Shahid Chamran University of Ahvaz
OPEN ACCESS Adv. Appl. Geol. Summer 2025, Vol. 15(2): 68 - 83

Research Article

Structural analysis of a blind thrust sheet and its Impact on the fluvial system: a case study north of the Dezful Embayment (Zagros Belt, SW Iran)

Seyed Morteza Mousavi[1]*, Fariba Zahmati[1], Iraj Abdollahie Fard[2], Mohammad Seraj[3]

1-Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
2- Exploration Directorate of NIOC.Tehran, Iran
3- National Iranian South Oil Company (NISOC), Ahvaz, Iran.

Keywords: *foreland basin system, fluvial depositional system, fan and intra-fan facies, thrust sheet, displacement detection, Zagros Belt, Balarud Fault Zone.*

1-Introduction

The foreland basin is a long depression that forms between the orogenic belt and the adjacent craton, and includes four characteristic sedimentary zones: the wedge top, the foredeep, the forebulge, and the backbulge (DeCelles and Giles, 1996). The sediments deposited in the foreland basin are primarily derived from rocks in the adjacent fold-thrust belt; therefore, foreland basins provide unique records of orogenic evolution, including the erosional products within them (Gérard et al., 2023). Meanwhile, the contribution of the undeformed or adjacent craton to the sediment production for filling the foreland basin is much less than that of the deformed belt (Dickinson & Suczek, 1979; Schwab, 1986; DeCelles & Hertel, 1989). The depression of a foreland system, known as the foredeep basin, is considered a potential kitchen for hydrocarbon generation; therefore, its evolutionary history is important in petroleum system modeling studies.

In many foreland systems, the main décollement surface remains between the strong crystalline basement and the sedimentary cover, and thrust faults that splay from the subhorizontal master detachment delineate individual thrust sheets. Therefore, folding and thrusting along these faults are the primary mechanisms of shortening in the foreland systems. Thrust-related structures also may have complex geometries, and this complexity increases in the case of thrust sheets that deform internally by folding, leading to an escalated risk of sub-thrust trap exploration.

The study of the fluvial system of the foreland basins helps reveal their evolution. For example, the rivers of the foreland system are categorized into two longitudinal and transversal groups. During tectonic loading periods, the transversal rivers join the major longitudinal rivers in the proximal part of the foreland system. In contrast, the basin tends to be uplifted during the erosional unloading periods in response to flexural rebound. Then, the transversal rivers dominate the foreland and join longitudinal rivers in the distal part of the foreland system (Burbank, 1992).

In the context of the Zagros belt, part of the Alpine-Himalayan Orogen, the convergence between Arabian and Eurasian plates has led to a complex system of fold-thrust belts and foreland basins. Folding characterizes internal deformation, contributing to the complex geometries observed in seismic profiles. The Dezful Embayment, as part of the Zagros (Mesopotamian) foreland system and its thick sedimentary cover, has been the subject of many studies due to its economic importance, particularly its prolific hydrocarbon resources. The study area is located in the northern part of the Dezful Embayment, adjacent to the Balarud Fault Zone (BFZ), a deep-seated left-lateral shear associated with high seismicity (Yaghoubi et al., 2023). The BFZ has been extensively discussed in numerous articles (e.g., Sepehr and Cosgrove,

* Corresponding author: mmoussavi@birjand.ac.ir
DOI: 10.22055/aag.2025.48260.2481
Received: 2024-12-23
Accepted: 2025-08-02

ISSN: 2717-0764

2004; Emami et al., 2010; Navabpour et al., 2010; Nissen et al., 2011; Derikvand et al., 2018; Yaghoubi et al., 2021; Razavi Pash et al., 2021; Vergés et al., 2024), with most focusing on its seismicity or surface pieces of evidence. A study of the fluvial system in this belt reveals that its transverse rivers (e.g., Karun, Dez, Karkheh, Zab) converge with the major longitudinal rivers (Euphrates, Tigris, and Arvand) in the distal part of the foreland system, representing the Impact of the Late Alpine tectonic phase.

This study aims to examine the geometrical aspects of a blind thrust sheet south of the BFZ and to reveal its evolution through its structural characteristics in relation to the overlying strata. Another aim is to explain the relationship between the thrust sheet and the BFZ. Another purpose of this research is to investigate the facies of detrital syn-orogenic fluvial sediments within the context of the rivers' pattern and course. The outcrop, well, and seismic data were integrally analyzed to achieve the above goals.

2-Materials and methods

Three different types of data have been used in this study. The first type is evidence on the surface, including outcrops of the Cretaceous and Cenozoic strata. These evidences were collected during multiple field visits and merged with geological maps at a scale of 1:100,000 prepared by NIOC. Wells' data are the second type, as over 40 wells have been drilled in the study area for hydrocarbon exploration and production objectives. In addition, a pre-stack depth migrated 3D seismic survey covering the Balarud, Lab-Sefid, and Qaleh Nar anticlines is considered the third data type. The seismic data quality is sufficient to identify structural elements, particularly a northwest-southeast-oriented thrust zone discerned in the central area of the seismic survey.

The well data have been integrated into interpretation software alongside the seismic data to facilitate the interpretation of subsurface structures. Also, three stratigraphic levels have been delineated in the depth domain: the upper Gachsaran Formation from the Miocene epoch (specifically the Langhian stage), as well as the upper and lower boundaries of the Asmari Formation, which spans the Oligocene to Miocene periods. These interpretations are tied to the well markers. The fault zone discussed in this article intersects some wells. As a result, their detailed graphic and composite well logs have been included to accurately determine the depth of the fault zone and the layer duplications caused by thrusting.

Additionally, in one instance, well-cuttings and thin sections were examined to verify the chronological placement of strata flanking the fault zone. Consequently, this thrust zone is reasonably accurately depicted in a 3D seismic reflection cube. Isopach and true thickness maps have been generated from the depth maps to examine the variations in thickness across the fault zone. Additionally, the fault zone's geometry has been analyzed using structural attributes and three-dimensional visualization methods to discern the direction of fault displacement.

In the next step, the percentages of the coarse-grained deposits are measured within the Aghajari Formation using graphic and composite well logs. Measurements are taken for the entire and lowermost 300-meter part of the Formation, preparing percentage contour maps. Additionally, some seismic attributes are extracted to review any meaningful relationships between well and seismic data and to reveal hidden geobodies, such as paleo-rivers, in the seismic data.

3-Results and discussions

Repetition of the Gachsaran and Asmari formations in the Balarud 1 and 2 wells is evident. Also, an arbitrary profile across these wells reveals the geometry of this fault sheet. The Balarud Anticline is thrust over the Qaleh-Nar Anticline via this fault, as seen on the depth map of the top Asmari Formation. This fault is also exhibited in a seismic profile in the depth domain in the NE-SW direction. Both the Balarud and Qaleh Nar anticlines, located respectively in the hanging and footwall blocks of this thrust sheet, are evident in this profile. In addition to these anticlines, other structures are shown on the depth map and the fault surface. The fault surface is precisely interpreted like the top of the layer, enabling us to extract seismic attributes and subsequently analyze fault behavior. For a detailed structural analysis of the fault surface, we need to examine it in a 3D context, considering the Aghajari and Bakhtiari formations that overlie it with variable thickness. The thickness map of the hanging and footwall blocks of the Asmari and older

ISSN: 2717-0764
CC BY

formations can help detect the approximate displacement of the hanging wall block over the footwall block as they are affected by this thrust.

The maximum curvature attribute of the fault surface signifies NE-SW trending lineaments as possible evidence for slip direction. The thickness of the Pabdeh-Shahbazan unit at the hanging wall block after translation along the detected lineaments matches the thickness of the footwall block. Therefore, this thrust sheet's strike-slip component is minimal in contrast to the sinistral strike-slip displacement proposed for the BFZ. As a planar element, the thrust sheet participated in folding during the Late Zagros Orogeny phase, considering its curvilinear geometry. The thrust sheet's geometry appears to be influenced by the overburden weight, which subsequently varies. Lin et al. (2006) and IrfanAhmad and Toscani (2019) reported the changing dip of the thrust fault in response to continued deformation and syn-tectonic overburden. The opposite inclination of the NE-dipping fault zone is thought to happen in response to the thick Aghajari and Bakhtiari syn-tectonic deposits in the SW part of the study area. Therefore, the activity of the thrust sheet has gradually ceased due to the accumulation of the Aghajari and Bakhtiari detrital deposits sourced from the uplifted highlands in the hinterland side of the Zagros Belt.

Attribute maps indicate that the Paleo-Dez River was located almost beneath its present-day position. On the other hand, a river running in a NW-SE direction is identified as part of the longitudinal drainage system west of the study area. Both NE-SW and NW-SE trends are also discernible in the contour maps of the percentage of coarse-grained deposits within 300 meters of the lowermost part of the Aghajari Formation and the entire Aghajari Formation.

Outcrop of the upper Aghajari (Lahbari Member) and Bakhtiari beds representing both coarse-grained fluvial fan (mainly massive conglomerates) and intra-fan (fine-grained, mainly silt and sandstone) facies.

