



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

Journal homepage <https://gnf.khu.ac.ir>

Analysis of the effects of detachment levels, thrust and basement strike-slip faults on the geometry of the Naft anticline structure in the Lurestan sub-zone, West Iran

Reza Alipoor^{1*}, Mahsa Mehrali Mansouri², Zahra Ghasemi³

1. Assistant professor, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

2. Master of Science, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

3. Master of Science, Department of Geology, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Article info

Article history

Received: 20 July 2021

Accepted: 15 July 2022

Keywords:

Cross-section,
Naft Anticline,
Basement
Lurestan,
Zagros.



Abstract

The Naft anticline is located in the NW-SE of the N Lurestan sub-zone and the Zagros fold and thrust belt. In this sub-zone, the structural geometry of the folded sequence is significantly influenced by the basemen thrust and strike-slip faults and detachment levels. In this research, for the geometrical analysis of the Naft anticline, we utilized the structural profile perpendicular to the anticline in the central region, information from drilling wells in the study area and neighboring anticlines, and the deformation pattern and structural geometry of the Naft anticline. The anticline has two upper (Amiran Formation) and Middle (Garau Formation) detachment levels. The basement thrust faults and detachment levels in the southwestern limb had a significant impact on the folding geometry and led to the formation of disharmonic folding. An N-S basement strike-slip fault in the middle part of the anticline has shifted the anticline axis from N70W in the northwest to N50W in the southeast. In addition, the minor and shallow thrust faults propagation from the upper detachment levels or the independent thrusts in the Gurpi Formation resulted in the development of an axis of two kink and curved hinges in the middle part of the Naft anticline in folded structures. The analysis of the geometrical parameters of the Naft anticline shows that it is an asymmetrical and noncylindrical fold, categorized as an open half-angle fold in terms of tightness.

*Corresponding author: Reza Alipoor E-mail: r.alipoor@basu.ac.ir

How to cite this article: Alipoor, R., Mehrali Mansouri, M., Ghasemi, Z., 2022. Analysis of the effects of detachment levels, thrust and basement strike-slip faults on the geometry of the Naft anticline structure in the Lurestan sub-zone, West Iran. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8 (1), 75-96



EXTENDED ABSTRACT

Introduction

The Naft anticline with a NW-SE trend, is located in the north of the Lurestan sub-zone and the Zagros fold and thrust belt. In this sub-zone, detachment level and thrust faults during different stages of progressive deformation, have complicated the geometry of folded structures (McQuarrie et al., 2004; Casciello et al., 2009). The folded structures and related thrust faults with a general NW-SE trend are the major structures of the Zagros fold and thrust belt (Berberian, 1995). The surface outcrops in the Naft anticline are the upper Cretaceous and Cenozoic formations and from old to the recent are the Gurpi, Amiran, Taleh-Zng, Kashkan, Asmari and Gachsaran formations. In this anticline, thrust and basement strike-slip faults and detachment levels play an important role in the structural geometry of the folded sequence. There are two detachment levels including the Amiran formation as upper detachment level and the Garau Formation as middle detachment level affecting the shallow and deep folding geometry. Detachment levels and basement thrust fault in the southwestern limb of the Naft anticline have affected the folding geometry. In addition to the thrust fault at the southern limb, a north-south basement strike-slip fault in the middle part of this anticline has shifted the anticline axis. Therefore, the aim of this research is the effect of thrust faults and upper and middle detachment levels on the formation of disharmonic folding. To achieve this, we analyzed the structural and kinematic geometry of the anticline by constructing a cross-section perpendicular to its axis trace and examining the strike-slip faults with N-S trends.

Material and methods

In this research, surface and subsurface data have been used to study of the surface and subsurface evidence of north-south strike-slip faults, basement thrusts, structural style, folding geometry and detachment levels in the Naft anticline. The research utilized geological maps (1/100000 scale), satellite images, and digital elevation model (DEM) maps for surface data and data obtained from drilled wells for subsurface data. For further analysis of the structures, a cross-sectional view was created using the Kink method (Suppe, 1985) in the NE-SW direction. This cross-section is perpendicular to the Naft anticline's overall trend.

Results and discussion

The Naft anticline with about 70 km length and 4 km wide and NW-SE trend, is located in the north of Lurestan subzone. Deep, shallow and middle detachment level have influenced the surface structures and also the style of folding in the studied area. In this region, due to the lack of the Hormuz salt outcrops, Cambrian shale surfaces are introduced as the basal detachment, the Jurassic evaporates and shales (such as the Garau formation) are the middle detachment, and Cretaceous marl and shales of the Amiran formation also plays the role of upper detachment level. Basement thrust faults on the southern limb of the Naft anticline have cut the formations from the basement to the middle detachment level (Garau Formation). Generally, this anticline constitutes one of the folded structures in the central and northern sectors of the Lurestan subzone, comprising two shallow and deep anticlines. The shallow anticline is formed above the upper detachment level, while the deep anticline is formed between the basal and upper detachment levels. The two main detachment levels in the study area, including intermediate detachment level (Garau

