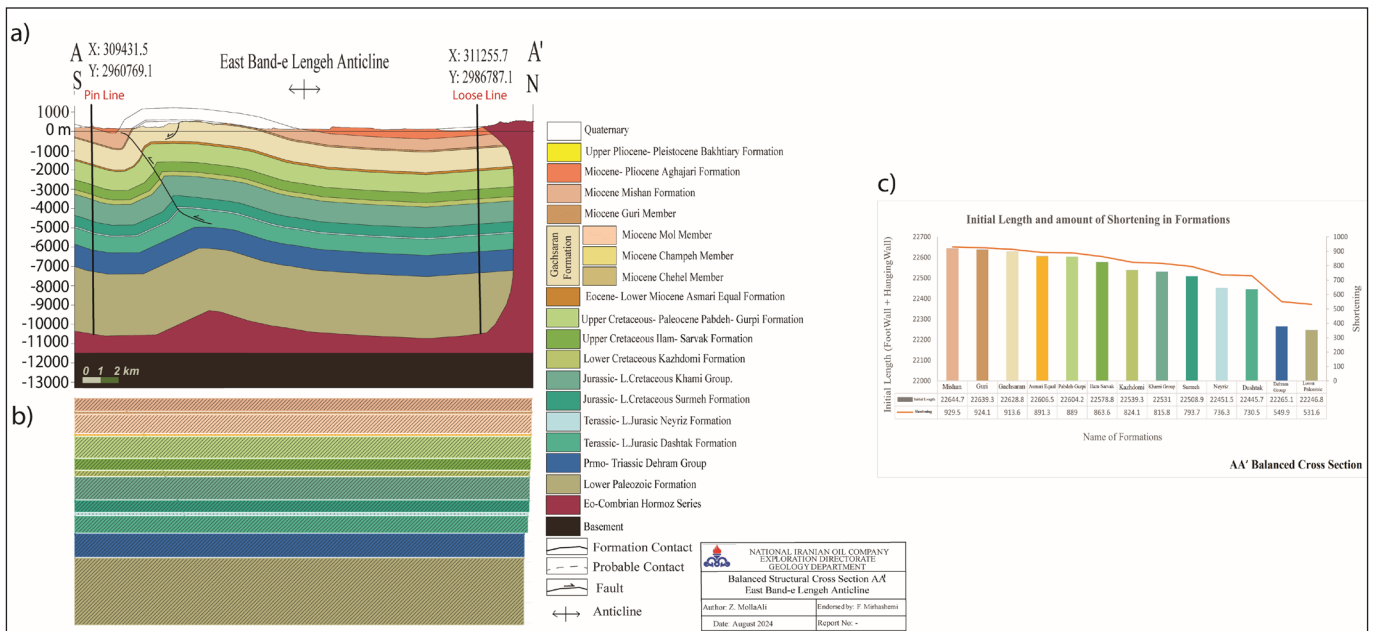
Table 4. Calculation of the normalised area geometric index (α) based on the classification of Bastida et al. (2005). The necessary measurements were taken on the Asmari equivalent formation in each cross-section. The overall geometry of the eastern Band-e-Lengeh anticline, based on the normalized area geometric index, is an elliptical to box-shaped fold.

Cross Section	Area Under Fold (m ²)	Total Area Under Chevron Fold (m ²)	Normalised Area (α)	Descriptive Term
AA'	2267363	1416290	1.6	Box
BB'	2214247	1383189	1.59	Box
CC'	2765794	1795136	1.52	Elipse
DD'	5566176	3809005	1.46	Elipse
EE'	5467968	4074759	1.34	Elipse

جدول ۵- میزان جابه‌جایی محوری ایجاد شده توسط عملکرد سازند دشتک. اندازه‌گیری‌ها از راس سازند دشتک نسبت به راس گروه دهرم انجام شده‌است. علامت مثبت (+) برای جابه‌جایی محوری به سمت پیش‌بوم و علامت منفی (-) برای جابه‌جایی محوری به سمت پس‌بوم و مناطق داخلی در نظر گرفته شده‌است. ستبرای اولیه سازند دشتک ۸۳۰ متر بوده‌است.

Table 5. Axial shift created by the activity of the Dashtak formation. Measurements were taken from the top of the Dashtak formation relative to the top of the Dehrham group. A positive (+) sign represents an axial shift towards the foreland, while a negative (-) sign indicates an axial shift towards the backland and internal areas. The initial thickness of the Dashtak formation was 830 meters.

Cross Section	Axial Shift (m)	Thickness of Dashtak Formation Near the Fault (m)	Thickening of Dashtak Formation (m)
AA'	-1816.5	1267.6	437.6
BB'	-1143.5	1271.3	441.3
CC'	-802.7	1337.9	507.9
DD'	-858	1204.3	374.3
EE'	0	830	0



شکل ۵-۵- برش عرضی موازنه‌شده AA' بر اساس پایستگی طول لایه. در این برش، هندسه دو افق نزدیک به سطح (سازند میشان و بخش گوری) بازسازی شده‌است. (b) وضعیت اولیه سازندها پس از حذف اثر کوتاه‌شدگی ناشی از چین‌خوردگی و گسلس. (c) نمودار دو متغیره میزان طول اولیه سازندها (نمودار خطی) و میزان کوتاه‌شدگی (نمودار خطی) آن‌ها در برش عرضی موازنه‌شده AA'. مقدار بیشینه طول اولیه و بیشینه میزان کوتاه‌شدگی مربوط به سازند میشان (به ترتیب، ۲۲۶۴۴/۷ متر و ۹۲۹/۵ متر) و کمینه طول اولیه و میزان کوتاه‌شدگی مربوط به افق پالئوزویک زیرین (به ترتیب، ۲۲۲۴۶/۸ متر و ۵۳۱/۶ متر) می‌باشد. در این نمودار هر سازند با رنگ استاندارد (RGB) مخصوص خود نمایش داده شده‌است.

Figure 5- a) Balanced cross-section AA' based on layer length conservation. In this section, the geometry of two near-surface horizons (Mishan formation and Guri member) has been reconstructed. b) The initial state of the formations after removing the effects of shortening caused by folding and faulting. c) Bivariate chart showing the initial lengths of formations (bar chart) and their shortening amounts (line chart) in the balanced cross-section AA'. The maximum initial length and maximum shortening correspond to the Mishan formation (22,644.7 m and 929.5 m, respectively), while the minimum initial length and shortening correspond to the Lower Paleozoic horizon (22,246.8 m and 531.6 m, respectively). In this chart, each formation is represented with its specific standard (RGB) color.

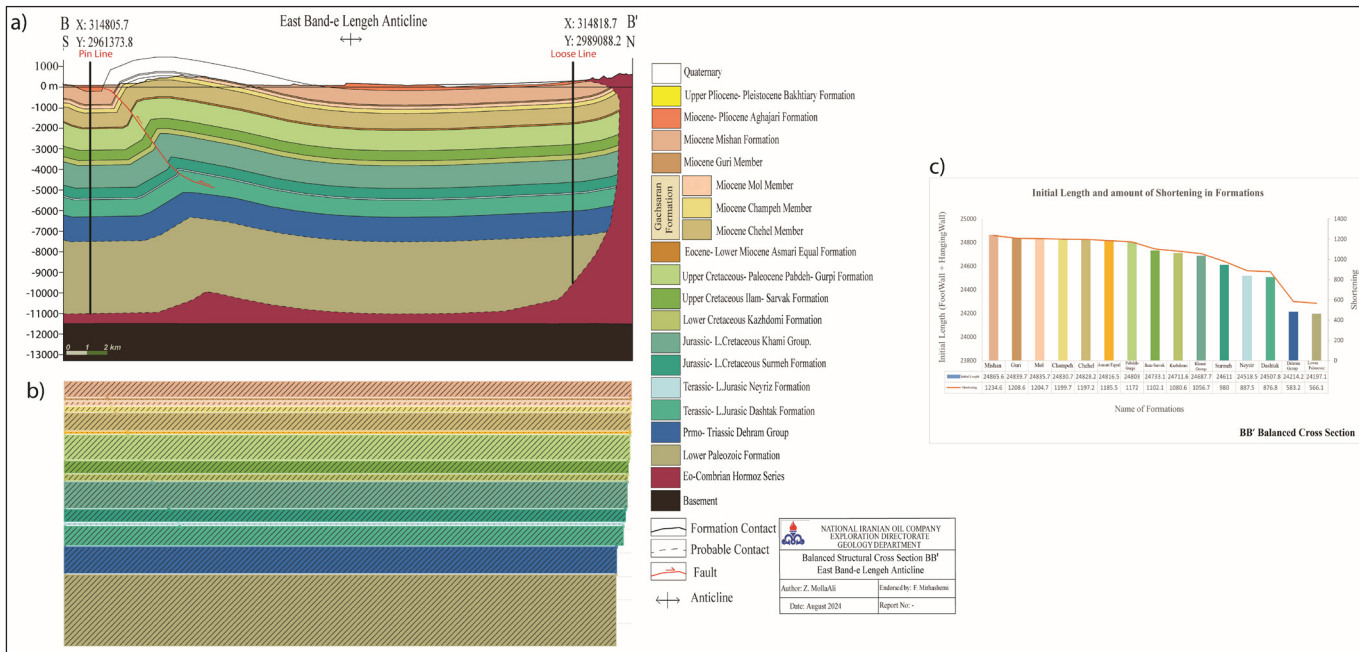
هندسی در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ ارائه شده‌اند. قدیمی‌ترین رخنمون این برش بخش چهل از سازند گچساران است. ژرفای جدایش بر اساس محاسبات به روش مساحت برافزوده برای سازند معادل آسماری ۱۰۵۰۹- متر برآورد شده‌است. پهلوی جنوبی تاق‌دیس با گسل راندگی بریده شده‌است. این گسل از سازند دشتک منشأ گرفته و در

۳-۳- برش عرضی BB'

این برش در راستای شمالی-جنوبی و با طولی حدود ۲۷/۷ کیلومتر و تقریباً عمود بر سطح محوری تاق‌دیس رسم شده‌است (شکل ۶-۵). چین موجود در این برش در گروه ملایم شاخص فشرده‌گی قرار داشته و تمایل به سمت جنوب دارد. سایر شاخص‌های

جابه‌جایی محوری از راس سازند دشتک نسبت به گروه دهرم ۱۱۴۳/۵ متر به سمت پس‌بوم می‌باشد (جدول ۵). میانگین کوتاه‌شدگی بر اساس موازنه برش به روش پایستگی طول لایه در این برش ۴/۲ درصد محاسبه شده‌است (شکل‌های ۶- b, c).