Results show that the blind thrust sheet folded during the latest stage of the Zagros Orogeny in response to the thick Neogene clastic as its partial overburden, and this thrust sheet should not be mistaken for the nearby BFZ. Additionally, this study highlighted that a braided fluvial system has dominated the area, characterized by the deposition of coarse-to-very coarse-grained sediments (silt to cobble-sized rocks), representing intra-fan and fan facies of the Lahbari & Bakhtiari layers.

4-Conclusion

The geometric analysis of a thrust sheet on the southern side of the BFZ shows a fault surface that has been deformed into a flat element after activity in the Miocene. This study cannot prove that the thrust sheet is a subset of the BFZ because its activity predates the current BFZ activity. In addition, their processes and mechanisms differ because the thrust sheet primarily exhibits reverse displacement, whereas the BFZ is characterized by strike-slip displacement in conjunction with a reverse component. The BFZ is the superficial expression of a deep main fault zone, and the available well and seismic data alone cannot provide a comprehensive understanding of it. Integrated systematic studies incorporating magnetic, gravity, earthquake, and other data are needed to partially decipher its nature partially. The activity of this thrust affected the area's drainage system, and the rivers are mainly re-oriented in more or less N-S direction. Active flexural loading and flexural rebound periods led to the accumulation of fluvial deposits and subsequent erosional phases.

5-References

Alavi, M., 1994. Tectonics of the Zagros orogenic belt of Iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229(3-4), 211–238. https:// doi:10.1016/0040-1951(94)90030-2.

Burbank, D.W., 1992. Causes of recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges Basin. Nature 357, 680–682. https://doi.org/10.1038/357680a0.

Decelles, P.G., Hertel, F., 1989. Petrology of fluvial sands from the Amazonian foreland basin. Peru and Bolivia. Geological Society of America Bulletin 101(12), pp.1552-1562. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<1552:POFSFT>2.3.CO;2.

Decelles, P.G., Giles, K.A. 1996. Foreland basin systems. Basin research 8(2), pp.105-123. https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1996.01491.x.

ISSN: 2717-0764

Decelles, P.G., Giles, K.A. 1996. Foreland basin systems. Basin research 8(2), pp.105-123. https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1996.01491.x.

Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. Aapg Bulletin 63(12), pp.2164-2182. https://doi.org/10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D.

Gérard, B., Rouby, D., Huismans, RS., Robin, C., Fillon, C., Braun, J., 2023. Impact of inherited foreland relief on retro-foreland basin architecture. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 128. https://doi.org/10.1029/2022JB024967.

Schwab, F.L., Allen, P.A. Homewood, P., 1986. Sedimentary signatures of foreland basin assemblages: real or counterfeit. Foreland basins 8, 395-410. https://doi.org/10.1002/9781444303810.ch21.

HOW TO CITE THIS ARTICLE:
Mousavi, M., Zahmati, F., Abdollahie Fard, I., Seraj, M,. 2025. Structural analysis of a blind thrust sheet and its Impact on the fluvial system: a case study north of the Dezful Embayment (Zagros Belt, SW Iran). Adv. Appl. Geol. 15 (2), 68-83.
DOI: 10.22055/aag.2025.48260.2481
https://aag.scu.ac.ir/article_20219.html

©2025 The author(s). This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution (CC BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, as long as the original authors and source are cited. No permission is required from the authors or the publishers

ISSN: 2717-0764

مقاله پژوهشی

تحلیل ساختاری یک راندگی مدفون و تاثیر آن بر روی سیستم رودخانه‌ای: مطالعه موردی در شمال فروبار دزفول (کمربند زاگرس، جنوب‌غرب ایران)

سید مرتضی موسوی

دانشیار گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

فریبا زحمتی

دانشجوی دکتری زمین‌شناسی ساختمانی و تکتونیک، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

ایرج عبداللهی فرد

مدیریت اکتشاف شرکت ملی نفت ایران.تهران. ایران.

محمد سراج

شرکت ملی مناطق نفت خیز جنوب.اهواز. ایران

mmoussavi@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۱۰/۰۳ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۵/۱۱

چکیده

منطقه مورد مطالعه به عنوان بخشی از سامانه حوضه پیش‌بوم زاگرس محسوب می‌شود که رسوبات آواری از میوسن تاکنون در آن انباشته شده است. در این حوضه چین‌های مرتبط با گسل با هندسه پیچیده خود تله‌های ساختاری پیچیده‌ای را بوجود می آورند. چنین ساختارهائی در فروافتادگی دزفول، بخشی از حوضه پیش‌بوم کمربند زاگرس یافت می‌شود. نتایج مطالعه نشان داد که در طی میوسن یک سیستم رودخانه‌ای مئاندری در شمال فروافتادگی دزفول غالب بوده است. افزایش شدت فعالیت تکتونیکی از میوسن پایانی باعث راندگی در راستای پهنه گسل برشی بالارود از اواخر میوسن شده و همین امر شیب عمومی سطح زمین را افزایش داده است، بنابراین از این زمان به بعد یک سامانه رودخانه‌ای گیسویی با رسوبگذاری نهشته‌های دانه درشت تا خیلی دانه درشت (نماینده رخساره‌های بین فن و فن در لایه‌های لهبری و بختیاری) در منطقه حاکم شده است. همچنین جهت رودخانه‌های اصلی متاثر از تکتونیک جوان زاگرس (آلپی متاخر) به جهت شمالی- جنوبی امروزی تغییر کرده است. با این سیر تحولات شمال فروبار دزفول در قالب گودالی به محلی برای انباشت نهشته‌های رودخانه‌ای تبدیل شده و نقش مهمی را در سامانه هیدروکربنی منطقه ایفا کرده است. یک پهنه راندگی به وضوح در چاه‌ها و داده‌های لرزه‌ای قابل مشاهده است ولی شواهدی در دست نیست که این گسل، یکی از گسل‌های مرتبه پایین پهنه گسلی بالارود باشد. نقشه عمقی و نشانگر حداکثر انحنأ صفحه گسل، خطواره‌هایی با روند شمال خاور -جنوب باختر را به عنوان احتمالاً خط لغزش گسل نشان می‌دهند. نقشه‌های ضخامت بلوک‌های فرادیواره و فرودیواره یک صفحه گسلی معکوس با حداقل جابجایی امتدادلغز را تأیید می‌کنند. هندسه منحنی‌وار صفحه راندگی، حاکی از چین‌خوردگی آن در آخرین مرحله کوهزایی زاگرس، در پاسخ به روباره ضخیم و بخشی آواری‌های نئوژن، است.

واژه‌های کلیدی: *سامانه حوضه پیش‌بوم، سامانه رسوبی رودخانه‌ای،رخساره فن و بین فن، صفحه راندگی، تشخیص جابجایی گسل.*

۱-مقدمه

حوضه پیش‌بوم (Foreland Basin) یک فروافتادگی طویل است که میان کمربند کوهزایی و کراتون مجاور آن ایجاد می‌گردد (DeCelles and Giles, 1996). رسوبات نهشته شده در حوضه پیش‌بومی عمدتاً از توده‌های سنگی در کمربند چین‌خورده - رانده مجاور نشأت می‌گیرند و بنابرای حوضه‌های پیش‌بوم سوابق منحصر به فردی از تکامل کوهزایی را با توجه به محصولات فرسایشی درون خود در اختیار می‌گذارند (Gérard et al., 2023). در این میان سهم بخش دگرشکل‌نشده یا کراتونی مجاور در تولید رسوب برای پر کردن حوضه پیش‌بومی بسیار کمتر از کمربند دگرشکل شده است

Dickinson & Suczek, 1979; Schwab, 1986;) DeCelles & Hertel, 1989). به گودی حوضه پیش‌بوم، واژه پیش‌ژرفا (Foredeep) اطلاق می‌شود (شکل ۱) و سیر گودشدگی این بخش از حوضه پیش‌بوم از کمربند کوهزایی در شکل‌گیری پختگاه (Kitchen) برای سیستم هیدروکربنی حائز اهمیت است.