Formation) and upper detachment level (Amiran Formations), caused deformation and disharmonic folding. Thrust faults are the shallow and deep thrust faults. The upper shallow thrust is rooted in the Amiran Formation and propagated to the surface and the deep thrust is rooted in the Garau Formation and cuts up-ward section and usually died out in the Amiran Formation. In addition to these thrust faults, in the central part of the Naft anticline a right-lateral strike-slip fault has propagated to the upper sedimentary cover and caused change in the anticline trend from N70W in the northwest to N50W in the southeast. In general, the right-lateral strike-slip movement in the Zagros belt is result of the convergence between the Arabian-Iranian plates. The important point is that this right-lateral strike-slip movement generally propagated on the NW-SE trending

Main Recent fault, and evidence suggests that this right-lateral strike-slip movement is not only on the Main Recent fault and it has also propagated outside of the collision zone. This N-S trending strike-slip fault is visible along the Lurestan sub-zone, in the Naft anticline.

Conclusion

The analysis of geometrical parameters of the Naft anticline indicates that it is an asymmetrical, non-cylindrical fold with an open half-angle round. In the study area, the thickness of detachment levels has a major effect on the deformation style, and thrust faults are rooted in these detachment surfaces. The results of this study also indicate that along the anticline axis, where the strike-slip fault movement caused deformation, the folding hinge are changed into two round and kink hinge zones.



بررسی اثرات دگرریختی سطوح جدایشی، گسل‌های راندگی و راستالغز پی‌سنگی بر هندسه ساختاری تاقدیس نفت در پهنه لرستان، باختر ایران

رضا علی‌پور^{۱*}، مهسا مهرعلی منصوری^۲، زهرا قاسمی^۳

۱. استادیار، بخش علوم زمین، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۲. کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

۳. کارشناسی ارشد، بخش علوم زمین، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

اطلاعات مقاله	چکیده
<p>تاریخچه مقاله دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴</p> <p>واژه‌های کلیدی نیمرخ ساختاری، تاقدیس نفت، پی‌سنگ، لرستان، زاگرس.</p>	<p>تاقدیس نفت با راستای شمال باختری-جنوب خاوری در شمال پهنه ساختاری لرستان و باختر کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس واقع شده است. در این پهنه گسل‌های راندگی و راستالغز پی‌سنگی و سطوح جدایشی نقش مهمی در هندسه ساختارهای چین‌خورده ایفا می‌کنند. در این پژوهش جهت تحلیل هندسی تاقدیس نفت با استفاده از ترسیم نیمرخ ساختاری عمود بر راستای تاقدیس در بخش مرکزی، اطلاعات چاه‌های حفاری شده در منطقه مورد مطالعه و تاقدیس‌های همجوار و تجزیه و تحلیل‌های مربوطه، الگوی دگرریختی و هندسه ساختاری تاقدیس نفت مورد مطالعه قرار گرفته است. این تاقدیس دارای دو سطح جدایش بالایی (سازند امیران) و میانی (سازند گرو) است. سطوح جدایشی و راندگی‌های پی‌سنگی در یال جنوب باختری تأثیر زیادی بر هندسه چین‌خوردگی ایجاد کرده‌اند که باعث عدم انطباق چین‌خوردگی سطحی و عمقی شده است. یک گسل راستالغز پی‌سنگی با راستای شمالی-جنوبی در بخش میانی تاقدیس باعث تغییر راستای محور تاقدیس از N70W در بخش شمال باختری به N50W در بخش جنوب خاوری شده است. همچنین راندگی‌های کوچک و سطحی که از سطح جدایش بالایی منتشر شده است یا راندگی‌های مستقل در سازند گورپی باعث تشکیل محوری از دو لولای جناغی و مدور در بخش میانی تاقدیس نفت در ساختارهای چین‌خورده شده است. تجزیه و تحلیل مشخصه‌های هندسی تاقدیس نفت نشان می‌دهد که این تاقدیس یک چین نامتقارن و استوانه‌ای و از نظر فشردگی باز و از نظر کندی چین در رده نیمه‌زاویه‌دار قرار دارد.</p>



*نویسنده مسئول: رضا علی‌پور r.alipoor@basu.ac.ir

استناد به این مقاله: علی‌پور، ر.، مهرعلی منصوری، م.، قاسمی، ز. (۱۴۰۱) بررسی دگرریختی سطوح جدایشی، گسل‌های راندگی و راستالغز پی‌سنگی بر هندسه ساختاری تاقدیس نفت در پهنه لرستان، باختر ایران، ایران. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۱، صفحه ۷۵ تا ۹۶