سازند میشان مستهلک می‌شود. تاثیر گسل سبب افزایش ستبرای سازند دشتک در این بخش شده‌است. ستبرای این سازند از ۸۳۰ متر در قسمت‌های فرادواره و فرودواره گسل به ۱۲۷۱/۳ متر در مجاورت گسل افزایش یافته و ۴۴۱/۳ متر ستر شده‌است.



شکل ۶- a) برش عرضی موازنه شده BB' بر اساس پایستگی طول لایه. هندسه چهار افق نزدیک به سطح (سازند میشان و بخش‌های گوری، مول و چمپه) بازسازی شده‌است. (b) وضعیت اولیه سازندها پس از حذف اثر کوتاه‌شدگی ناشی از چین‌خوردگی و گسلش. (c) نمودار دو متغیره میزان طول اولیه سازندها (نمودار میله‌ای) و میزان کوتاه‌شدگی (نمودار خطی) آن‌ها در عرض برش BB'. بیشینه طول اولیه و بیشینه میزان کوتاه‌شدگی مربوط به سازند میشان (به ترتیب، ۲۴۸۶۵/۶ متر و ۱۲۳۴/۶ متر) و کمینه طول اولیه و میزان کوتاه‌شدگی مربوط به افق پالئوزویک زیرین (به ترتیب، ۲۴۱۹۷/۱ متر و ۵۶۶/۱ متر) می‌باشد. در این نمودار هر سازند با رنگ استاندارد (RGB) خود نمایش داده شده‌است.

Figure 6- a) Balanced cross-section BB' based on layer length conservation. The geometry of four near-surface horizons (Mishan formation and the Guri, Mol, and Champ members) has been reconstructed. b) The initial state of the formations after removing the effects of shortening caused by folding and faulting. c) The bivariate chart shows the initial length of the formations (bar chart) and the amount of shortening (line chart) along the cross-section BB'. The maximum initial length and the maximum amount of shortening correspond to the Mishan formation (6,24865 meters and 1,234 meters, respectively), while the minimum initial length and amount of shortening correspond to the Lower Paleozoic horizon (24,197 meters and 566 meters, respectively). Each formation is displayed in its standard color (RGB) in this chart.

میانگین کوتاه‌شدگی بر اساس موازنه برش به روش پایستگی طول لایه در عرض این برش ۴/۱۱ درصد محاسبه شده‌است (شکل‌های ۷- c, d).

۴-۳- برش عرضی CC'

این برش در راستای شمالی-جنوبی و با طولی حدود ۲۵/۶ کیلومتر و دارای اطلاعات خطوط لرزه‌نگاری می‌باشد (شکل‌های ۷- a, b). قدیمی‌ترین رخنمون در این برش سازند گچساران است. این چین‌ناهمقارن که تمایلی به سمت جنوب دارد در رده یک چین ملایم قرار گرفته و دارای هندسه بیضوی تا جعبه‌ای می‌باشد. سایر شاخص‌های هندسی اندازه‌گیری شده در راستای این برش در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ آمده‌است. بر اساس تفسیر خطوط لرزه‌نگاری (شکل ۷- a)، در این برش، یال جنوبی توسط گسلی وارون با منشا سازند دشتک تحت تأثیر قرار گرفته است. در محدوده گسل، ستبرای سازند دشتک افزایش پیدا کرده‌است به گونه‌ای که جابه‌جایی محوری از راس سازند دشتک نسبت به راس گروه دهرم ۸۰۲/۷ متر به سمت پس‌بوم است (جدول ۵). ستبرای سازند دشتک در محدوده گسل ۱۳۳۸ متر است که نسبت به ستبرای اولیه ۸۳۰ متر، ستبراشدگی زمین‌ساختی به اندازه ۵۰۸ متر دارد. طبق محاسبات انجام‌شده، ژرفای جدایش تا سطح سری هرمز برای سازند معادل آسماری ۱۰۵۹۱- متر می‌باشد.

۵-۳- برش عرضی DD'

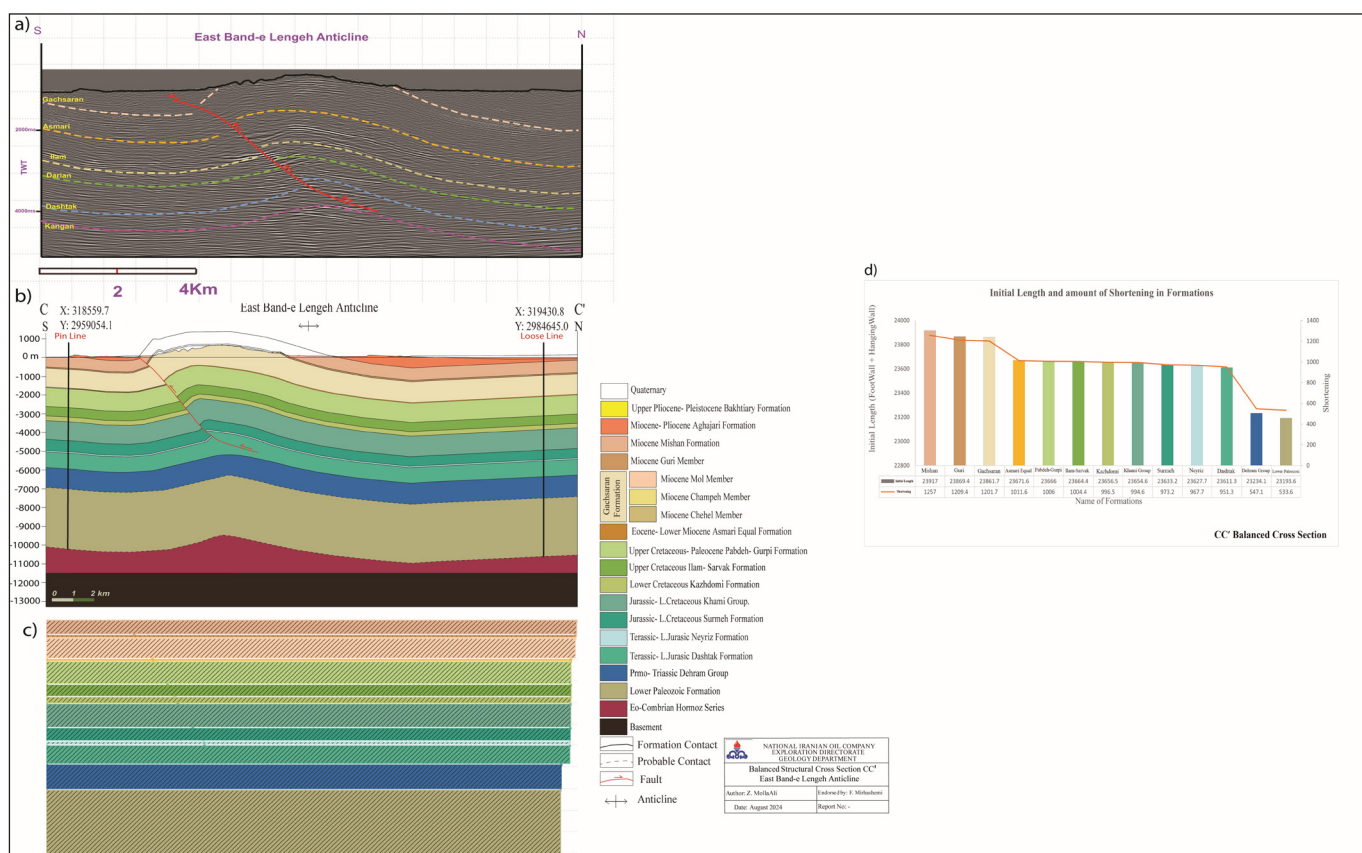
این برش در راستای شمالی-جنوبی و با طولی حدود ۱۹/۶ کیلومتر و منطبق بر خط لرزه‌نگاری برداشت‌شده در قسمت خاوری تاق‌دیس بندلنگه می‌باشد (شکل ۸). قدیمی‌ترین رخنمون این برش سازند گچساران است. یال‌های شمالی و جنوبی این تاق‌دیس شیب مشابهی دارند که بین ۱۷ تا ۳۶ درجه متغیر است، بنابراین چین تقریباً متقارن به نظر می‌رسد. مقدار شاخص هندسی تمایل چین (S) نیز ۱/۰۴ به دست آمده‌است که تقارن چین را تأیید می‌کند (شاخص‌های هندسی اندازه‌گیری شده در راستای این برش در جدول‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ آمده‌است). بر اساس مطالعات میدانی که در طول این پژوهش انجام شده‌است، گسل‌های عادی موازی با سطح محوری چین