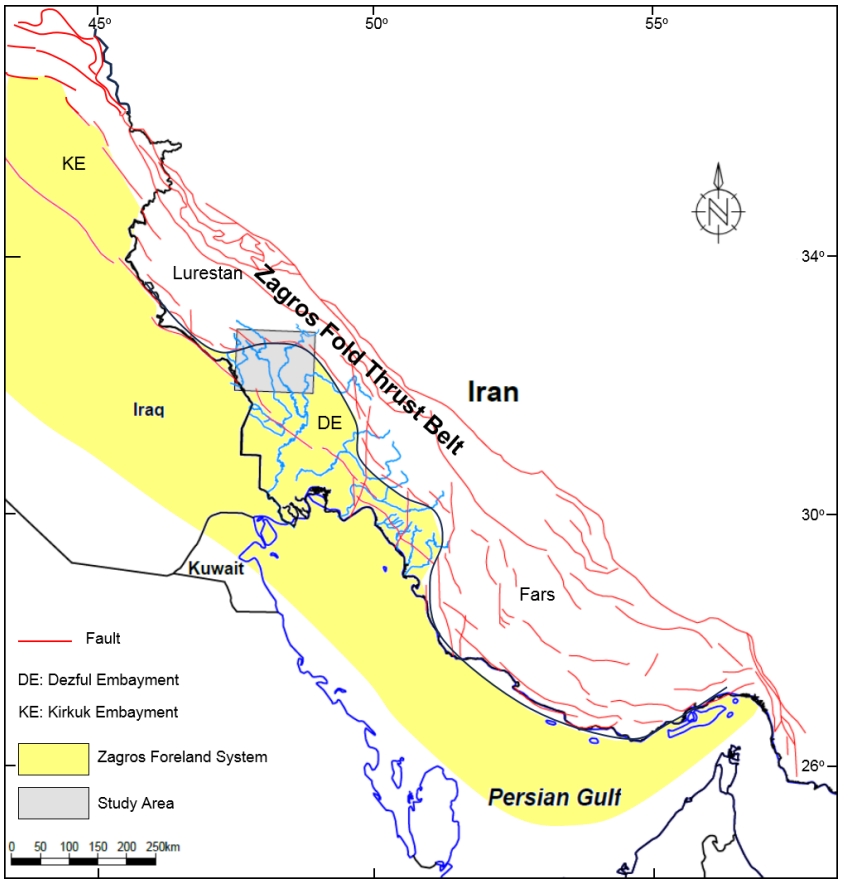
با توجه به اینکه چین‌خوردگی و راندگی، مکانیزم‌های اصلی در کوتاه شدگی پوشش رسوبی کمربندهای چین‌خورده رانده و حوضه‌های پیش‌ژرفای مجاور آنها هستند در بسیاری از حوضه‌های پیش‌بوم، افق جدایشی اصلی بین پی‌سنگ، پوشش رسوبی و گسل‌های راندگی که از افق جدایشی اصلی منشعب می‌شوند و به نوبه خود به صفحات راندگی مستقلی تبدیل می‌شوند، قرار دارد. ساختارهای مرتبط با گسل ممکن است هندسه پیچیده‌ای داشته باشند و این پیچیدگی در صورت تغییر شکل صفحات راندگی به دلیل چین‌خوردن، افزایش یافته و منجر به افزایش ریسک اکتشاف تله‌های نفتی می‌شود.

مطالعه سیستم رودخانه‌ای حوضه‌های پیش‌ژرفا در پی‌بردن به تکامل آنها مفید است. به عنوان مثال، رودخانه‌های حوضه پیش ژرفا در دو گروه طولی و عرضی دسته‌بندی می‌شوند. در طی دوره‌هایی که بار تکتونیکی (tectonic loading periods) رخ می‌دهد رودخانه‌های کوتاه عرضی به رودخانه‌های طولی طویل در بخش نزدیک به منشاء (proximal) و یا بخش میانی حوضه پیش‌بوم متصل می‌شوند ولی در دوره‌هایی که بار، توسط فرسایش برداشته می‌شود (erosional unloading) در این صورت حوضه، متمایل به بازگشت به موقعیت قبلی است و به این حالت flexural rebound اطلاق می‌شود و در این دوره‌ها، رودخانه‌های عرضی بزرگ در سرتاسر حوضه پیش‌بوم جریان پیدا می‌کنند و همین امر سبب جابجایی رودخانه‌های طولی به طرف موقعیت‌های دور از منشاء (distal) می‌شوند (Burbank, 1992).

در خصوص کمربند زاگرس، که بخشی از کوهزایی آلپ - هیمالیا است، هم‌گرایی بین صفحات عربی و اوراسیا منجر به پیدایش سیستم پیچیده‌ای از کمربندهای چین‌خورده رانده شده و حوضه‌های پیش‌ژرفا شده است. تغییر شکل داخلی اغلب با چین خوردگی مشخص می‌شود که به شناسایی هندسه پیچیده مشاهده شده در پروفیل‌های لرزه‌ای کمک می‌کند.

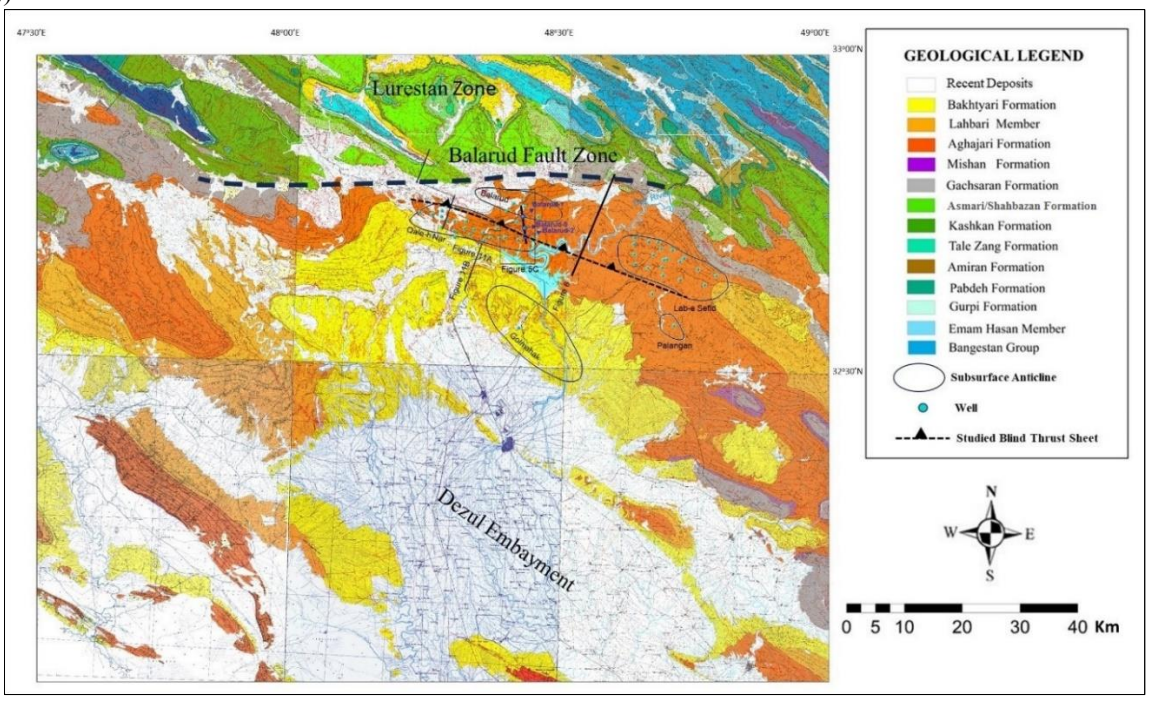
فروبار دزفول (Dezful Embayment) بخشی از حوضه پیش‌بوم میانرودان (Mesopotamian Foreland Basin) (شکل ۱)، است که با داشتن پوشش رسوبی ضخیم، به دلیل اهمیت اقتصادی، به ویژه منابع پربار هیدروکربنی، موضوع مطالعات بسیاری بوده است. منطقه مورد مطالعه در قسمت شمالی فروافتادگی دزفول، در مجاورت منطقه گسلی بالارود (BFZ) (شکل ۲)، به عنوان یک پهنه برشی چپ‌لغز با توان لرزه‌خیزی بالا، قراردارد(Yaghoubi et al., 2023). پهنه گسلی بالارود در مقالات متعددی (Sepehr and Cosgrove, 2004; Emami et al., 2010; Navabpour et al., 2010; Nissen et al., 2011; Derikvand et al., 2018; Yaghoubi et al., 2021; Razavi Pash et al., 2021; Vergés et al., 2024) از لحاظ لرزه‌خیزی یا شواهد سطحی آن مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی سیستم رودخانه‌ای این کمربند نشان می‌دهد که رودخانه‌های عرضی آن (مانند کارون، دز، کرخه، زال)، به رودخانه‌های طولی اصلی (فرات، دجله و اروند) در قسمت انتهایی حوضه پیش‌ژرفا بهم می‌پیوندند که نشان‌دهنده تأثیر فاز تکتونیکی آلپ پسین است. این مطالعه به وضوح بر روی جنبه هندسی یک صفحه راندگی پنهان در جنوب BFZ متمرکز شده است و تلاش می‌کند تا تکامل این صفحه را با ویژگی‌های ساختاری آن در رابطه با پوشش رسوبی آشکار نماید. با توجه به اینکه در سیستم رودخانه‌ای و دلتایی، اندازه دانه‌ها یک نشانگر مهم در بررسی سیر تحول حوضه رسوبی است.

اهداف این مطالعه بررسی هندسه یک راندگی مدفون در جنوب BFZ و پی بردن به تکامل آن از طریق ویژگی‌های ساختاری این راندگی در رابطه با پوشش رسوبی است، هدف دیگر این مطالعه بررسی مسیرهای تغذیه رسوبات آواری سیستم پیش‌ژرفا در بخش شمالی فروبار دزفول و مشخص نمودن نحوه کلی پرشدگی این حوضه برای درک بهتر دینامیسم این منطقه در طی عملکرد فاز کوهزایی زاگرس و همچنین توضیح رابطه بین صفحه راندگی و BFZ با ادغام داده‌های رخنمون، چاه و لرزه‌نگاری است.