مقدمه

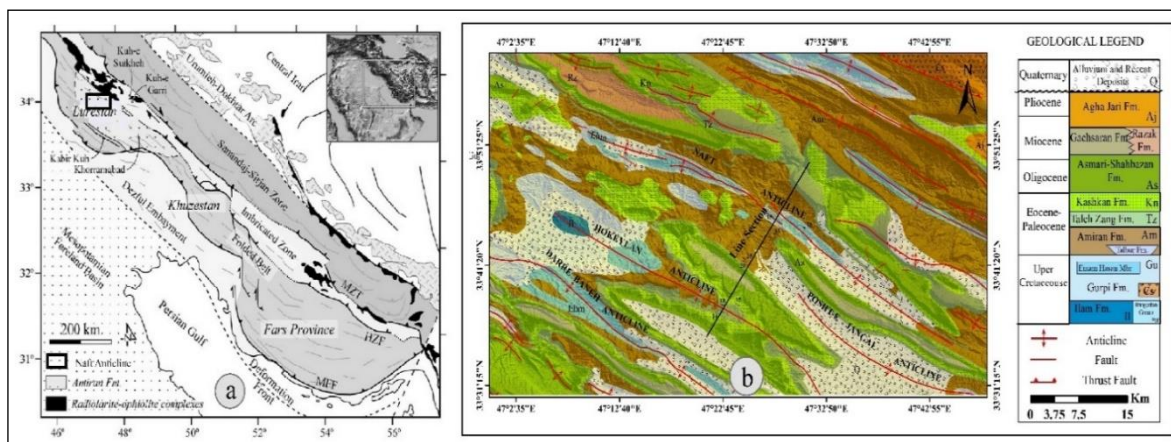
کمر بند کوهزایی زاگرس به عنوان بخشی از سیستم کوهزایی آلپ-همی‌مالیا، از جوان‌ترین پهنه‌های برخورد قاره‌ای می‌باشد که با طولی حدود ۱۸۰۰ کیلومتر، از جنوب‌خاور توسط خطواره عمان و از شمال‌باختر به وسیله گسل امتدادلغز چپ‌گرد آناتولی در ترکیه محدود شده است (Takin, 1972; Haynes and McQuillan 1974; Falcon, 1969; Berberian and King, 1981; Koyi, 1990). چین‌خوردگی‌ها و گسل‌های راندگی، ساختارهای مرتبط با مناطق چین‌خورده-رانده می‌باشند که در یک فاز دگرشکلی به وجود می‌آیند (Tavarnelli, 1997). اغلب چین‌خوردگی‌های زاگرس از نوع نامتقارن هستند، به صورتی که پرشیب‌ترین دامنه تاقدیس‌ها در دامنه جنوب‌غربی قرار دارد (Colman-Sadd, 1978). همچنین حضور افق‌های نامقاوم که نقش افق‌های جدایش را در طی تغییر شکل بازی می‌کند، یک عامل کنترل‌کننده مهم در سبک چین‌خوردگی در کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس می‌باشد (Cotton and Koyi, 2000; Turrini, 2004; Spratt et al., 2001). تاقدیس نفت در منطقه لرستان در زاگرس چین‌خورده که روند کلی آن هم‌راستا با زون راندگی‌هاست (آق‌آب‌تای، ۱۳۸۳) واقع شده است. بررسی هندسه و سبک ساختاری تاقدیس‌ها در کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس از آن جهت حائز اهمیت است که این کمر بند دارای ذخایر هیدروکربوری عظیمی است و اکثر تله‌های نفتی تاقدیسی می‌باشند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی چین‌های مرتبط با گسل راندگی، گسل‌های راستالغز راست‌گرد در منطقه و به کارگیری و

استفاده از مدل‌های هندسی و سپس مطالعه و تفسیر سبک چین‌خوردگی در تاقدیس نفت با استفاده از داده‌های سطحی، ترسیم نیمرخ عرضی و پارامترهای هندسی است.

مواد و روش‌ها

منطقه مورد مطالعه

تاقدیس نفت در شمال زیرپهنه لرستان در کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس و در جنوب کرمانشاه قرار گرفته است. رخنمون سطحی این تاقدیس بیشتر سازند شیلی و قدیمی گورپی است و سازندهای آسماری، کشکان، تله‌زنگ و امیران در یال‌های آن قابل رؤیت هستند. با توجه به تصاویر استریوگرام تهیه شده، تاقدیس نفت یک تاقدیس نامتقارن و با تمایل به سمت جنوب-جنوب‌باختر است. ستون چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از داده‌های چاه‌های حفاری شده (طوری که ضخامت سازندها در این چاه‌ها میانگین گرفته شده) و عملیات صحرایی برای واحدهایی جوان‌تر از کرتاسه که در منطقه رخنمون داشته و واحدهای پالئوزوئیک از گزارش‌های چینه‌شناسی زاگرس استفاده شده است (James and Wynd, 1965; Szabo and Kheradpir, 1978; Ghavidel, 1996). از نظر زمین‌شناسی ساختاری و زون‌های ساختاری، بخش عمده استان لرستان در ارتفاعات زاگرس قرار دارد که به لحاظ داشتن ذخایر نفتی از دیرباز مورد مطالعه زمین‌شناسان قرار داشته است. تاقدیس نفت در منطقه لرستان قرار دارد. این منطقه از دیدگاه زمین‌شناسی یک پیش‌آمدگی در کمر بند چین‌خورده-رانده زاگرس به شمار می‌آید (شکل ۱) (Talbot and Alavi, 1996).