رسم‌شده در تاق‌دیس بندلنگه است (شکل ۹). قدیمی‌ترین رخنمون این برش سازند گچساران بوده و رسوبات کنگلومرای بختیاری به صورت دگرشیب بر روی سازند آغا‌جاری قرار دارند (شکل ۹-ب). یال‌های شمالی و جنوبی تاق‌دیس شیب یکسانی ندارند و تاق‌دیس به صورت نامتقارن دیده می‌شود. شاخص هندسی تقارن چین برابر ۰/۷ محاسبه شده‌است که نشان‌دهنده تمایل چین به سمت شمال است (شاخص‌های هندسی اندازه‌گیری شده در راستای این برش در جدول‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ آمده‌است). بر اساس اطلاعات زیرسطحی حاصل از تفسیر خطوط لرزه‌نگاری، در این برش گسلی مشاهده نشده‌است (شکل ۹-ا). ستبرای سازند دشتک در تمام طول برش ثابت بوده و افزایش ستبرای و جابه‌جایی محوری از راس سازند دشتک به راس گروه دهرم مشاهده نمی‌شود.

در یال جنوبی مشاهده شده‌اند که ژرفای کمی دارند و جابه‌جایی‌های آن‌ها در سازند گچساران مستهلک می‌شود (شکل ۱۱-ج). بر اساس اطلاعات زیرسطحی حاصل از تفسیر خطوط لرزه‌نگاری (شکل ۸-ا)، یال جنوبی تحت تأثیر گسل وارونی است که از سازند دشتک منشأ گرفته و تا سازند میشان ادامه دارد. این گسل سبب افزایش ستبرای سازند دشتک از ۸۳۰ متر به ۱۲۰۴ متر در اطراف گسل شده که موجب جابه‌جایی محوری به اندازه ۸۵۸ متر (به سمت پس‌بوم) نسبت به راس گروه دهرم شده‌است (جدول ۵).

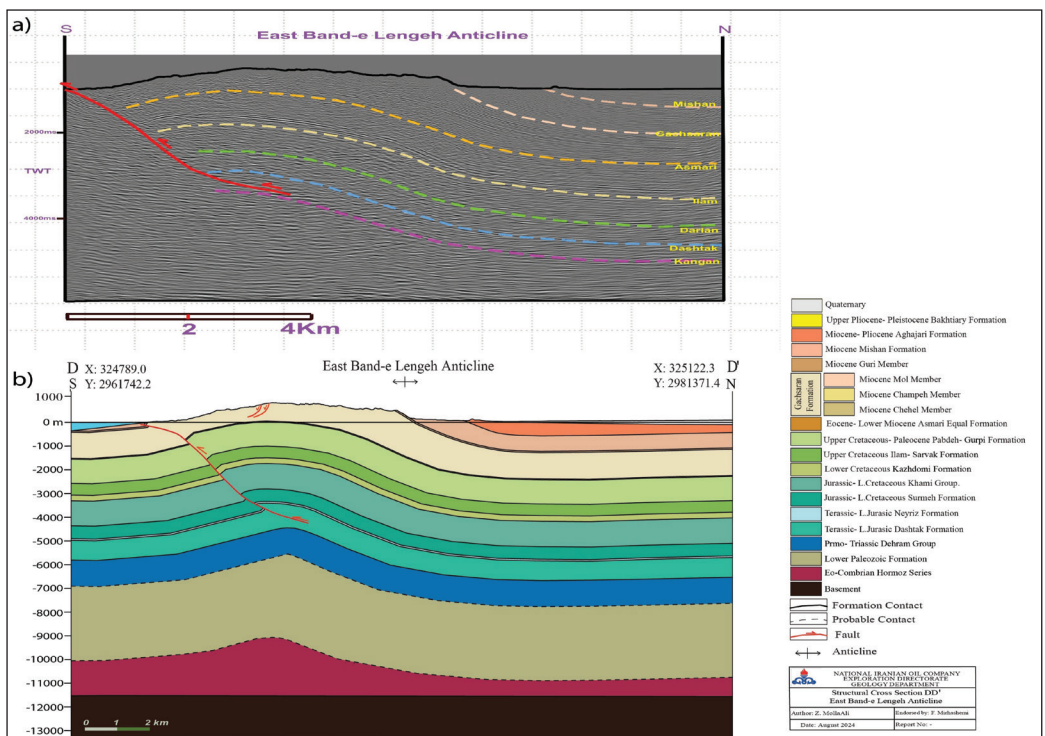
۳-۶- برش عرضی EE'

برش EE' با طول ۱۷ کیلومتر در راستای شمالی-جنوبی، خاوری‌ترین برش عرضی



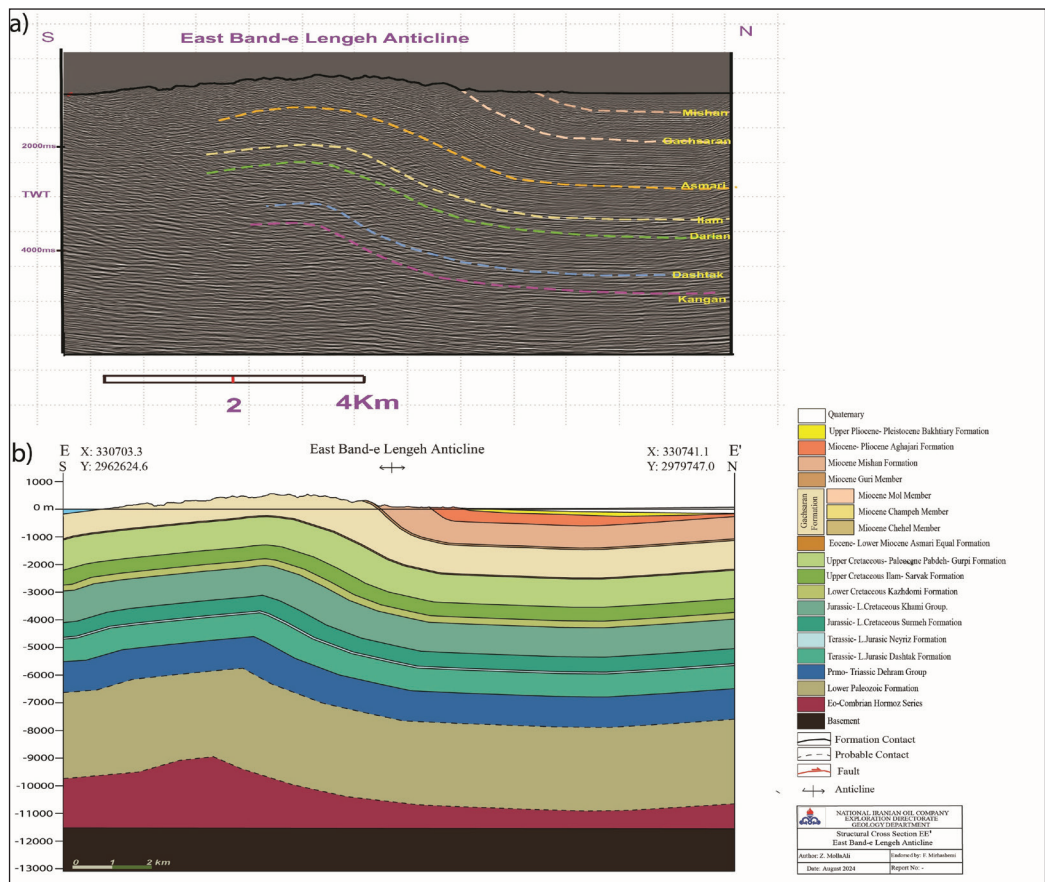
شکل ۷-ا) تفسیر زمانی (TWT) مربوط به خط لرزه‌نگاری منطبق بر برش عرضی CC'. افت کیفیت در تصویر، وجود یک گسل را در سازند دشتک نشان می‌دهد. برش عرضی موازنه‌شده CC' بر اساس پایستگی طول لایه. هندسه دو افق نزدیک به سطح (سازند میشان و بخش گوری) بازسازی شده‌است. (ب) وضعیت اولیه سازندها پس از حذف اثر کوتاه‌شدگی ناشی از چین‌خوردگی و گسلس. نمودار دو متغیره میزان طول اولیه سازندها (نمودار میله‌ای) و میزان کوتاه‌شدگی (نمودار خطی) آن‌ها در برش عرضی موازنه‌شده CC'. مقدار بیشینه طول اولیه و بیشینه میزان کوتاه‌شدگی مربوط به سازند میشان (به ترتیب، ۲۳۹۱۷/۰ متر و ۱۲۵۷/۰ متر) و کمینه طول اولیه و میزان کوتاه‌شدگی مربوط به افق پالئوزوئیک زیرین (به ترتیب، ۲۳۱۹۳/۶ متر و ۵۳۳/۶ متر) می‌باشد. در این نمودار هر سازند با رنگ استاندارد (RGB) مخصوص خود نمایش داده شده‌است.