شکل ۱- منطقه مورد مطالعه به عنوان بخشی از سیستم پیش‌بوم نئوژن زاگرس (با کمی تغییرات Pirouz et al. (2017) & Pirouz (2018)).

Figure 1: The study area as part of the Neogene Zagros Foreland System (modified after Pirouz et al. (2017) & Pirouz (2018)).



شکل ۲- نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه همراه با عناصر ساختاری اصلی.

Figure 2. Geological map of the study area with the major structural elements

۲-زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

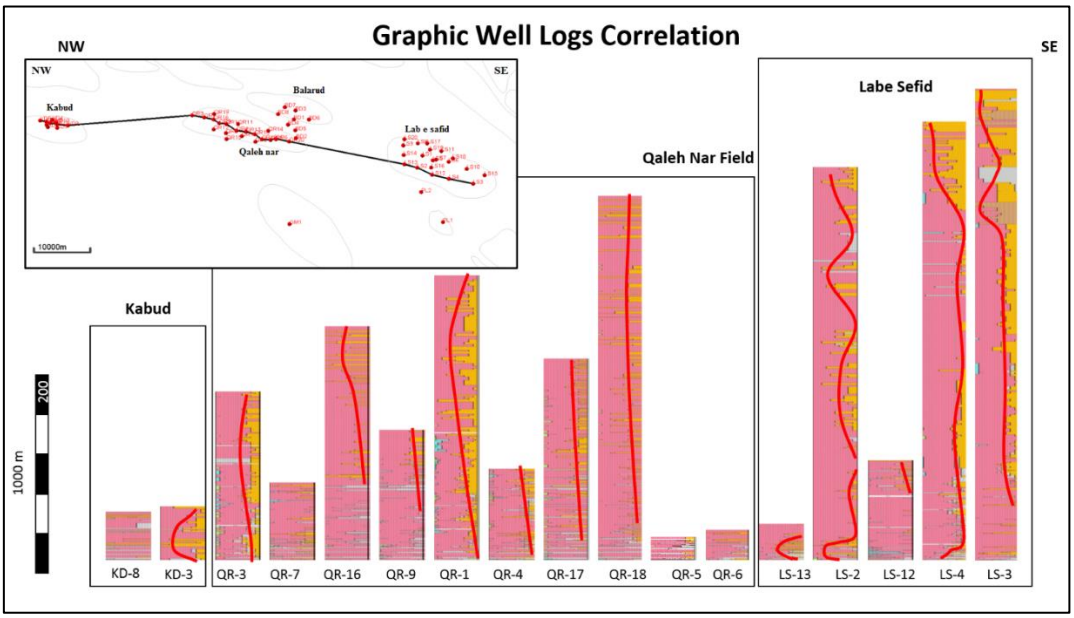
از دید زمین‌شناسی محدوده مطالعاتی این پژوهش بخشی از کمربند ساده چین خورده زاگرس و مشتمل بر تاقدیس‌های سطحی و زیرسطحی است که روی پی‌سنگ این محدوده قرار گرفته‌اند. ستون چینه‌شناسی این محدوده با ستبرایی بیش از ۱۰ تا ۱۲ کیلومتر، مشتمل بر نهشته‌های با سن پالئوزوییک و مزوزوییک از حاشیه غیر فعال صفحه عربی (با سن سنوزوییک)که در طی فاز کوهزایی زاگرس رسوب‌گذاری شده‌اند (Motiei, 1993.) منطقه مورد مطالعه در طول جغرافیایی ۴۷° ۳۰′به ۴۹° ۰۰′ شرقی و عرض جغرافیایی ۳۲° ۳۰′ به ۳۳° ۰۰′ شمالی در بخش مرکزی زاگرس واقع شده است. کمربند چین‌خورده و رانده شده زاگرس با روند شمال باختری - جنوب خاوری در جنوب غرب ایران قرار دارد. کمربند زاگرس ۱۸۰۰ کیلومتر طول دارد و از کوه توروس در شمال ترکیه تا تنگه هرمز در ایران امتداد دارد (Alavi, 1994). این کمربند در هنگام برخورد قاره-قاره تشکیل می‌شود. برخورد و کوتاه شدن پوسته در زمان ترشیاری رخ داده است (Falcon, 1969; Berberian and King., 1981; Sherkati et al., 2006). احتمالاً حداقل از اوایل میوسن همگرایی و تغییر شکل منطقه‌ای در سراسر زاگرس وجود داشته است (Fakhari et al., 2008; Allen et al., 2011).

۳-داده‌ها و روش‌ها

در مجموع سه دسته داده در این تحقیق مورد استفاده قرار گرفتند. نوع اول شواهد سطحی شامل رخنمون لایه‌های کرتاسه و سنوزوئیک است (شکل ۲). این شواهد طی بازدیدهای میدانی متعدد جمع آوری و با نقشه‌های زمین‌شناسی در مقیاس ۱:۱۰۰۰۰۰ تهیه شده توسط شرکت ملی نفت ایران ادغام شدند. داده‌های چاه، نوع دوم است بطوریکه بیش از ۴۰ حلقه چاه در منطقه مورد مطالعه برای اهداف اکتشاف و تولید هیدروکربن حفر شده است.

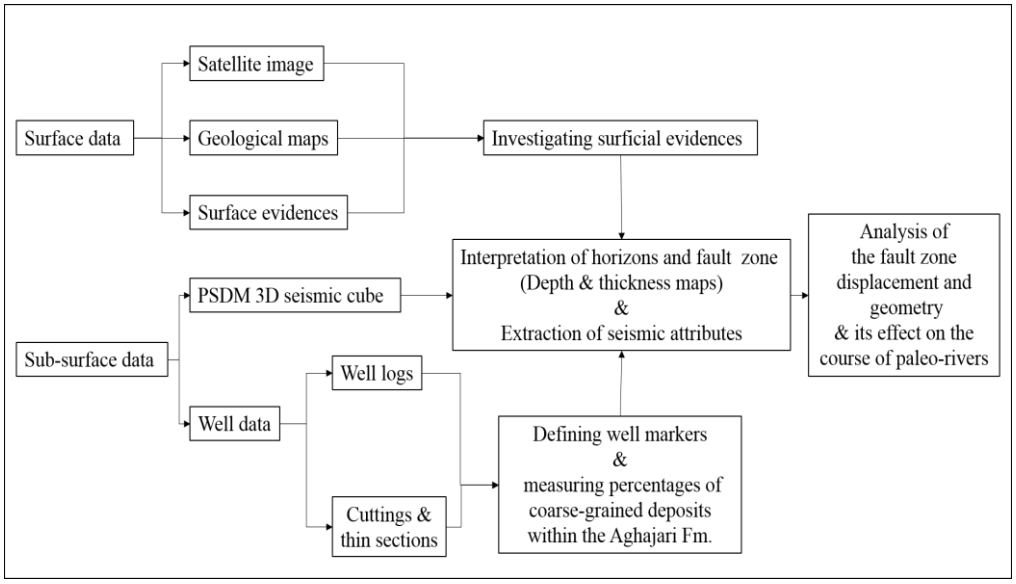
مکعب لرزه‌نگاری سه بعدی در حوزه عمق که تاقدیس‌های بالارود، لب سفید و قلعه نار را پوشش می‌دهد به عنوان سومین نوع داده در نظر گرفته شده است. کیفیت داده‌های لرزه‌ای برای شناسایی عناصر ساختاری، به‌ویژه یک پهنه راندگی شمال باختری-جنوب خاوری که در قسمت میانی مکعب لرزه‌نگاری تشخیص داده شده است، مناسب می‌باشد.

داده‌های چاه در نرم افزار تفسیر وارد شده و برای سهولت تفسیر لرزه‌نگاری ساختارهای زیر سطحی با داده‌های لرزه‌نگاری تلفیق شده است. همچنین سه افق چینه‌شناسی راس سازند گچساران (Langhian stage)، راس و قاعده آسماری با سن الیگوسن تا میوسن پایینی در حوزه عمق مشخص و مورد تفسیر قرار گرفته است. تفسیر انجام گرفته با عمق افق‌های مذکور در موقعیت چاه‌ها انطباق داده شده است. پهنه گسلی مورد بحث چند چاه را قطع می‌کند و در نتیجه، از نمودارهای گرافیکی این چاه‌ها برای تعیین دقیق بخش گسل خورده و تکرار لایه‌ها، ناشی از راندگی استفاده شده است. علاوه براین، در یک مورد، خرده‌های حفاری و مقاطع نازک میکروسکوپی برای شناسایی سن لایه‌ها که توسط گسل جابجا شده‌اند، مورد استفاده قرار گرفتند. صفحه گسلی با دقت زیادی در داده لرزه‌نگاری مورد تفسیر قرار گرفت. از نقشه‌های ضخامتی برای بررسی تغییرات ضخامت در طرفین گسل استفاده شده است. علاوه بر این، هندسه صفحه گسل با استفاده از نشانگرهای لرزه‌ای ساختاری و روش‌های تجسم سه بعدی برای تشخیص جهت جابجایی گسل مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است.در مرحله بعد بر اساس نگارهای گرافیکی و ترکیبی چاه‌ها، با توجه به درصد رسوبات آواری دانه درشت (ماسه، سیلت و کنگلومرا) نسبت به کل رسوبات در ۳۰۰ متر بخش آغازین روباره و همچنین در کل روباره سازند آغاجاری در موقعیت چاه‌ها محاسبه شد و سپس برای ۳۰۰ متر آغازین و کل ستون روباره آواری، نقشه درصد رسوبات دانه درشت در سرتاسر ناحیه مورد مطالعه(شکل ۳) تهیه شد. مرحله دیگر از مطالعه، بررسی و تفسیر بازتابنده‌ها در مکعب لرزه‌نگاری سه‌بعدی بود. بدین ترتیب نقشه‌های عمقی و ضخامتی برای افق‌ها و لایه‌های مختلف تهیه شد. علاوه براین با استخراج نشانگرهای لرزه‌ای سطحی و حجمی در امتداد افق‌ها و لایه‌ها، تلاش شد تا پیکره‌های زمین‌شناسی(geo-bodies) همانند کانال‌ها و رودخانه‌های قدیمی شناسایی شوند. مسیر انجام کار در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۳- مقایسه بین نمودارهای چاه‌نگاری سازند آغاجاری در سراسر منطقه مورد مطالعه. (KD: Kabud, QR: Qaleh Nar, LS: Labe Sefid)