شکل ۱- a) نقشه جایگاه ساختاری و زیرپهنه‌های تکتونیکی کمربند چین خورده رانده زاگرس در جنوب باختر ایران که موقعیت منطقه مورد مطالعه در کمربند چین خورده-رانده زاگرس با مستطیل سیاه رنگ مشخص شده است (Homke et al., 2004). b) نقشه زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در پهنه لرستان، موقعیت نیمرخ ساختاری با خطوط سیاه رنگ مشخص شده است.

Fig. 1. a) Map of the structural setting and tectonic subzones of the Zagros fold and thrust belt in the southwest of Iran, where the location of the study area in the Zagros fold and thrust belt is marked with a black rectangle (Homke et al., 2004). b) Geological map of the study area in the Lurestan region, the location of the structural profile is marked with black lines.

مارنی، ماسه‌سنگ و کنگلومرا تشکیل شده که سن آن در منطقه لرستان پالئوسن در نظر گرفته شده است. قدیمی-ترین سازند رخنمون یافته در تاقدیس نفت، سازند گورپی است که سن آن در منطقه لرستان از کامپانین تا پالئوسن می‌باشد (شکل ۲) (مطیعی، ۱۳۷۲، Casciello et al., 2009).

از نظر چین‌ه‌شناسی، منطقه مورد مطالعه دارای سازندهای اواخر کرتاسه تا الیگوسن می‌باشد. سازندها از جدید به قدیم شامل: سازند آسماری به سن الیگو-میوسن، سازند کشکان با سن ائوسن، سازند تله‌زنگ با سن پالئوسن- ائوسن هستند. سازند امیران واحد چین‌ه‌شناسی دیگر منطقه می‌باشد که یکی از بزرگ‌ترین تغییرات ضخامت را به نمایش گذاشته است. این سازند از شیل‌های

Strata			Formation	Thick (m)	Stratigraphy	Litology	Structural role
Era	System	Series					
Cenozoic	Tertiary	Pliocene	Gachsaran	300	[Cross-hatched pattern]	Evaporite	Very Weak layers
		Miocene					
		Oligocene	Asmari-Shahbazan	350	[Brick pattern]	Limestone	Stiff layers
		Eocene	Kashkan	250			
		Paleocene	Taleh zang	150			
		Amiran	1400	[Stippled pattern]	Fiysh	Weak layers	
		Gurpi	700	[Horizontal line pattern]	Shales, Marls		
Mesozoic	Cretaceous		Ilam - Sarvak	1000	[Brick pattern]	Limestone	Stiff layers
			Garau	850	[Horizontal line pattern]	Limestone, Shales, Marls	
	Jurassic		Jurassic evaporites	600	[Cross-hatched pattern]	Evaporite	Weak layers
			Neyriz-Dashtak	250	[Horizontal line pattern]	Limestone, Shales, Marls	
	Triassic		Kangan	100	[Horizontal line pattern]	Dolomite	
Paleozoic	Permian		Dalan	650	[Brick pattern]	Limestone	Stiff layers
	Carboniferous	Lower paleozoic rocks	1300	[Complex pattern]	Sandstone Limestone Shales	Weak layers	
	Devonian						
	Silurian						
	Ordovician						
	Cambrian						
	Neoproterozoic		Pan - African basement		[Stippled pattern]		Very Weak layers

شکل ۲- ستون چین‌شناسی منطقه مورد مطالعه در زیر پهنه لرستان (James and Wynd, 1965; Motiei, 1994).
 Fig. 2. The stratigraphic column of the study area in the Lurestan sub-zone (James and Wynd, 1965; Motiei, 1994).

دقیق‌تر ساختارها نیمرخ ساختاری با استفاده از روش کینک (Suppe, 1985) در راستای شمال‌خاوری- جنوب‌باختری منطقه مورد مطالعه ترسیم شده است. این نیمرخ در راستای عمود بر روند عمومی تاقدیس نفت و با در نظر گرفتن حفظ ضخامت لایه‌ها ترسیم شده و پارامترهای هندسی مختلف چین‌خوردگی نیز در این تاقدیس اندازه‌گیری شده است.

در این پژوهش به منظور بررسی شواهد سطحی و زیرسطحی گسل‌های راستالغز شمالی-جنوبی، راندگی‌های پی‌سنگی، سبک ساختاری، هندسه چین‌خوردگی و سطوح جدایشی در محدوده تاقدیس نفت از اطلاعات سطحی و زیرسطحی استفاده شده است. اطلاعات پایه و سطحی در این پژوهش شامل نقشه‌های زمین‌شناسی با مقیاس یک-صدهزار، تصاویر ماهواره‌ای و نقشه‌های مدل ارتفاع رقومی (DEM) و همچنین اطلاعات زیرسطحی استفاده از اطلاعات عمقی چاه‌های حفاری شده بوده است. در ادامه برای بررسی