Figure 7-a) Time interpretation (TWT) of the seismic line corresponding to cross-section CC'. The quality drop in the image indicates the presence of a fault within the Dashtak formation. b) Balanced cross-section CC' based on layer length conservation. The geometry of two near-surface horizons (Mishan formation and the Guri member) has been reconstructed. c) The initial state of the formations after removing the effects of shortening caused by folding and faulting. d) The bivariate chart shows the initial length of the formations (bar chart) and their amount of shortening (line chart) along the balanced cross-section CC'. The maximum initial length and the maximum amount of shortening correspond to the Mishan formation (23,917 meters and 1,257 meters, respectively), while the minimum initial length and amount of shortening correspond to the Lower Paleozoic horizon (23,193 meters and 533 meters, respectively). Each formation is displayed in its standard color (RGB) in this chart.



شکل ۸-ا) تفسیر زمانی (TWT) مربوط به خط لرزه‌نگاری منطبق بر برش عرضی DD'. افت کیفیت در بازتابنده‌ها، وجود یک گسل را در سازند دشتک نشان می‌دهد. (ب) برش عرضی DD'. در مسیر این برش، گسل‌های عادی با راستای تقریباً موازی با اثر سطح محوری چین در یال جنوبی مشاهده می‌شود. این گسل‌ها ژرفای کمی دارند و جابه‌جایی آن‌ها در سازند گچساران مستهلک می‌گردد.

Figure 8- a) Time interpretation (TWT) related to the seismic line corresponding to the cross-section DD'. A decrease in reflector quality indicates the presence of a fault in the Dashtak formation. b) Cross-section DD'. Along the path of this section, normal faults with a nearly parallel orientation to the axial surface of the fold are observed on the southern limb. These faults have shallow depths, and their displacements are accommodated within the Gachsaran formation.



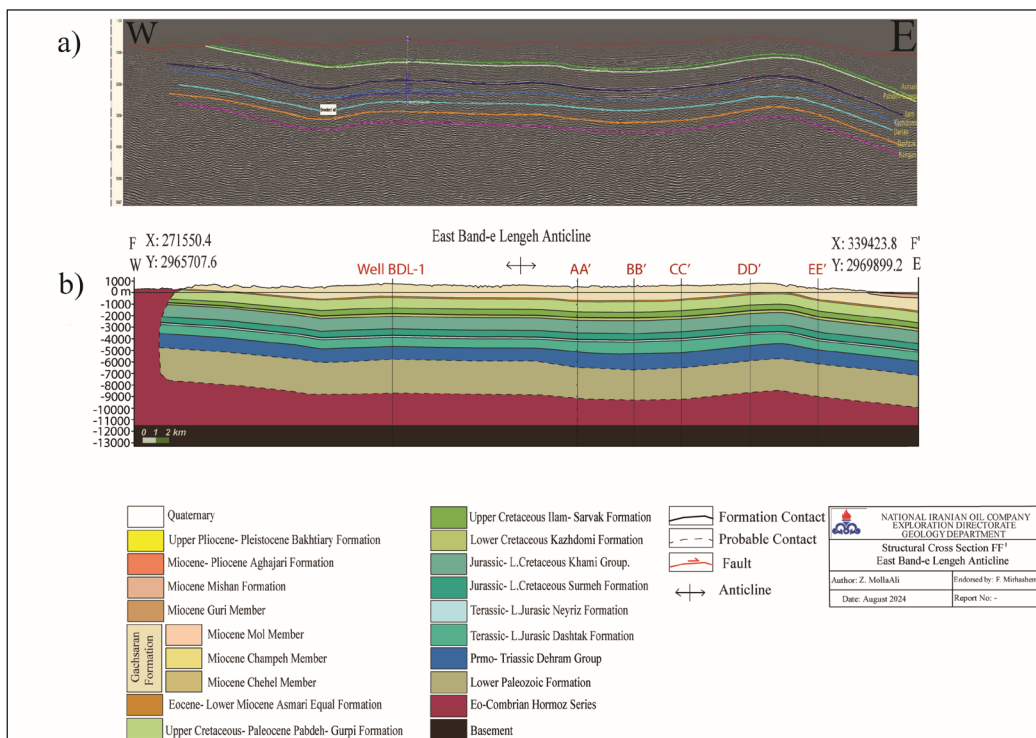
شکل ۹-ا) تفسیر زمانی (TWT) مربوط به خط لرزه‌نگاری منطبق بر برش عرضی EE'. در این نیمرخ لرزه‌ای، گسلی وجود ندارد و جابه‌جایی محوری ناشی از عملکرد سازند دشتک نیز مشاهده نمی‌شود. (ب) برش عرضی EE'. در این برش، سبزی سازند دشتک در عرض برش ثابت بوده و سبزشدگی مشاهده نمی‌شود. در ناودیس شمالی، رسوبات کنگلومرای بختیاری به‌صورت دگرشیب بر روی سازند آغاچاری قرار گرفته‌اند.

Figure 9- a) Time interpretation (TWT) related to the seismic line corresponding to the cross-section EE'. In this seismic profile, no fault is present, and axial displacement due to the activity of the Dashtak formation is also not observed. b) Cross-section EE'. In this section, the thickness of the Dashtak formation is constant across the section, and thickening is not observed. In the northern anticline, the Bakhtiari conglomerate deposits are unconformably overlaid on the Aghajari formation.

۳-۷- برش طولی FF'

تاقدیس به سه بخش خاوری، مرکزی و باختری تقسیم می‌شود. در این برش طولی، بین خطوط AA'، BB' و CC' فروافتادگی دیده می‌شود که علت آن زین سان نسبتا ملایمی میان بخش‌های خاوری و مرکزی است. همچنین، بخش مرکزی با زین سان ملایم‌تری از بخش باختری جدا می‌شود. سازند دشتک از برش AA' تا DD' کمی نسبت به جاهای دیگر برش طولی ستبرشدگی نشان می‌دهد که علت آن عملکرد گسل‌های وارون در یال جنوبی تاقدیس می‌باشد. بین برش‌های DD' و EE' ستبرشدگی کمتر است و در محدوده برش EE' تقریبا تغییری در ستبرای سازند دشتک دیده نمی‌شود.

این برش در راستای خاوری-باختری به موازات محور تاقدیس بندلنگه و عمود بر برش‌های عرضی ساختاری با طولی حدود ۶۸ کیلومتر رسم شده است و مسیر آن از چاه بندلنگه-۱ نیز می‌گذرد (شکل ۱۰-ب). هدف از رسم این برش طولی، بررسی ارتباط میان بخش‌های خاوری، مرکزی و باختری تاقدیس بندلنگه و تایید صحت برش‌های عرضی بوده و از آن در تهیه نقشه ژرفایی گروه دهرم نیز استفاده شده است. بر اساس برش طولی رسم‌شده با استفاده از تفسیر خط لرزه‌نگاری طولی (شکل ۱۰-ا)، این



شکل ۱۰-ا) تفسیر زمانی (TWT) مربوط به خط لرزه‌نگاری منطبق بر برش طولی FF'. برش طولی FF' که به موازات سطح محوری چین و در راستای خاوری-باختری به طول تقریبا ۶۸ کیلومتر رسم شده است. مسیر این برش از چاه بندلنگه-۱ می‌گذرد.

Figure 10- a) Time interpretation (TWT) of the seismic line corresponding to longitudinal section FF'. b) Longitudinal section FF' is drawn parallel to the axial surface of the fold and along the east-west direction with a length of approximately 68 kilometers. The path of this section passes through the Band-e-Lengeh-1 well.

۴-۱- افق‌های جدایشی و سازوکار چین‌خوردگی در تاقدیس بندلنگه

هندسه تقریبا متقارن تاقدیس‌ها در منطقه فروافتادگی لنگه و توسعه گسل‌های راندگی و وارون در پهلوهای آن‌ها و به بیان دیگر، توسعه ساختارهایی که تمایل به سمت پس‌بوم دارند نشان می‌دهد که یک افق جدایشی تاثیرگذار با گرانروی و اصطکاک کم در قاعده واحدهای در حال چین‌خوردگی حضور دارد (معمدی و همکاران، ۱۳۹۱). الگوی واگرایی بازتابنده‌های لرزه‌ای به سمت هسته تاقدیس در قاعده لایه‌های چین‌خورده گویای آن هستند که چین‌خوردگی به‌طور کامل در بالای این افق رخ داده است. با استناد به سبک چین‌خوردگی و حضور گنبد‌های نمکی (گنبد نمکی چمپه در دماغه باختری تاقدیس بندلنگه، شکل ۱۲) می‌توان گفت که تبخیری‌های سری هرمز به سن اینفراکامبرین افق جدایش اصلی در منطقه مورد