Figure 3. Correlation among the graphic well logs of the Aghajari Formation across the study area (KD: Kabud, QR: Qaleh Nar, LS: Labe Sefid).



شکل ۴-مسیر انجام کار تحلیل یک پهنه گسلی و سیستم رودخانه ای در قسمت شمالی فروافتادگی دزفول.

Figure 4. General workflow of analyzing a fault zone & fluvial system in the northern part of the Dezful Embayment.

۴- بحث و نتایج

۴-۱- تحلیل ساختاری

تکرار سازند گچساران و آسماری در چاه‌های بالارود ۱ و ۲ مشهود است (شکل ۵a)، همچنین، یک برش در راستای موردنظر در سراسر این چاه‌ها(شکل ۵b) به وضوح هندسه این صفحه گسلی را نشان می‌دهد. تاقدیس بالارود از طریق این گسل بر روی تاقدیس قلعه‌نار رانده شده است که در نقشه عمقی رأس سازند آسماری دیده می‌شود (شکل ۵c). این گسل همچنین در یک نیم‌رخ لرزه‌ای در حوزه عمق در جهت NE-SW نشان داده شده است (شکل ۶). هر دو تاقدیس بالارود و

قلعه نار که به ترتیب در بلوک‌های فرادیواره و فرودیواره این صفحه راندگی قرار دارند، در این شکل مشهود است. علاوه بر این تاقدیس‌ها، ساختارهای دیگری نیز در نقشه عمقی (شکل ۷) به همراه سطح گسل نشان داده شده‌اند. برخی از این ساختارها به‌ویژه گسل‌های کوچکتر ممکن است گسل‌های مرتبه پایین پهنه گسلی بالارود باشند ولی با توجه به قدرت تفکیک پایین داده لرزه‌نگاری و ابعاد نسبتاً کوچک گسل‌های مرتبه دوم و سوم نتوان بسادگی آنها را در داده لرزه‌نگاری تشخیص داد. نقشه عمقی سطح گسل در شکل ۸a نشان داده شده است. شیب سطح گسل استخراج شده است و در شکل ۸b نشان داده شده است. همچنین، حداکثر ویژگی انحنای سطح گسل محاسبه شده و در شکل۸c نشان داده شده است. برای تحلیل ساختاری دقیق سطح گسل، باید آن را به صورت سه بعدی با پوشاندن سازندهای آغاجاری و بختیاری به عنوان روباره بالای آن با ضخامت متغیر بررسی کنیم (شکل ۸d) نقشه ضخامت بلوک‌های فرادیواره و فرودیواره سازندهای آسماری و قدیمی‌تر می‌تواند در تشخیص جابجایی تقریبی بلوک فرادیوراه و فرودیواره (شکل ۹) مفید باشد زیرا تحت تأثیر این راندگی قرار می‌گیرند.

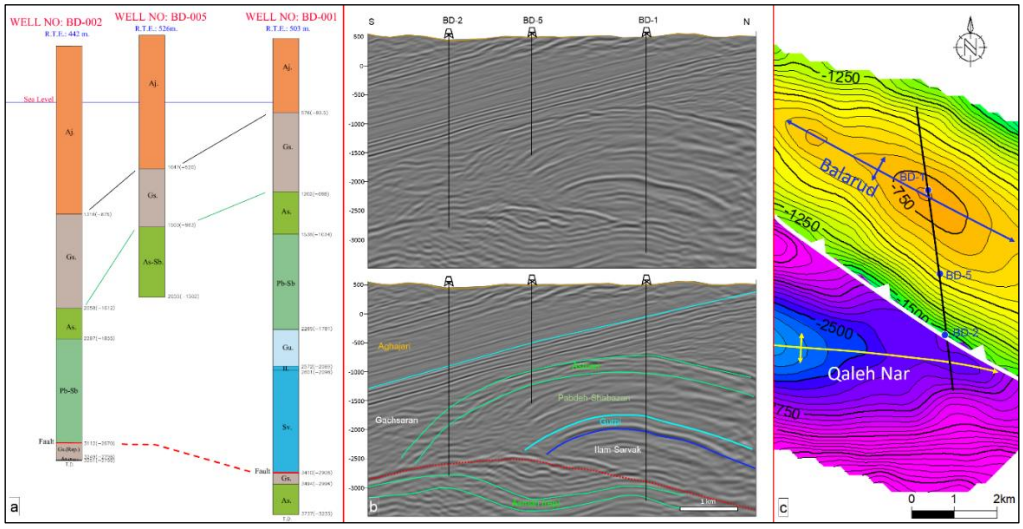
همچنین، نشانگر حداکثر انحنای سطح گسل محاسبه شده و در شکل۸c نشان داده شده است. خطوارهای با روند NE-SW را نشان می‌دهد که به عنوان شاهدی برای جهت لغزش می‌باشد. ضخامت واحد پابده - شهبازان در بلوک فرادیواره پس از انتقال در جهت خطواره شناسایی شده، با ضخامت بلوک فرودیواره مطابقت دارد(شکل ۹b). بنابراین، مؤلفه امتداد لغز این راندگی برخلاف جابجایی چپ‌بر پهنه‌گسلی بالارود حداقل است. راندگی مورد نظر بصورت یک عنصر صفحه‌ای با توجه به سطح انحناوار آن همزمان با کوهزایی زاگرس پسین در چین‌خوردگی شرکت نموده است. به نظر می‌رسد هندسه صفحه راندگی تحت تأثیر وزن روباره قرار می‌گیرد که به صورت جانبی تغییر می‌کند. چنین تغییر شیب در سطح راندگی در پاسخ به تداوم تغییر شکل و روباره همزمان با تکتونیک توسط Lin و همکاران (۲۰۰۶)، گزارش شده است. تصور می‌رود تغییر شیب موضعی این پهنه راندگی با شیب کلی به طرف شمال خاور می‌تواند ناشی از نهشته‌های ضخیم همزمان با تکتونیک آغاجاری و بختیاری در بخش جنوب باختری ناحیه مورد مطالعه باشد که سبب شده در این بخش شیب صفحه راندگی به طرف جنوب باختر تغییر یابد. بنابراین، فعالیت صفحه راندگی به تدریج با تجمع رسوبات آواری آغاجاری و بختیاری که در اثر فراخاست از ارتفاعات بخش داخلی کمربند زاگرس سرچشمه میگرفته، متوقف شده است.

۴-۲- سیستم رودخانه‌ای

نشانگرهای دامنه لرزه‌ای استخراج شده در قاعده سازند آغاجاری و در بخش زیرین سازند آغاجاری به ترتیب در (شکلb و ۱۰a) نشان داده شده اند. این نقشه‌ها نشان می‌دهند که مسیر قدیمی رودخانه دز تقریبا در زیر موقعیت فعلی خود قرار داشته است (خط آبی در شکل b و ۱۰a). از سوی دیگر رودخانه‌ای در جهت شمال باختری – جنوب خاوری به عنوان بخشی از سیستم زهکشی در غرب منطقه مورد مطالعه شناسایی شده است (شکل ۱۰a). هر دو روند شمال باختری – جنوب خاوری و شمال خاوری- جنوب باختری در نقشه درصد آواری درشت دانه در ۳۰۰ متر پایین‌ترین قسمت سازند آغاجاری و کل سازند آغاجاری قابل استنباط هستند (شکل d و ۱۰c). همچنین برخی از این مسیر رودخانه‌ها می‌تواند متأثر از راستای گسل‌های مرتبه پایین پهنه‌گسلی اصلی باشد.