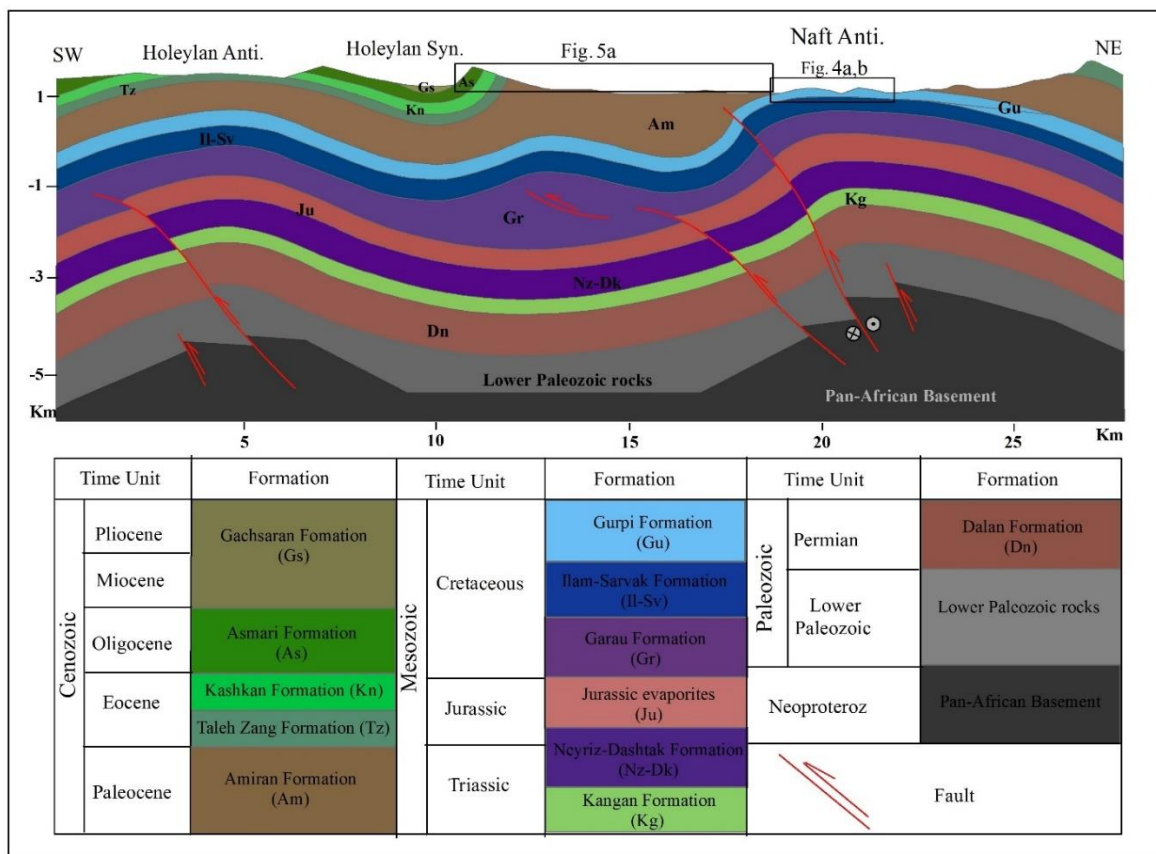
راندگی‌های پی‌سنگی به سمت بالا منتشر شده و تا سطح جدایش میانی (سازند گرو) ادامه پیدا کرده است. گسل راستالغز راست‌گرد پی‌سنگی در یال جنوبی تاقدیس نفت با شیب زیاد تا نزدیک به سطح انتشار یافته و باعث دگرریختی شده است. گسل‌های راندگی، سازندها را از پی‌سنگ تا سطح جدایش میانی (سازند گرو) بریده و باعث تغییر ضخامت در واحدهای نامقاوم گرو شده است. در امتداد این نیمرخ رخنمون سطحی تاقدیس نفت را سازند شیلی گورپی تشکیل داده است. جوان‌ترین رخنمون سطحی مربوط به سازند آسماری در یال شمالی ناودیس هولیلان می‌باشد و سازند آسماری، کشکان، تله‌زنگ و امیران در یال شمالی این ناودیس رخنمون دارد. گسل راستالغز پی‌سنگی در یال جنوبی تاقدیس نفت، لایه‌ها را تا سطح جدایش بالایی (سازند امیران) با شیب زیاد جابه‌جا کرده و باعث رخنمون سازند گورپی در سطح شده است و راستای محور تاقدیس را از N70W در بخش شمال‌باختری به N50W در بخش جنوب‌خاوری تغییر داده است.

نیمرخ عرضی و هندسه ساختاری

تاقدیس نفت با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری درازای حدود ۷۰ کیلومتر است و عرض ۴ کیلومتر در شمال زیرپهنه لرستان قرار دارد. سطوح جدایش میانی در تشکیل ساختارهای سطحی و همچنین سبک چین-خوردگی در منطقه مورد مطالعه تأثیر گذاشته‌اند. در این منطقه به دلیل عدم رخنمون نمک هرمز، سطوح شیلی کامبرین را به عنوان سطح جدایش قاعده‌ای معرفی می‌کنند، تبخیری‌ها و شیل‌های ژوراسیک (مانند سازند گرو) سطح جدایش میانی، مارن و شیل‌های کرتاسه‌بالایی (سازند امیران) نیز نقش سطح جدایش بالایی را بازی می‌کند. بنابراین برای بررسی دقیق هندسه سطحی و عمقی تاقدیس و همچنین ساختارهای عمیق پی‌سنگی، نیمرخ ساختاری عرضی و عمود بر محور تاقدیس با روش کینک ترسیم شده است.