۳-۸- شاخص‌های هندسی اندازه‌گیری شده بر روی تاقدیس بندلنگه خاوری

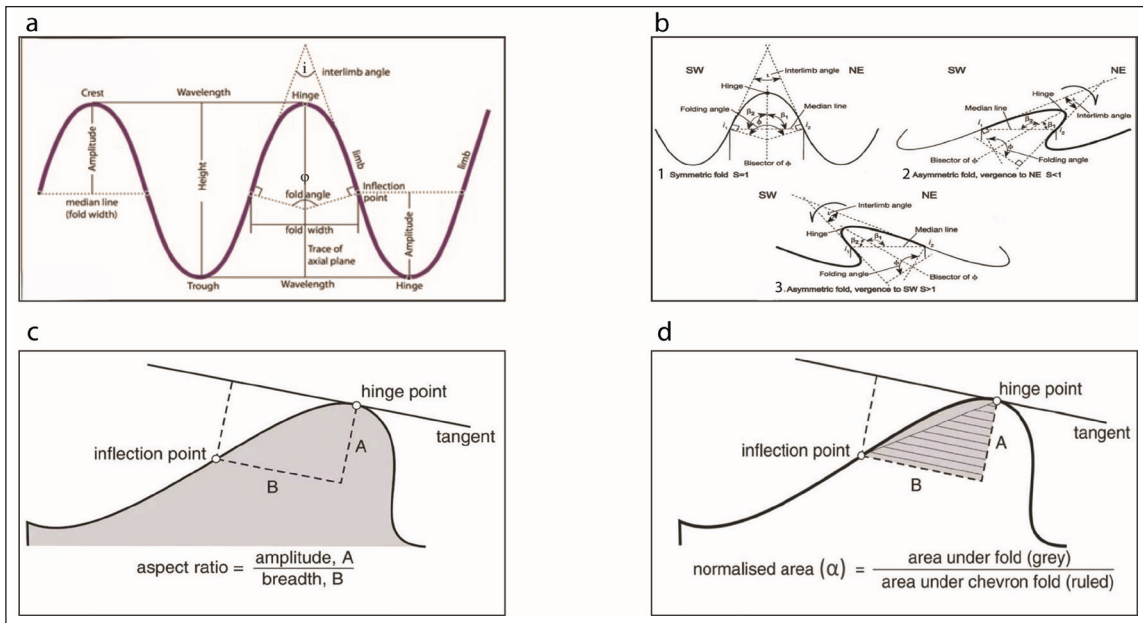
تحلیل هندسی صورت گرفته برای برش‌های عرضی ترسیم شده از تاقدیس مورد مطالعه در این قسمت در قالب جدول‌های ۱، ۲، ۳، ۴ و ۵ جمع‌بندی شده است. شکل ۱۱، نحوه اندازه‌گیری شاخص‌های هندسی محاسبه شده را در جدول‌های ۱ تا ۴ نشان می‌دهد.

۴- بحث

در این بخش، با استفاده از داده‌های زیرسطحی و برش‌های ساختاری رسم شده، الگوی چین‌خوردگی، عملکرد افق‌های جدایشی و تأثیر آن‌ها بر سازوکار چین‌خوردگی و ارزیابی هندسه مخزنی گروه دهرم مورد بررسی قرار گرفته است.

شده‌است (شکل ۱۳) و با ژرفای پی‌سنگ که بر اساس داده‌های مغناطیس‌هوایی توسط طباطبایی (Tabatabaai, 1997) محاسبه شده‌است هم‌خوانی دارد.

مطالعه هستند (معمدی و همکاران، ۱۳۹۱) که بر اساس محاسبات با روش مساحت برافزوده، ژرفای جدایش برای تاق‌دیس بندلنگه مقداری در حدود ۱۱ کیلومتر برآورد



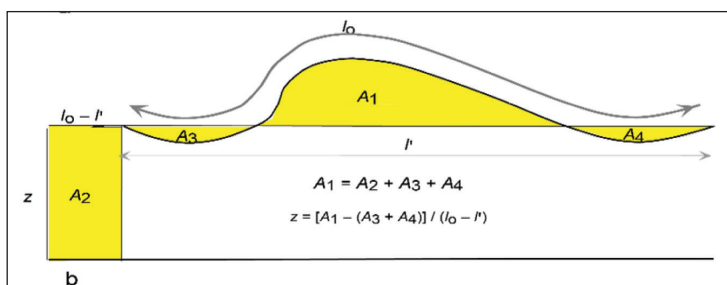
شکل ۱۱- a) شاخص‌های هندسی تاق‌دیس (زاویه بین یالی با حرف (i) و زاویه چین خوردگی با حرف (φ) نشان داده شده‌است). b) تعیین تقارن چین بر اساس شاخص (S). b1) چین متقارن، b2) چین نامتقارن با تمایل به سمت شمال خاوری (ساعت‌گرد Z/ شکل)، b3) چین نامتقارن با تمایل به سمت جنوب باختری (پادساعت‌گرد S/ شکل) (اقتباس از Twiss and Moores, 1992). c) محاسبه شاخص هندسی نسبت ابعاد (P) برای چین‌های نامتقارن (Lisle et al., 2006). d) نحوه محاسبه شاخص هندسی سطح هم‌تراز شده (α) برای چین‌های نامتقارن (اقتباس از Lisle et al., 2006).

Figure 11- a) Geometric indicators of an anticline (The interlimb angle is indicated by (i), and the folding angle is represented by (φ)). b) Determining the symmetry of a fold based on the indicator (S). b1) Symmetric fold. b2) Asymmetric fold with a northeastward tilt (clockwise/Z shape), b3) Asymmetric fold with a southwestward tilt (counterclockwise/S shape) (adapted from Twiss and Moores, 1992). c) Calculation of the geometric index of aspect ratio (P) for asymmetric folds (Lisle et al., 2006). d) Method for calculating the geometric index of normalized area (α) for asymmetric folds (adapted from Lisle et al., 2006).



Figure 12- a) A parasitic fold on the Gachsaran formation in the southern limb of the East Band-e-Lengeh structure along cross-section EE' (view towards northwest). b) The western segment of the Band-e-Lengeh structure and the outcrop of the Pabdeh formation adjacent to the Champheh salt plug (view towards west). c) Presence of a normal fault in the East Band-e-Lengeh structure (along cross-section DD') (view towards northeast).

شکل ۱۲- a) چین خوردگی فرعی بر روی سازند گچساران در یال جنوبی ساختمان بندلنگه خاوری در مسیر برش EE' (نگاه به سمت شمال باختر). b) دماغه باختری ساختمان بندلنگه و رخنمون سازند پابده در مجاورت گنبد نمکی چمپه (نگاه به سمت باختر). c) وجود گسل عادی در ساختمان بندلنگه خاوری (در مسیر برش عرضی DD') (نگاه به سمت شمال خاور).



شکل ۱۳- محاسبه ژرفا تا سطح جدایش به روش مساحت برافزوده در یک چین جدایشی (Mitra, 2002). در مطالعه حاضر، سازند معادل آسماری به‌عنوان افق چینه‌ای مرجع انتخاب شده‌است و ژرفا تا سطح جدایش قاعده‌ای (سری هرمز) محاسبه شده‌است.

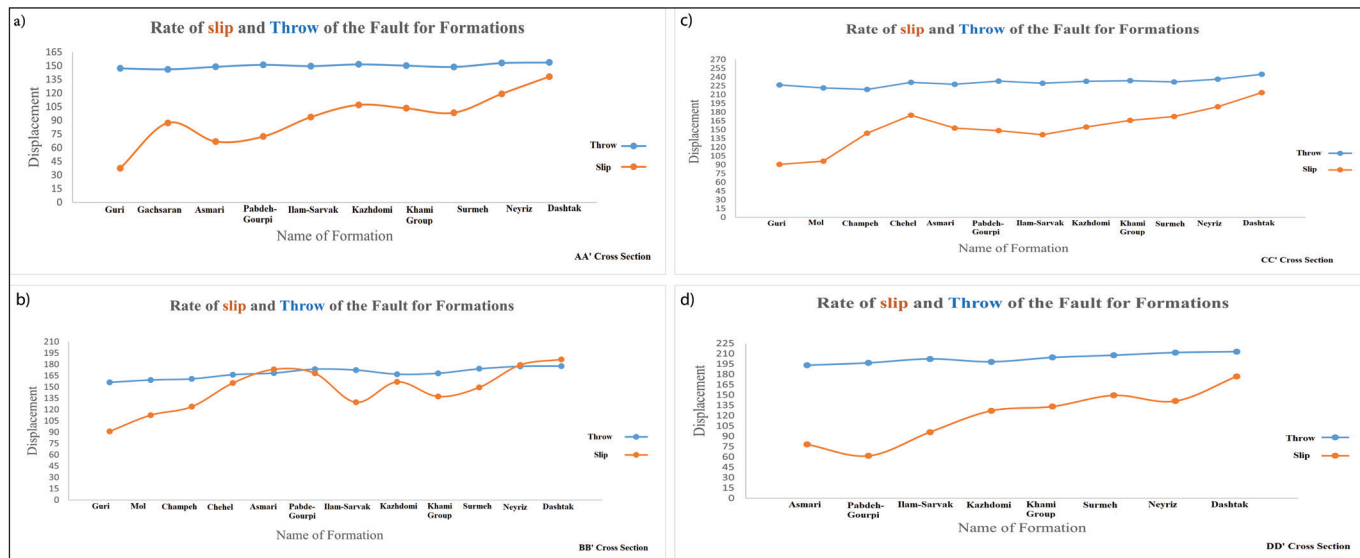
Figure 13. Calculation of depth to the detachment surface using the excess area method in a detachment fold (Mitra, 2002). In the present study, the Asmari equivalent formation is selected as the reference stratigraphic horizon, and the depth to the base detachment surface (Hormuz series) is calculated.