رخنمون قاعده بالایی سازند آغاجاری(سازند لهبری) و بختیاری (شکل ۱۱a) که نمایانگر هر دو رخساره فن رودخانه‌ای (درشت دانه، کنگلومرای صخره‌ساز) و محیط بین فن (intra-fan facies) (ریزدانه عمدتاً سیلت و سنگ ماسه) است. یک مقطع ساختاری (شکل (شکل ۱۱b)، افزایش تدریجی رسوبات درشت دانه (کنگلومراهایی به اندازه سنگ‌ریزه تا تخته‌سنگ) را نشان می‌دهد که توسط رودخانه‌های گیسویی (braided rivers) یا توسط جریان‌های خرده‌دار (debris flow) با گرانروی بالا، منتقل و رسوب می‌کنند.

نتایج نشان می‌دهد که صفحه راندگی مدفون در آخرین مرحله کوهزایی زاگرس، در پاسخ به آواری‌های ضخیم لایه نئوزن به عنوان روباره، چین‌خورده است و این صفحه راندگی را نباید با پهنه گسلی بالارود اشتباه گرفت. همچنین این مطالعه نشان داد که یک سیستم رودخانه‌ای گیسوئی در منطقه با رسوب‌گذاری رسوبات درشت دانه تا بسیار درشت دانه (سنگ‌های سیلت تا تخته‌سنگ که نمایانگر رخساره‌های بین فن و فن‌ها لهبری و بختیاری) در منطقه غالب است.

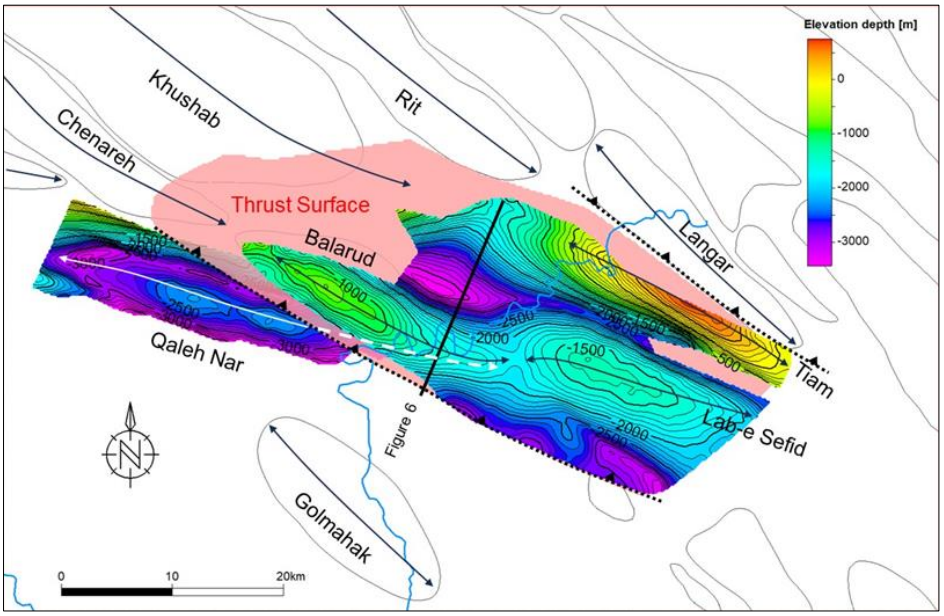


شکل ۵- (a) ترسیم شماتیک (گرافیک لاگ) که نشان دهنده تکرار سازندهای گچساران و آسماری در بالارود ۱ و ۲ است، (b) نیم رخ لرزه‌ای در راستای مورد نظر در حوزه عمقی، که از سه چاه عبور می کند، تفسیر شده و تفسیر نشده است. دو چاه، گسل راندگی را لمس کردند، (c) نقشه عمقی رأس آسماری و محل سه چاه فوق و ناحیه راندگی .برای مکان این چاه‌ها به شکل ۲ مراجعه کنید.

Figure 5. a) Schematic drawing (summary graphic log) representing repetition of the Gachsaran & Asmari formations in the Balarud-1 and 2. b) An uninterpreted and interpreted arbitrary seismic profile in depth domain crossing three wells. Two wells touched the thrust fault. c) Depth map of the top Asmari and location of the above three well and the thrust zone. For the location of these wells see Fig. 2***Error! Reference source not found.***.

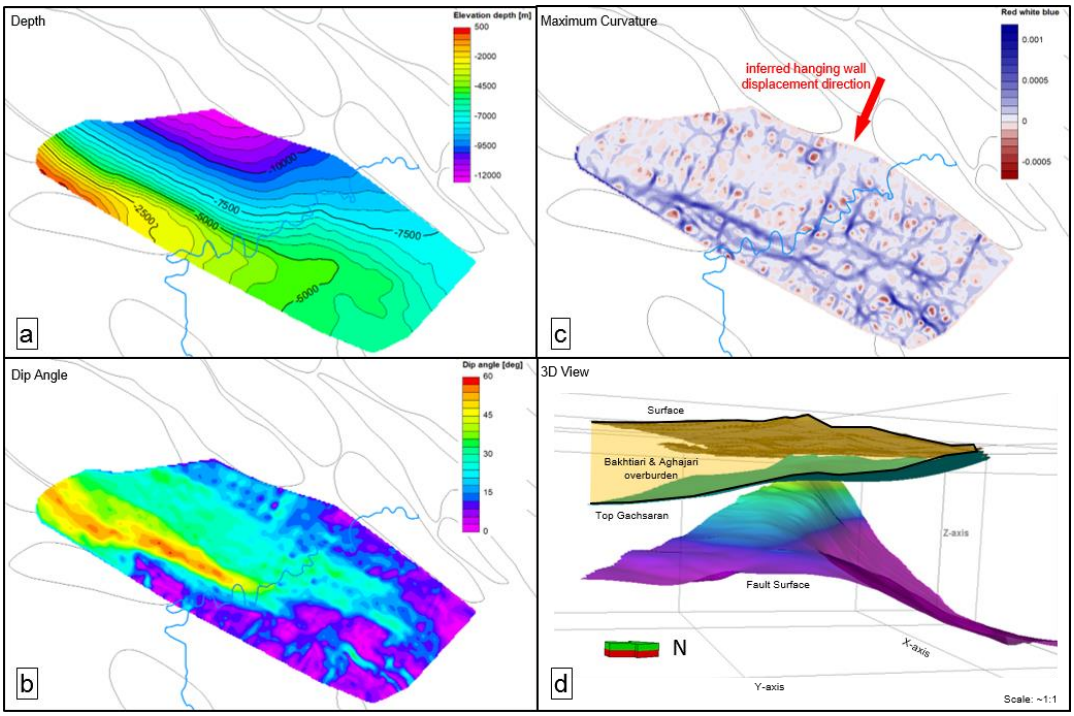
شکل ۶- نیم‌رخ لرزه‌ای تفسیر نشده (بالا) و تفسیر شده (پائین) در حوزه عمق، تاقدیس زیرسطحی بالارود را نشان می‌دهد که بر روی تاقدیس دیگری رانده شده است (تاقدیس بالارود بر تاقدیس قلعه‌نار) این شکل هندسه صفحه راندگی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. برای مکان یابی به شکل ۲ مراجعه گردد.

Fig. 6. An uninterpreted and interpreted seismic profile in the depth domain shows the Balarud subsurface anticline thrusted over another anticline (eastern plunge of the Qalenh Nar Anticline). This figure shows the geometry of the studied thrust sheet. For location, see Figure 2.



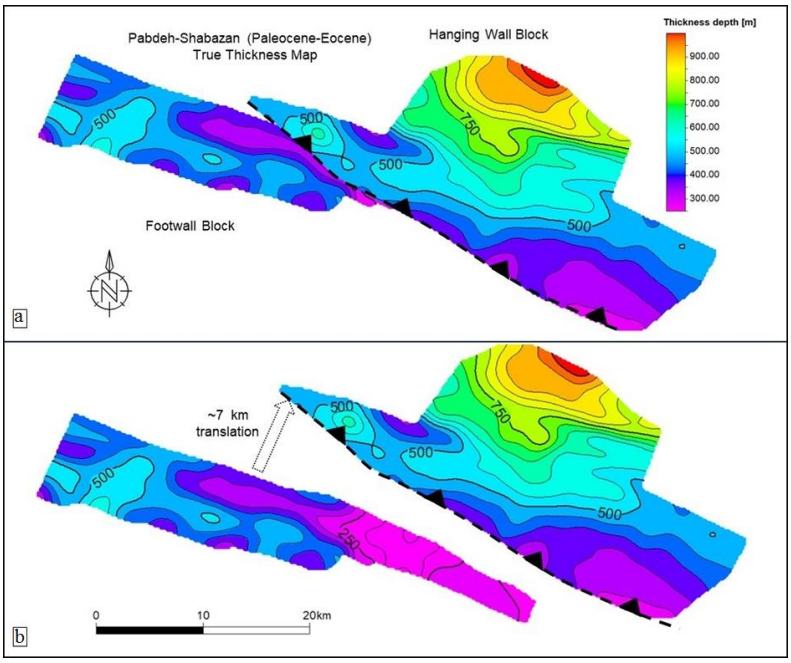
شکل ۷- نقشه عمقی رأس سازند آسماری و صفحه راندگی که در امتداد آن تاقدیس بالارود بر روی تاقدیس قلعه‌نار رانده شده است (مسیر فعلی رودخانه دز احتمالاً در راستای یکی از گسل‌های مرتبه پایین پهنه‌گسلی بالارود است).