نیمرخ عرضی

نیمرخ ساختاری با طول حدود ۳۰ کیلومتر و عمود بر تاقدیس‌های نفت و هولیلان ترسیم شده است (شکل ۳).

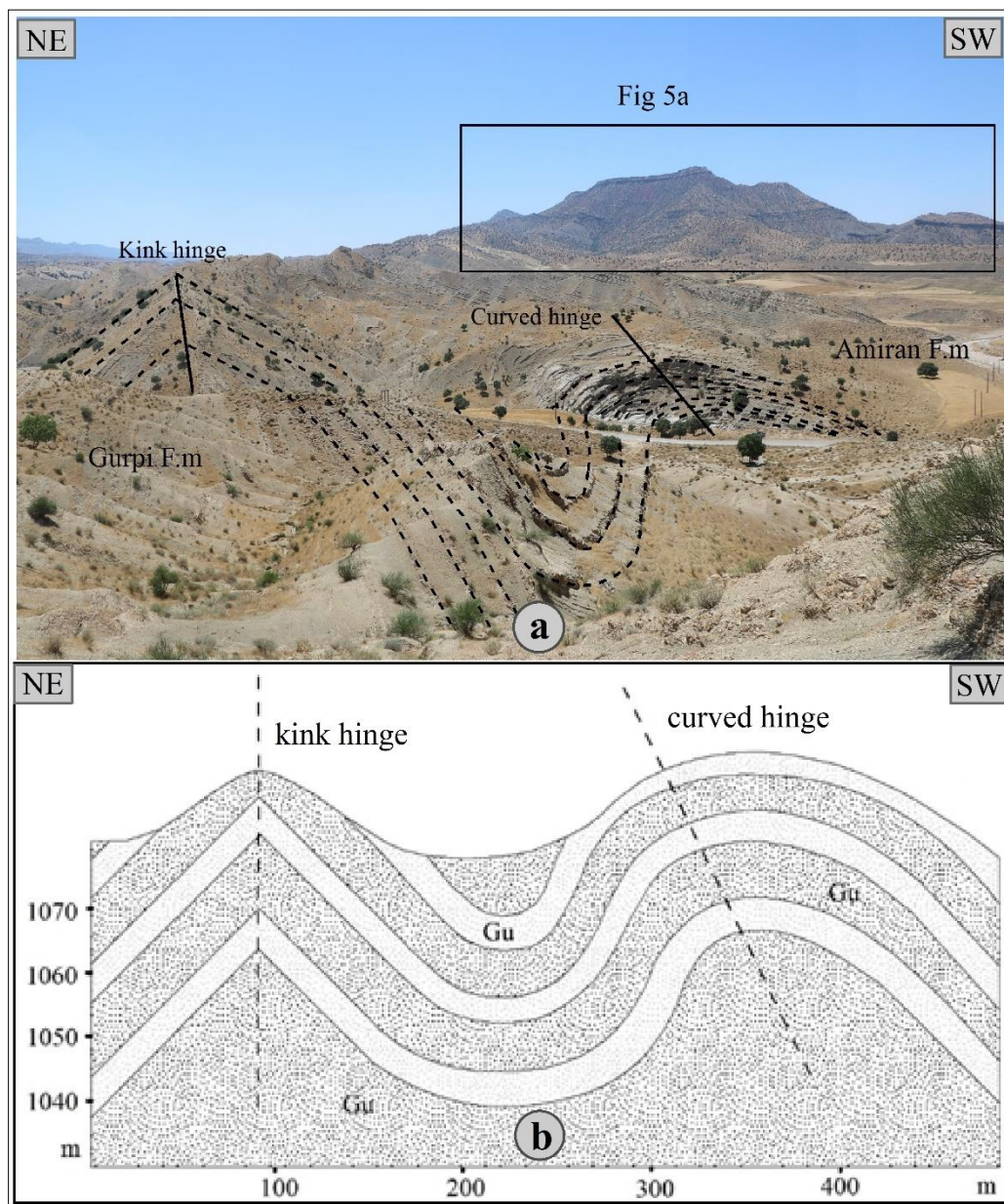


شکل ۳- نیمرخ ساختاری عمود بر تاقدیس‌های نفت و هولیلان که موقعیت این نیمرخ در نقشه زمین‌شناسی شکل ۱ نشان داده شده است. راندگی‌های پی‌سنگی به سمت بالا منتشر شده است و تا سطح جدایش میانی (سازند گرو) ادامه پیدا کرده است. گسل راستالغز راست‌گرد پی‌سنگی در یال جنوبی تاقدیس نفت با شیب زیاد تا نزدیک به سطح انتشار یافته و باعث دگرریختی شده است.