به جابه‌جایی کوچک گسل‌ها نشان می‌دهد که بیشترین بخش چین‌خوردگی پیش از گسل‌خوردگی اتفاق افتاده است. چنین شواهدی برای تاق‌دیس بندلنگه با معیارهای ارائه‌شده توسط میترا (Mitra, 2002 and 2003) در مورد چین‌خوردگی جدایشی گسل‌خورده هم‌خوانی دارد.

افزون‌بر سری هرمز (افق جدایش قاعده‌ای)، تفسیر ساختاری نیم‌رخ‌های لرزه‌ای در ترکیب با محل سرسازندها در چاه بندلنگه-۱ و چاه‌های نزدیک به آن و نیز رسم برش‌های ساختاری، حضور یک افق جدایشی مهم را در میانه پوشش رسوبی مشخص نمود. همان‌گونه که الگوی واگرایی بازتابنده‌های لرزه‌ای نشان می‌دهد، سازند تبحیری دشتک به سن تریاس، در ۴ برش عرضی رسم‌شده از ساختمان بندلنگه (شکل‌های ۵-ا، ۶-ا، ۷-ب، ۸-ب) به دلیل عملکرد گسل وارون در یال جنوبی، افزایش ستبرای زمین‌ساختی داشته که سبب جابه‌جایی محل محور چین بین افق کنگان (راس گروه دهرم) و افق‌های جوان‌تر از آن شده‌است (جدول ۵) و می‌تواند انتخاب محل حفاری را دچار پیچیدگی کند. در برش عرضی EE' (شکل ۹) این سازند عملکرد جدایشی نداشته است و ستبرشدگی نشان نمی‌دهد. از این رو، چینه‌شناسی مکانیکی یکی از عوامل کلیدی در کنترل الگوی جنبشی چین‌خوردگی در منطقه تاق‌دیس مورد مطالعه است. چین‌های جدایشی گسل‌خورده به‌طور معمول در واحدهایی با اختلاف مقاومت زیاد شکل می‌گیرند و رفتار دگرریختی آن‌ها در طول زمان تغییرات شایان‌توجهی دارد، درحالی‌که چین‌های انتشار گسلی که در واحدهای با لایه‌بندی نازک و سنگ‌شناسی به‌نسبت همگن تشکیل می‌شوند، تاثیر کمتری از چینه‌شناسی مکانیکی می‌پذیرند (Mitra, 2002). با توجه به اختلاف زیاد سنگ‌شناسی بین افق‌های شکل‌پذیر و لایه‌بندی‌های نسبتاً ستبر در پوشش رسوبی منطقه (شکل ۳)، شرایط لازم برای تشکیل چین‌خوردگی انتشار گسلی وجود ندارد (معتدلی و همکاران، ۱۳۸۴). در این تاق‌دیس، تنوع سنگ‌شناختی شامل کنگلومرا (سازند بختیاری)، ماسه‌سنگ (سازند آغاچاری)، کربناته (سازندهای میشان، ایلام-سروک و گروه خامی)، شیل و مارن (سازندهای پایده-گورپی و کژدمی) و تبحیری‌ها (سازندهای گچساران و دشتک) است. بنابراین وجود افق‌های جدایشی مانند سازند دشتک که نقش عمده‌ای در تعیین سبک چین‌خوردگی داشته است، نشان‌دهنده چیرگی الگوی چین‌خوردگی جدایشی گسلیده در این تاق‌دیس است.

در برش‌های ساختاری محلی و منطقه‌ای رسم‌شده، سازوکارهای متفاوتی برای چین‌خوردگی پوشش رسوبی در محدوده فارس پیشنهاد شده‌است. از جمله این سازوکارها می‌توان به چین‌خوردگی نوع انتشار گسلی (Fault Propagation Fold) (Sherkati and Letouzey, 2004; Mc Qualine, 2004; Oveisi et al., 2009; Alavi, 2007)، چین‌خوردگی جدایشی (Detachment Fold) (Sherkati et al., 2006)؛ چین‌خوردگی خم گسلی (Fault Bend Fold) (Motamedi et al., 2012) و چین‌خوردگی خم گسلی (Faulted Detachment Fold) (Alavi, 2007; Sherkati and Letouzey, 2004) اشاره نمود. در این پژوهش، بر اساس برش‌های عرضی رسم‌شده از تاق‌دیس بندلنگه مشاهده شد که گسل‌های وارون در پهلوی تاق‌دیس توسعه یافته‌اند. این هندسه ساختاری مشابه با دو سازوکار چین‌خوردگی انتشار گسلی و چین‌خوردگی جدایشی گسل‌خورده (Faulted Detachment Fold) می‌باشد. بر پایه معیارهای ارائه‌شده توسط (Mitra, 2002, 2003)، به دلایل زیر الگوی اصلی جنبشی در منطقه مورد مطالعه چین‌خوردگی جدایشی و چین‌خوردگی جدایشی گسل‌خورده هستند:

در تاق‌دیس بندلنگه خاوری، وجود ناودیس‌های فرودیواره‌ای در زیر گسل‌های وارون توسعه‌یافته در پهلوی جنوبی چین‌ها، گسل‌های وارون پرشیب و تنگ‌شدگی چین‌ها در ژرفا به واسطه چرخش پهلوها و مهاجرت لولا، ویژگی انتقال رفتار دگرریختی از چین‌خوردگی جدایشی به چین‌خوردگی جدایشی گسل‌خورده همراه با افزایش کوتاه‌شدگی است (شکل‌های ۵-ا، ۶-ا، ۷-ب، ۸-ب). در چین‌های جدایشی گسل‌خورده باتوجه به پیشینه گسترش گسل، جابه‌جایی الگوی پیچیده‌ای را نشان می‌دهد. لغزش گسل ممکن است که در برخی واحدها ثابت باشد و به سمت بالای مقطع افزایش یا کاهش یابد (شکل‌های ۱۴-ا، b، c، d) ولی در چین‌های انتشار گسلی، لغزش گسل به‌طور مرتب به سمت بالای مقطع کاهش می‌یابد (در راس گسل، جابه‌جایی گسل صفر می‌شود) و لغزش گسل را می‌توان باتوجه به طول پهلوی خلفی پیش‌بینی نمود (McNaught and Mitra, 1993; Mitra, 2002). بسیاری از چین‌های جدایشی گسل‌خورده با طول موج بلند و دامنه کوتاه تشکیل می‌شوند. برخلاف چین‌های جدایشی گسل‌خورده در چین‌های انتشار گسلی، طول موج چین با میزان کوتاه‌شدگی رابطه مستقیم دارد (Mitra, 2002). در تاق‌دیس بندلنگه، میزان جابه‌جایی در راستای گسل وارون در پهلوی چین نسبت به میزان توسعه‌یافتگی چین ناچیز می‌باشد (شکل‌های ۵-ا، ۶-ا، ۷-ب، ۸-ب). در واقع دامنه کوتاه چین‌ها نسبت