Fig. 7. Depth map of the top Asmari Formation and a thrust sheet along which the Balarud Anticline is thrusted over the Qaleh Nar Anticline.



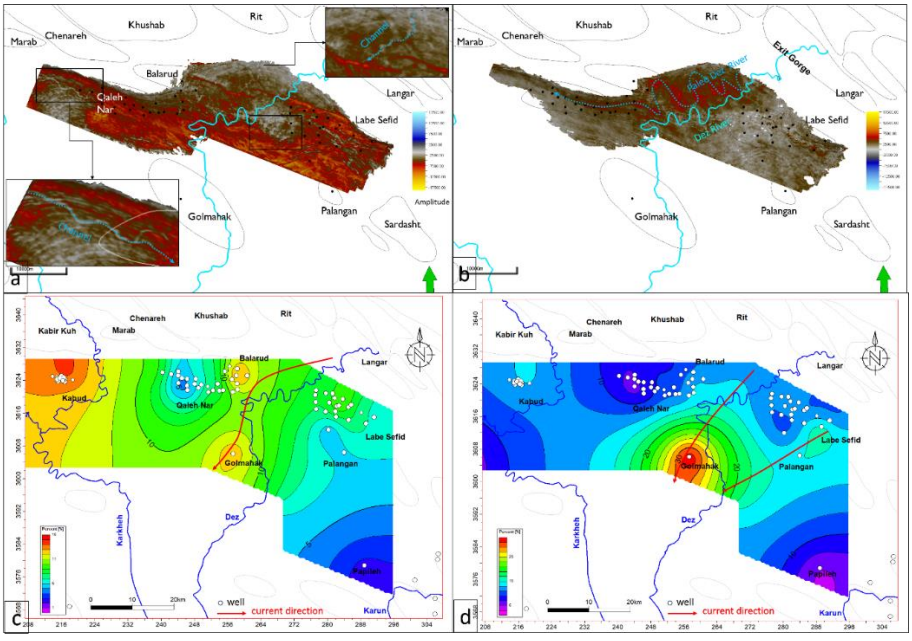
شکل ۸- (a) نقشه عمقی صفحه راندگی مورد مطالعه، (b) ویژگی شیب سطح گسل، (c) ویژگی حداکثر انحنای سطح گسل، (d) تجسم سه بعدی در حوزه عمق که توپوگرافی بالای گچساران و سطوح گسل را نشان می‌دهد. انحنای سطح گسل در زیر بار ضخیم بالای سازند گچساران کاهش می‌یابد .سطح راندگی در پاسخ به وزن روباره متغیر جانبی منحنی (غیر مسطح) شد.

Fig. 8. (a) Depth map of the studied thrust sheet, (b) Dip attribute of the fault surface, (c) Maximum curvature attribute of the fault surface, and (d) A 3D visualization in depth domain illustrating the topography, top Gachsaran and fault surfaces. Dip of the fault surface reduces beneath the thick post-Gachsaran overburden. The thrust surface became curvilinear (non-planar) in response to the laterally variable overburden weight.



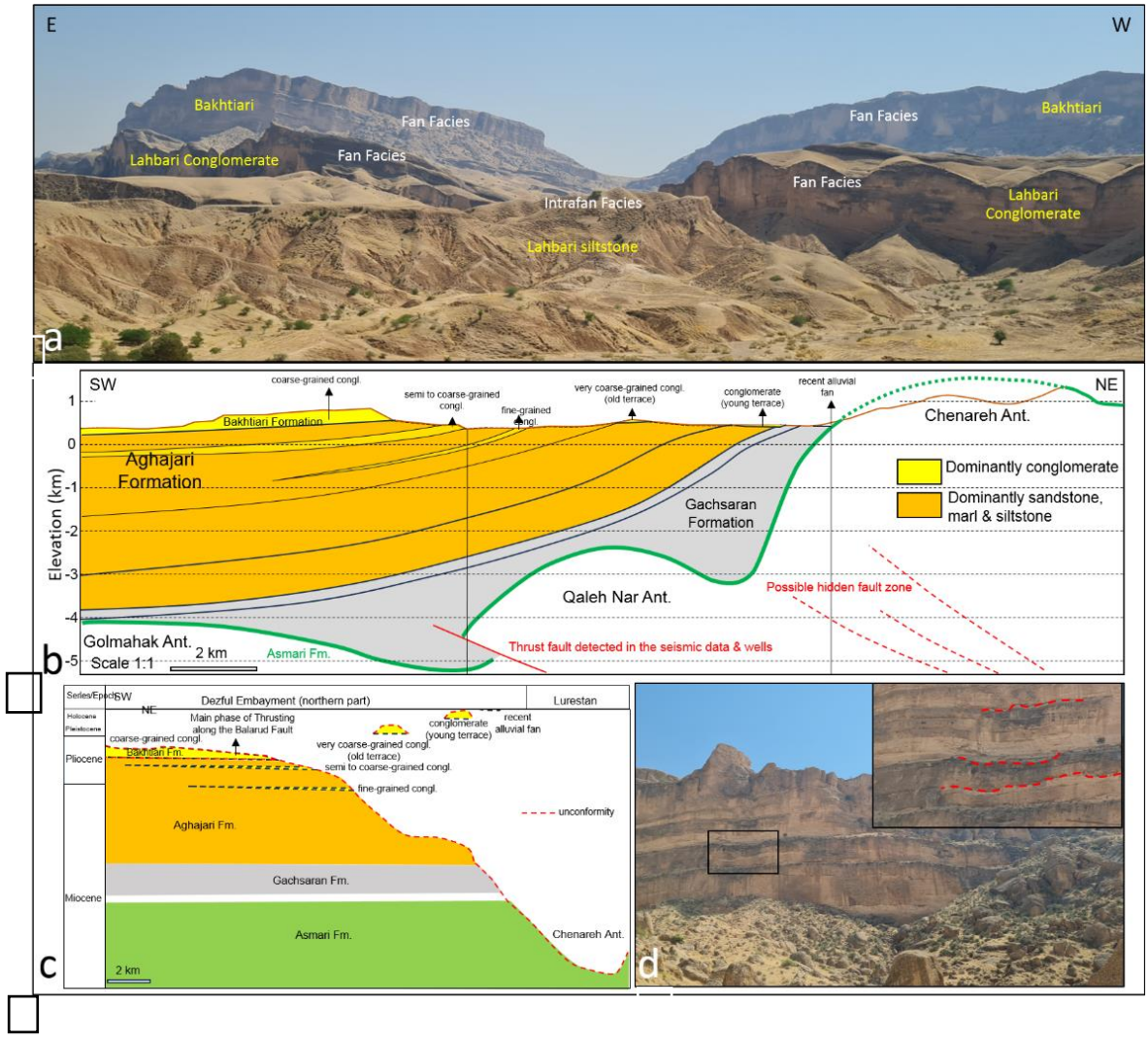
شکل ۹- (a) نقشه ضخامت واحد پابده - شهبازان در هر دو بلوک فرادیواره و فرودیواره (b) نقشه ضخامت بلوک فرادیواره حدود ۷ کیلومتر در جهتی که با ویژگی حداکثر انحنای تعریف شده است (شکل 9c)

Fig. 9. (a) Thickness map of the Pabdeh-Shahbazan unit at both hanging and footwall blocks of the thrust, and (b) Thickness map of the hanging wall block is translated about 7 km in the direction defined by the maximum curvature attribute (Figure 9c).



شکل ۱۰- (a) نشانگر دامنه لرزه‌ای در قاعده سازند آغاجاری، (b) نشانگر دامنه لرزه‌ای در بخش زیرین سازند آغاجاری، (c) درصد آواری دانه درشت در ۳۰۰ متر آغازین سازند آغاجاری، (d) درصد آواری دانه درشت در کل سازند آغاجاری(این شکل‌ها تغییر در راستای رودخانه‌ها را نسبت به مسیر امروزی آنها متاثر از تحولات زمین‌شناسی را نشان می‌دهد).

Fig. 10. (a) Seismic amplitude attributes along the base of Aghajari Formation, (b) Seismic amplitude attributes along the lower part of the Aghajari Formation, (c) Contour map of coarse-grained deposits percentage within 300 meters of the lowermost part of the Aghajari Formation, (d) Contour map of coarse-grained deposits percentage within the whole Aghajari Formation.



شکل ۱۱- (a) رخنمون سازندهای آغاجاری (بخش لهبری) و بختیاری در جنوب ناحیه مورد مطالعه با رخساره‌های فن و بین فن، (b) برش زمین‌شناسی ساختمانی از منطقه مورد مطالعه، (c) نمودار چینه‌نگاری زمانی (chronostratigraphic chart) در امتداد برش زمین‌شناسی، (d) سطوح فرسایشی در قاعده پیکره‌های کنگلومرایی سازند بختیاری نشانگر انباشته شدن منقطع فن‌ها.