Fig. 3. Structural profile perpendicular to the Naft and Holeylan anticlines, the location of this profile is shown in the geological map of Figure 1. The basement thrusts have propagated upwards and have continued up to the intermediate detachment level (Garau Formation). The right-lateral strike-slip fault in the southern limb of the Naft anticline with high dip has propagated close to the surface and has caused deformation.

پیچیده و منحصر به فردی را ایجاد کرده، احتمالاً به دلیل عملکرد راندگی‌های کوچک و سطحی که از سطح جدایش بالایی منتشر شده‌اند یا راندگی‌های مستقل در سازند گورپی در محور تاقدیس دو لولای جناغی و مدور در ساختارهای چین‌خورده تشکیل شده است. (warrak,1996).

در بخش‌های میانی تاقدیس عملکرد راندگی‌های کوچک و سطحی در سازند گورپی باعث شده که محور تاقدیس به دو محور تبدیل شود (شکل ۴). در واقع منطقه محوری از دو لولای جناغی با سطح محوری قائم و لولای پهن با سطح محوری مورب با شیب به سمت جنوب‌خاوری تشکیل شده است. دو منطقه لولایی جناغی و مدور در بخش میانی تاقدیس که ساختارهای



شکل ۴. تشکیل دو منطقه لولایی جناغی و مدور در بخش میانی ناقدیس نفت. موقعیت این نیمرخ در شکل b نشان داده شده است. تشکیل منطقه لولایی جناغی و مدور در بخش میانی ناقدیس نفت به علت عملکرد راندگی‌های کوچک و سطحی است.

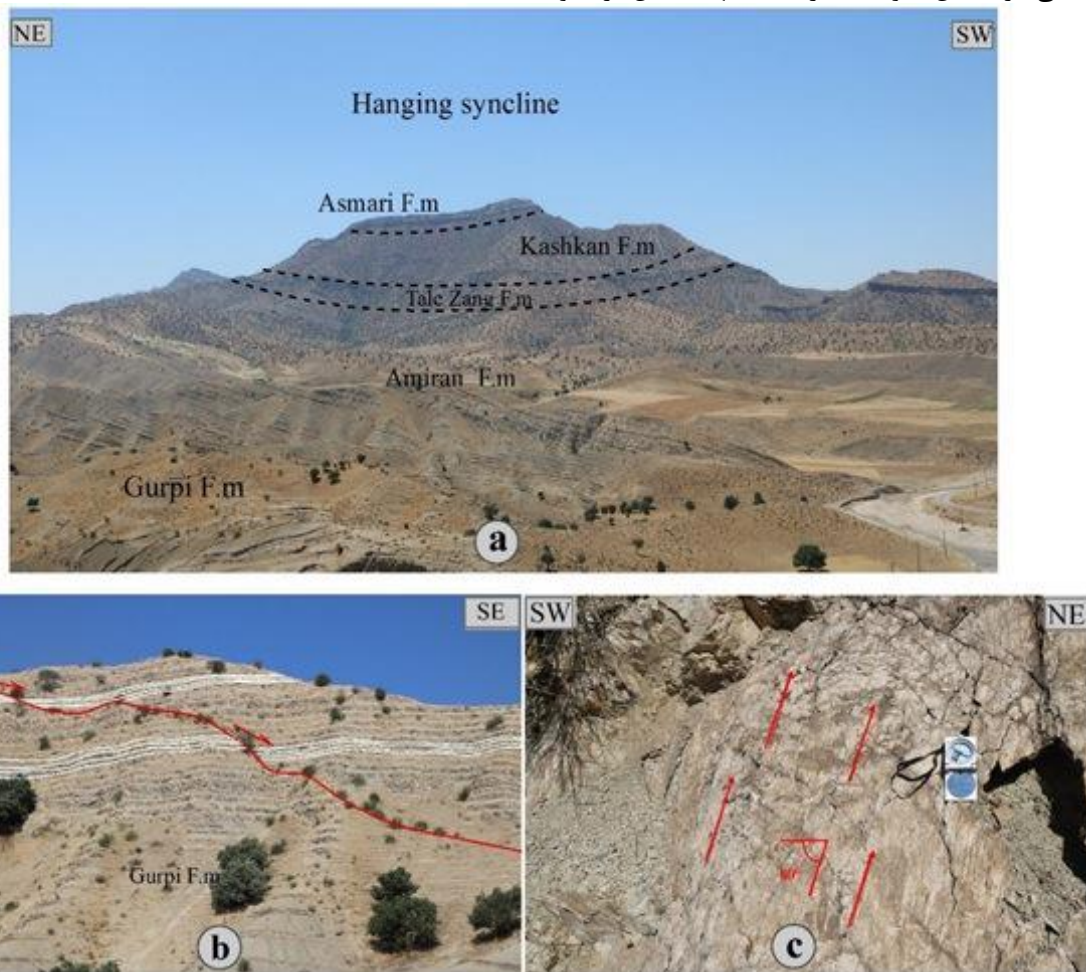
Fig. 4. The formation of two kink and circular hing area in the middle part of the Naft anticline. The location of this profile is shown in figure b. The formation of a kink and circular hing area in the middle part of the Naft anticline is due to the operation of small and surface thrusts.