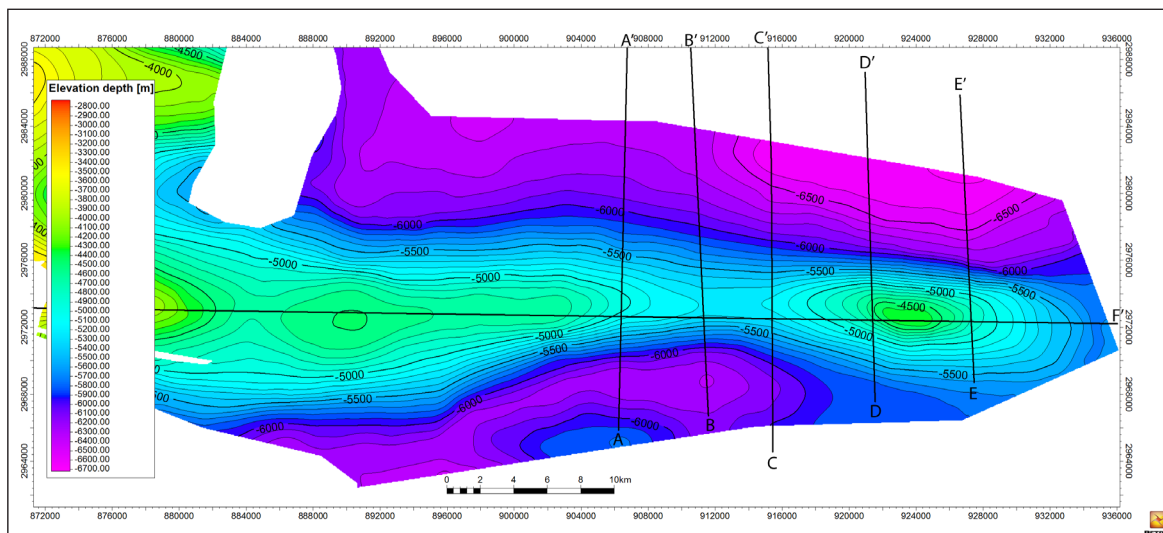


شکل ۱۴- نمودار مقایسه‌ای جایجایی قائم (Throw) و لغزش (Slip) گسل در برش‌های عرضی شکل AA' (شکل a)، BB' (شکل b)، CC' (شکل c) و DD' (شکل d). همان‌گونه که در نمودارهای رنگ نارنجی مشاهده می‌شود، میزان لغزش گسل از سازندهای پایینی به سمت سازندهای بالایی، روند کاهشی و افزایشی مشخصی را نشان نمی‌دهد. در همه گسل‌ها، لغزش گسل از سازند دشتک (جایی که گسل منشأ گرفته)، تا سازندهای بالایی متغیر است؛ با این حال میزان لغزش گسل به صفر نرسیده است (میزان لغزش گسل از ۱۳۸ متر در افق دشتک تا حدود ۳۷ متر در بخش گوری در برش AA' (a)، از ۱۸۶ متر در سازند دشتک تا حدود ۹۱ متر در بخش گوری در برش BB' (b)، از ۲۱۳ متر در سازند دشتک تا حدود ۹۰ متر در بخش گوری در برش CC' (c) و در برش DD' از ۱۷۷ متر در سازند دشتک تا ۷۸ متر در سازند آسماری متغیر است (d)). میزان جابه‌جایی قائم گسل‌ها که در این نمودارهای مقایسه‌ای با رنگ آبی نشان داده شده است، یک روند تقریباً خطی را نشان می‌دهد. Figure 14. The comparative chart of throw and slip of the fault in the cross-sections AA' (Figure a), BB' (Figure b), CC' (Figure c), and DD' (Figure d). As observed in the orange-colored charts, the amount of fault slip from the lower to the upper formations does not show a clear decreasing or increasing trend. In all faults, the slip varies from the Dashtak formation (where the fault originates) to the upper formations; however, the slip never reaches zero (The fault slip in section AA' ranges from 138 meters at the Dashtak formation to about 37 meters in the Guri member (a), from 186 meters at the Dashtak formation to about 91 meters in the Guri member in BB' (b), from 213 meters at the Dashtak formation to about 90 meters in the Guri member in CC' (c), and in cross-sections DD' it ranges from 177 meters at the Dashtak formation to 78 meters at the Asmari formation (d)). The vertical displacement of the faults, shown in these comparative charts in blue, displays an almost linear trend.

و بندلنگه باختری تقسیم می‌شود. ساختمان بندلنگه خاوری با یک زین‌سان به ژرفای ۵۲۲۰- متری از سطح تراز دریا بر روی سازند کنگان از ساختمان بندلنگه مرکزی جدا می‌شود. ساختمان بندلنگه مرکزی نیز با یک زین‌سان به نسبت ملایمی به ژرفای ۴۶۲۰- متر از سطح تراز در روی بر روی سازند کنگان از ساختمان بندلنگه باختری جدا می‌شود. بستگی افقی راس گروه دهرم ساختمان بندلنگه خاوری در حدود ۵۲/۸۸ کیلومتر مربع و بستگی قائم آن نیز ۸۹۰ متر می‌باشد. بالاترین تراز دسترسی به ستیغ (Culmination) در راس فوقانی سازند کنگان در ژرفای ۴۳۱۰- متری زیر سطح دریا قرار دارد. بستگی افقی راس گروه دهرم ساختمان بندلنگه مرکزی در حدود ۲۰/۳۴ کیلومتر مربع و بستگی قائم آن نیز ۱۴۰ متر می‌باشد. بالاترین تراز دسترسی به ستیغ در راس فوقانی سازند کنگان در ژرفای ۴۴۶۰- متری زیر سطح دریا قرار دارد. با توجه به شکل ۱۳، بستگی خاوری و مرکزی تاق‌دیس بندلنگه در معرض گسل و یا گنبد نمکی قرار ندارند. دماغه باختری تاق‌دیس به گنبد نمکی محدود می‌شود و بنابراین دماغه باختری فاقد بستگی مشخص جهت دماغه هیدروکربور می‌باشد.

۴-۲- ارزیابی هندسه مخزنی گروه دهرم در تاق‌دیس بندلنگه

اطلاعات حاصل از حفاری، ژئوفیزیک و نمودارگیری صورت گرفته در چاه‌های اکتشافی، مقادیر زیادی از اطلاعات زیرسطحی را فراهم می‌کند. مناسب‌ترین روش نمایش این اطلاعات، ایجاد نقشه‌های ژرفایی (UGC Map) می‌باشد (صفری و امیری بختیار، ۱۳۹۲). بر اساس تفسیر داده‌های خطوط لرزه‌نگاری و برش‌های ساختاری ارائه شده در بخش ۳ این نوشتار، به منظور بررسی ارتباط میان بخش‌های مختلف تاق‌دیس بندلنگه، از جمله بررسی ارتباط زین‌سان بین بخش مرکزی و دماغه خاوری تاق‌دیس و تعیین هندسه مخزنی افق هدف اکتشاف، نقشه ژرفایی برای گروه دهرم رسم شده است. با استفاده از این نقشه، مقدار بستگی افقی (Horizontal Closure) جهت تعیین مساحت مؤثر دامنه ذخیره‌سازی گاز و شناسایی وسعت ساختاری تاق‌دیس و بستگی قائم (Vertical Closure) به منظور ارزیابی پتانسیل مخزنی تاق‌دیس بندلنگه محاسبه گردیده است (شکل ۱۵). بر اساس نقشه ژرفایی تهیه شده، ساختمان بندلنگه بر روی گروه دهرم (کنگان) به سه ساختمان بندلنگه خاوری، بندلنگه مرکزی



شکل ۱۵- نقشه ژرفایی تهیه‌شده از افق مخزنی گروه دهرم در تاق‌دیس مورد مطالعه. محل برش‌های عرضی و طولی بر روی این نقشه نشان داده شده‌است. خطوط تراز از یکدیگر فاصله‌ای ۱۰۰ متری دارند.

Figure 15. UGC map of the Dehram group reservoir horizon in the studied anticline. The locations of the cross-sections and longitudinal section are indicated on this map. The contour lines are spaced 100 meters apart.

۵- نتیجه‌گیری

که با توجه به ملایم بودن چین خوردگی در این تاق‌دیس منطقی است. نتایج حاصل از بررسی نقشه ژرفایی رسم‌شده از افق مخزنی گروه دهرم در تاق‌دیس بندلنگه مشخص نمود که تاق‌دیس بندلنگه خاوری با دارا بودن بستگی مناسب جهت ذخیره هیدروکربور (۵۲/۸۸ کیلومتر مربع بستگی افقی و ۸۹۰ متر بستگی قائم مستقل از گسل) و قرار داشتن بر روی بلندای پی‌سنگی، در اولویت عملیات اکتشافی قرار دارد. ساختمان بندلنگه باختری به گنبد نمکی چمپه محدود است و بر اساس محاسبات، فاقد بستگی مشخص برای ذخیره هیدروکربور است.

سیاسگزاری

نگارندگان از مدیر محترم اکتشاف، معاون محترم علوم زمین، و همچنین رؤسا و کارشناسان گرامی اداره‌های زمین‌شناسی اکتشافی و پژوهش-فناوری مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران به دلیل حمایت‌های همه‌جانبه از جمله در اختیار قرار دادن داده‌های زیرسطحی لرزه‌ای و چاه، تامین تجهیزات نرم‌افزاری و سخت‌افزاری مورد نیاز، آموزش نرم‌افزارهای تخصصی و راهنمایی‌های سازنده‌شان در پیشبرد این پژوهش مراتب قدردانی و تشکر خود را اعلام می‌دارند.

بر اساس شاخص‌های هندسی اندازه‌گیری‌شده، تاق‌دیس بندلنگه خاوری در گروه چین‌های ملایم قرار می‌گیرد. هندسه کلی تاق‌دیس بیضوی تاج‌به‌ای بوده و تاق‌دیس تقریباً متقارن می‌باشد. چین‌ها در برش‌های عرضی رسم‌شده به سمت جنوب متمایل هستند و تنها یک برش (EE') به سمت شمال متمایل است. این تغییرات نشان‌دهنده دگرریختی متفاوت از سمت باختر به خاور است.

سازوکار اصلی چین خوردگی در تاق‌دیس بندلنگه خاوری چین خوردگی جدایشی گسل خورده تشخیص داده شده‌است. طبق محاسبات صورت گرفته با استفاده از روش مساحت برافزوده، افق جدایش قاعده‌ای در ژرفای حدود ۱۱ کیلومتر قرار دارد که با سری هرمز در مرز پوشش رسوبی و پی‌سنگ انطباق دارد.

نهشته‌های سبتر تبخیری‌های تریاس (سازند دشتک) در مواردی با افزایش ستبرای یک افق جدایشی را در میانه پوشش رسوبی تشکیل می‌دهد و سبب جابه‌جایی محوری چین شده‌است که این مساله می‌تواند انتخاب محل حفاری را برای اکتشاف گاز دچار پیچیدگی کند.

برش‌های عرضی موازنه‌شده بر پایه پایستگی طول لایه نشان دادند که میزان کوتاه‌شدگی، از سازندهای زیرین به سمت سازندهای نزدیک به سطح روند صعودی دارد. میزان متوسط کوتاه‌شدگی در تاق‌دیس بندلنگه خاوری حدود ۴ درصد است.