Figure 11. (a) Outcrop of the Aghajari (Lahbari Member) and Bakhtiari formations in the south of the study area with fan and intra-fan fluvial facies. (b) A structural cross-section across the study area. For location, see Fig. 2. A conceptual chronostratigraphic chart along the structural cross section. (d) Erosional surfaces within the Bakhtiari Formation represent the periodic accumulation of fluvial fan debris.

۵-نتیجه‌گیری

تجزیه و تحلیل هندسی یک صفحه راندگی در جنوب پهنه گسلی بالارود، نشان‌دهنده، سطح گسلی است که پس از فعالیت در میوسن به صورت یک عنصر مسطح تغییر شکل داده است. این مطالعه نمی‌تواند ثابت نماید که صفحه راندگی بخشی از پهنه گسلی بالارود است زیرا فعالیت آن قدیمی‌تر از فعالیت پهنه گسلی بالارود فعلی بوده و علاوه بر آن فرآیندها و سازوکار آنها متفاوت است. برای نمونه این صفحه راندگی عمدتاً دارای مولفه جابجایی معکوس است، در حالی که پهنه گسلی بالارود علاوه بر مؤلفه معکوس، داری مؤلفه امتدادلغز نیز است. شواهدی کافی نیز برای فرض این راندگی به عنوان بخشی از گسل‌های فرعی و ریدل پهنه‌گسلی بالارود، نیست. پهنه‌گسلی بالارود بیانگر یک پهنه گسلی اصلی عمیق است و اطلاعات چاه و داده‌های لرزه‌نگاری موجود به تنهایی قادر به مطالعه جامع آن نیستند. مطالعات نظام‌مند یکپارچه شامل تلفیق با سایر داده‌ها همانند داده‌های مغناطیس‌سنجی، گرانی‌سنجی، زمین‌لرزه برای رمزگشایی بخشی از ماهیت آن مورد نیاز است. فعالیت این راندگی به همراه گسل‌های فرعی و مرتبه پایین پهنه گسلی

اصلی بالارود، سیستم زهکشی منطقه را تحت تأثیر قرار می‌دهد و رودخانه‌ها عمدتاً در جهت کم و بیش شمالی ـ جنوبی و شمال خاوری ـ جنوب باختری تغییر جهت می‌دهند. تجمع رسوبات آواری در جنوب ناحیه مورد مطالعه نیز متاثر از دوره‌های فراخاست و فرسایش در شمال منطقه (زون لرستان) و ایجاد فضای رسوبگذاری کافی در حوضه خمشی فروبار دزفول است.

تقدیر و تشکر

نگارندگان مراتب تشکر خود را از شرکت ملی مناطق نفت‌خیز جنوب برای در اختیار قرار دادن داده‌های لرزه‌نگاری، اطلاعات چاه و فراهم نمودن امکان و تسهیلات بازدیدهای صحرایی اعلام می‌دارند. همچنین از آقای دکتر عبدالرضا باوی و آقای مهندس احسان قاربانیان سپاسگزاری می‌شود.

مراجع

Alavi, M., 1994. Tectonics of the zagros orogenic belt of iran: new data and interpretations. Tectonophysics 229(3-4), 211–238. https:// doi:10.1016/0040-1951(94)90030-2.

Allen, M.B., Talebian, M., 2011. Structural variation along the Zagros and the nature of the Dezful Embayment. Geological Magazine 148(5-6), pp.911-924. https://. doi:10.1017/s0016756811000318

Berberian, M., King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. Canadian Journal of Earth Sciences 18(2), 210–265. https://doi:10.1139/e81-019.

Burbank, D.W., 1992. Causes of recent Himalayan uplift deduced from deposited patterns in the Ganges Basin. Nature 357, 680–682. https://doi.org/10.1038/357680a0.

Decelles, P.G., Hertel, F., 1989. Petrology of fluvial sands from the Amazonian foreland basin. Peru and Bolivia. Geological Society of America Bulletin 101(12), pp.1552-1562. https://doi.org/10.1130/0016-7606(1989)101<1552:POFSFT>2.3.CO;2.

Decelles, P.G., Giles, K.A. 1996. Foreland basin systems. Basin research 8(2), pp.105-123. https://doi.org/10.1046/j.1365-2117.1996.01491.x.

Derikvand, B., Alavi, S.A., Abdollahie Fard, I., Hajialibeigi, H., 2018. Folding style of the Dezful Embayment of Zagros Belt: Signatures of detachment horizons, deep-rooted faulting and syn-deformation deposition. Mar. Pet. Geol 91, 501–518. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2018.01.030.

Dickinson, W.R., Suczek, C.A., 1979. Plate tectonics and sandstone compositions. Aapg Bulletin 63(12), pp.2164-2182. https://doi.org/10.1306/2F9188FB-16CE-11D7-8645000102C1865D.

Emami, H., Vergés, J., Nalpas, T., Gillespie, P., Sharp, I., Karpuz, R., Blanc, E.P., Goodarzi, M.G.H., 2010. Structure of the Mountain Front Flexure along the Anaran anticline in the Pusht-e Kuh Arc (NW agros, Iran): Insights from sand box models. Geol. Soc. Spec. Publ 330, 155–178. https://doi.org/10.1144/SP330.9.

Fakhari, M.D., Axen, G.J., Horton, B.K., Hassanzadeh, J., Amini, A., 2008. Revised age of proximal deposits in the Zagros foreland basin and implications for Cenozoic evolution of the High Zagros. Tectonophysics 451(1-4), 170-185. https://doi.org/10.1016/j.tecto.2007.11.064

Falcon, N.L., 1969. Problems of the relationship between surface structure and deep displacements illustrated by the Zagros. Range, 9-21. https:// doi: 10.1144/GSL.SP.1969.003.01.02.

Gérard, B., Rouby, D., Huismans, RS., Robin, C., Fillon, C., Braun, J., 2023. Impact of inherited foreland relief on retro-foreland basin architecture. Journal of Geophysical Research: Solid Earth 128. https://doi.org/10.1029/2022JB024967.

Lin, M.L., Chung, C.F., Jeng, F.S., 2006. Deformation of overburden soil induced by thrust fault slip. Eng. Geol. 88, 70–89. https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2006.08.004

Motiei, H., 1993. Stratigraphy of Zagros, Treatise on the geology of Iran. Geological Survey of Iran, Tehran [in Persian].

Navabpour, P., Angelier, J., Barrier, E., 2010. Mesozoic extensional brittle tectonics of the Arabian passive margin, inverted in the Zagros collision (Iran, interior Fars). Geol. Soc. Spec. Publ. 330, 65–96. https://doi.org/10.1144/SP330.5.

Nissen, E., Tatar, M., Jackson, J.A., Allen, M.B., 2011. New views on earthquake faulting in the Zagros fold-and-thrust belt of Iran. Geophys. J. Int. 186, 928–944. https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05119.x

Pirouz, M., Avouac, J.P., Hassanzadeh, J., Kirschvink, J.L., Bahroudi, A., 2017. Early Neogene foreland of the Zagros, implications for the initial closure of the Neo-Tethys and kinematics of crustal shortening. Earth and Planetary Science Letters 477, 168–182. https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.07.046.

Pirouz, M., 2018. Post-collisional deposits in the Zagros foreland basin: Implications for diachronous underthrusting 107, 1603-1621. https://doi.org/10.1007/s00531-017-1561-y.

Razavi Pash, R.R., Sarkarinejad, K., Sherkati, S., Motamedi, H., 2021. Analogue model of the Bala Rud Fault, Zagros-an oblique basement ramp in a fold-and-thrust belt. Int. J. Earth Sci. https://doi.org/10.1007/s00531-21-01987-0.

Schwab, F.L., Allen, P.A., Homewood, P., 1986. Sedimentary signatures of foreland basin assemblages: real or counterfeit., Foreland basins 8, 395-410. https://doi.org/10.1002/9781444303810.ch21.

Sepehr, M., Cosgrove, J.W., 2004. Structural framework of the Zagros Fold-Thrust Belt, Iran. Mar. Pet. Geol. 21, 829–843. https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2003.07.006.

Sherkati, S., Letouzey, J., 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.

Vergés, J., Casini, G., Ruh, J., Cosgrove, J., Sherkati, S., Najafi, M., Casciello, E., Saura, E., Abdollahie Fard, I., Piryaei, A., Sepehr, M., Frizon de Lamotte, D., Letouzey, J., Goodarzi, H., Soleimany, B., Jahani, S., 2024. Structural Style and Timing of NW-SE Trending Zagros Folds in SW Iran: Interaction with North-South Trending Arabian Folds and Implications for Petroleum Geology, Journal of Petroleum Geology 47(1), 1-70. https://doi.org/10.1111/jpg.12850.

Yaghoubi, A., Dusseault, M.B., Leonenko, Y., 2023. Stress Variation around the Balarud Lineament in the Zagros Fold and Thrust Belt and its Implication for Reservoir Geomechanics. 57th US Rock Mech. Symp. https://doi.org/10.56952/ARMA-2023-0270

Yaghoubi, A., Mahbaz, S., Dusseault, M.B., Leonenko, Y., 2021. Seismicity and the state of stress in the dezful embayment, Zagros fold and thrust belt. Geoscience 11, 1–22. https://doi.org/10.3390/geosciences11060254.