کتابنگاری

- حسینی، م.، کاوسی، م.، طباطبایی، س.، معتمدی، م.، ۱۳۸۹، مطالعه سازندهای گروه دهرم و سازند دشتک از دیدگاه زمین‌شناسی مخزن، زون‌بندی و تعیین چگونگی گسترش زون‌های مخزنی در نواحی فارس و خلیج فارس، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، گزارش شماره ۲۲۰۶، ۱۷۸ ص.
- شرکت ملی نفت ایران، ۱۳۹۵، نقشه زمین‌شناسی زاگرس، مقیاس ۱:۵۰,۰۰۰.
- صفری، ح.، امیری بختیار، ح.، ۱۳۹۲، زمین‌شناسی تحت‌الارضی پایه‌ای، کتاب آوا، ۴۸۷ ص.
- مطیعی، ه.، ۱۳۷۲، چینه‌شناسی زاگرس، طرح تدوین کتاب زمین‌شناسی ایران، انتشارات سازمان زمین‌شناسی کشور، ۵۴۸ ص.
- معتمدی، ح.، اصغری، ا.، ولی‌نژاد، م.، ۱۳۹۱، گزارش بلنداهای قدیمی در خاور خطواره رازک، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، گزارش شماره ۲۲۷۸، ۱۵۹ ص.
- معتمدی، ح.، نوروزی، م.، آریانفر، ب.، فرمانی، ف.، شمشیری، م.، ۱۳۸۴، تحلیل ساختاری و بررسی پتانسیل هیدروکربوری ساختمان‌های کوه سفید، بندلنگه، هرنگ، بنه‌کوه، بندهلم، چاه مسلم، برکه سولفین، مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران، گزارش شماره ۲۱۳۲، ۷۹ ص.

References

- Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: New data and interpretations. *Tectonophysics*, 229(3-4), 211-238. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)90030-2](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)90030-2).
- Alavi, M., 2007. Structures of the Zagros fold-thrust belt in Iran. *American Journal of Science*, 307, 1064-95. <https://doi.org/10.2475/09.2007.02>.
- Bastida, F., Aller, J., Bobillo-Ares, N.C., and Toimil, N.C., 2005. Fold geometry: a basis for their kinematical analysis. *Earth-Science Reviews*, 70(1-2), pp.129-164. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2004.11.006>.
- Berberian, M., 1995. Master 'blind' thrust faults hidden under the Zagros folds: Active basement tectonics and surface morphotectonics. *Tectonophysics*, 241, 193-224. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(94\)00185-C](https://doi.org/10.1016/0040-1951(94)00185-C).
- Berberian, M., and King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Science*, 18, 210-265. <https://doi.org/10.1139/e81-019>.
- Blanc, E., Allen, M.B., Inger, S., and Hassani, H., 2003. Structural styles in the Zagros Simple Folded Zone, Iran. *Journal of the Geological Society*, 160, 401 - 412. <https://doi.org/10.1144/0016-764902-110>.
- Falcon, N.L., 1974. South Iran: Zagros Mountains. Spencer, A.M, Mesozoic-Cenozoic Orogenic belts Data for Orogenic studies, Geological Society of London, Special Publication, 4 (1), pp.199-211. <http://dx.doi.org/10.1144/GSL.SP.2005.004.01.11>.
- Fleuty, M.J., 1964. The description of folds. *Proceedings of the Geologists' Association*, 75(4), pp.461-492. [https://doi.org/10.1016/S0016-7878\(64\)80023-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7878(64)80023-7).
- Haghi, A. H., Kharrat, R., Asef, M. R., and Rezazadegan, H., 2013. Present day stress of the central Persian Gulf: Implications for drilling and well performance. *Tectonophysics*, 608, 1429-1441. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.06.001>.
- Hasani, M., Kavousi, M., Tabatabaei, S., and Motamedi, M., 2010). *Study of the Dehram group and Dashtak formation from the perspective of reservoir geology, zonation, and determination of reservoir zone distribution in the Fars and Persian Gulf regions. Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Report No. 2206, 178 pp. (In Persian).*
- Hessami, K., Koyi, H.A., and Talbot, C.J., 2001. The significance of strike-slip faulting in the basement of the Zagros fold and thrust belt. *Journal of Petroleum Geology*, 24(1), pp.5-28. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2001.tb00659.x>.
- Lisle, R. J., Martinez, J. F., Bobillo-Ares, N., Menendez, O., Aller, J., and Bastida, F., 2006. FOLD PROFILER: A MATLAB®-based program for fold shape classification. *Computers & Geosciences*, 32(1), 102-108. <http://dx.doi.org/10.1016/j.cageo.2005.05.007>.
- McNaught, M.A., and Mitra, G., 1993. A kinematic model for the origin of footwall synclines. *Journal of Structural Geology*, 15(6), pp.805-808. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(93\)90064-H](https://doi.org/10.1016/0191-8141(93)90064-H).
- McQuarrie, N., 2004. Crustal scale geometry of the Zagros fold-thrust belt, Iran. *Journal of Structural Geology*, 26(4), 519-535. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2003.08.009>.
- Mitra, S., 2002. Structural models of faulted detachment folds. *AAPG Bulletin*, 86(9), 1673-1694. <https://doi.org/10.1306/61EEDD3C-173E-11D7-8645000102C1865D>.
- Mitra, S., 2003. A unified kinematic model for the evolution of detachment folds. *Journal of Structural Geology*, 25, 1659-1673. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00198-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00198-0).
- Motamedi, H., and Gharabeigli, G., 2019. Chapter 9- Structural Style in the Fars Geological Province: Interaction of Diapirism and Multidetachment Folding. *Developments in Structural Geology and Tectonics*. A. F. Saein, Elsevier. 3: P. 145-160. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-815048-1.00009-3>.
- Motamedi, H., Asghari, A., and Vali-Nejad, M., 2012. *Report on ancient elevations in the eastern Razak Fault Zone, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Report No. 2278, 159 pp. (In Persian).*
- Motamedi, H., Norouzi, M., Arianfar, B., Farmani, F., and Shamshiri, M., 2005. *Structural analysis and hydrocarbon potential assessment of Kuh Sefid, Bandar Lengeh, Herang, Boneh Kuh, Band Moallem, Chah Moslem, and Borkeh Soflin structures, Exploration Directorate, National Iranian Oil Company, Report No. 2132, 79 pp. (In Persian).*
- Motamedi, H., Sherkati, S., and Sepehr, M., 2012. Structural style variation and its impact on hydrocarbon traps in central Fars, southern Zagros folded belt, *Iran Journal of Structural Geology* 37 (2012) 124-133. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2012.01.021>.
- Motiei, H., 1993. *Zagros Stratigraphy, Geology of Iran Book Compilation Project, Geological Survey of Iran Publications, 548 pp. (In Persian).* National Iranian Oil Company, 2016. *Zagros geological map, Scale 1:50,000. (In Persian).*
- Oveisi, B., Lavé, J., Vander Woerd, J., Carcaillet, J., Tatar, M., Abbassi, M. R., and Farbod, Y., 2009. Thick- and thin-skinned deformation rates in the central Zagros simple folded zone (Iran) indicated by displacement of geomorphic surfaces. *Geophysical Journal International*, 176(2), 627-654. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246X.2008.04002.x>
- Rahimpour, H., Esrafil-Dizaji, B., and Tavakoli, V., 2010. Dolomitization and Anhydrite precipitation in Permo-Triassic carbonates at the South Pars gas field, offshore Iran: controls on reservoir quality. *Journal of Petroleum Geology*, 33, 43 - 66. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.2010.00463.x>.
- Safari, H., and Amiri-Bakhtiar, H., 2013. *Basic subsurface geology. Tehran: Ava Publications. 487 pp. (In Persian).*

- Sella, G.F., Dixon, T.H., and Mao, A., 2002. REVEL: A model for recent plate velocities from space geodesy. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B4). <https://doi.org/10.1029/2000JB000033>.
- Sepehr, M., Cosgrove, J., and Moieni, M., 2006. The impact of cover rock rheology on the style of folding in the Zagros fold-thrust belt. *Tectonophysics*, 427(1-4), pp.265-281. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2006.05.021>.
- Sherkati, S., and Letouzey, J., 2004. Variation of structural style and basin evolution in the central Zagros (Izeh zone and Dezful Embayment), Iran. *Marine and petroleum geology*. 21(5), pp.535-554. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2004.01.007>.
- Sherkati, S., Letouzey, J., and Frizon de Lamotte, D., 2006. The Central Zagros fold-thrust belt (Iran): New insights from seismic data, field observation and sandbox modeling. *Tectonics*, 25, TC4007. <https://doi.org/10.1029/2004TC001766>.
- Sherkati, S., Molinaro, M., de Lamotte, D.F., 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(9), pp. 1680-1696. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2005.05.010>.
- Snyder, D.B., and Barazangi, M., 1986. Deep Crustal Structure and Flexure of the Arabian Plate Beneath the Zagros Collisional Mountain Belt as Inferred from Gravity Observations. *Tectonics*, 5, 361-373. <https://doi.org/10.1029/TC005i003p00361>.
- Stocklin, J., 1968. Structural history and tectonics of Iran: a review. *AAPG Bulletin*, 52(7), pp.1229-1258. <https://doi.org/10.1306/5D25C4A5-16C1-11D7-8645000102C1865D>.
- Szabo, F., and Kheradpir, A., 1978. Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran, *Journal of Petroleum Geology*, 1, 57 – 82. <https://doi.org/10.1111/j.1747-5457.1978.tb00611.x>.
- Tabatabai, H., 1997. Basement contour map (South East Iran). Scale 1: 1 000,000. National Iranian Oil Company, Exploration and Production, Tehran, Report 35393/A.
- Talbot, C.J., and Alavi, M., 1996. The past of a future syntaxis across the Zagros. *Geological Society, London, Special Publications*, 100(1), pp.89-109. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1996.100.01.08>.
- Twiss, R. J., and Moores, E., 1992. *Structural Geology*. New York: W.H. Freeman, pp. 217–235.