ناودیس هولیلان در این منطقه به علت عملکرد
های مقاوم سازند آسماری در هسته ناودیس و در ارتفاع

(Hanging Syncline) در آمده است (شکل ۵a). لایه-
شکل ناودیس معلق به شکل ناودیس معلق

صفحه‌های گسلی قابل رویت در منطقه پله‌های گسلی با ساز و کار راندگی و معکوس (Fault Step) با مشخصات S50E/55 و زاویه ریک ۸۰ درجه به خوبی دیده می‌شوند، کلسیت‌های رشته‌ای در امتداد گسل‌های این منطقه تشکیل شده اند (شکل ۵C).

زیادی نسبت به لایه‌های شکل‌پذیر زیرین قرار گرفته است. در این منطقه همچنین شواهد دگرریختی کششی و فشارشی به صورت گسل‌های نرمال عمود بر سطح محوری (شکل ۵b) و گسل‌های معکوس به موازات سطح محوری تشکیل شده است. در این گسل‌های معکوس قدیمی بر اساس شواهدی از جمله جهت خش‌لغزها و

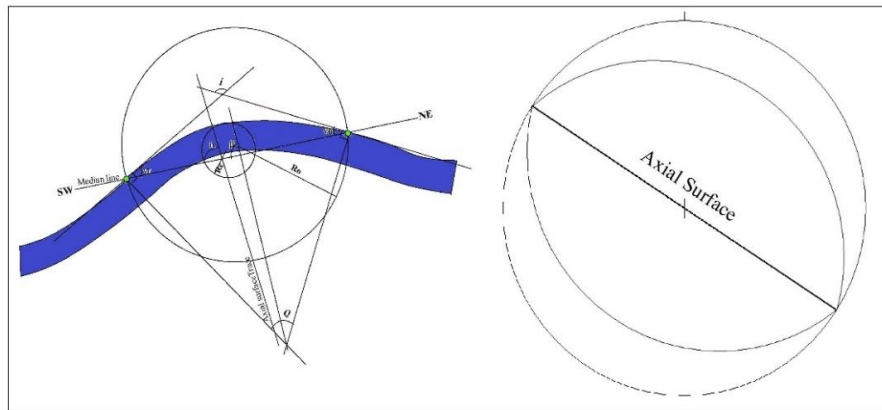


شکل ۵. (a) ناودیس معلق بین تاقدیس‌های نفت و هولیلان. (b) تشکیل ساختارهای کششی در هسته تاقدیس نفت در سازند گورپی. (c) ساختار فشارشی گسل معکوس به موازات سطح محوری تاقدیس نفت.

Fig. 5. a) The hanging syncline between the Naft and Holeylan anticlines. b) Formation of extensional structures in the Naft anticline cone in the Gurpi formation. c) Compressive structure of the reverse fault parallel to the axial surface of the Naft anticline.

محاسبه شده برای پارامتر کندی (Bluntness) چین در راستای این نیمرخ ساختاری $0/8 < \underline{b} < 0/4$ و در رده نیمه‌گرد قرار داد. همچنین مقادیر به دست آمده برای نسبت ابعادی این نیمرخ $0/25 < p < 1$ می‌باشد که نشان دهنده عریض بودن چین است.

باتوجه به مشخصه‌های هندسی و ترسیم استریوگرام چین، در امتداد این نیمرخ تاقدیس نفت دارای موقعیت محوری $125/0$ (میل/روند) و شیب سطح محوری آن $035/77$ (شیب/جهت شیب) است (شکل ۶). مقادیر به دست آمده برای زاویه بین‌یالی نشان می‌دهد که این تاقدیس از نظر فشردگی از نوع چین‌های باز است. مقدار



شکل ۶- (a) ترسیم‌های انجام شده برای اندازه‌گیری مشخصه‌های هندسی و (b) تصویر استریوگرام تاقدیس نفت در راستای نیمرخ عرضی.

Fig. 6. a) The drawings made to measure the geometrical characteristics and b) the image of the stereogram of the Naft anticline along the cross section.

گیری پارامترهای هندسی یک سطح چین خورده و ترسیم نمودار استریوگرافیک چین‌های مربوطه مقادیر عددی در جدول ۱ نشان داده شده است. با توجه به داده‌های به دست آمده، تاقدیس نفت از نوع چین‌های استوانه‌ای و نامتقارن است و عدم تقارن آن به دلیل تفاوت در شیب و طول یال‌ها می‌باشد. باتوجه به اهمیت چین خوردگی جدایشی در کمربند چین خورده-رانده زاگرس نمودارهای مختلفی برای تحلیل جنبشی و هندسی این چین خوردگی‌ها ارائه شده است و معتقدند که چنانچه میزان شیب یال‌های تاقدیس و نسبت سینوس آن‌ها اندازه‌گیری شود می‌تواند جهت محاسبه میزان کوتاه‌شدگی لایه مقاوم بالای لایه جدایشی شکل-پذیر که چین در آن توسعه یافته است استفاده می‌شود.

تحلیل هندسی تاقدیس نفت با استفاده از

نمودارهای مربوطه

جهت بررسی هندسه تاقدیس نفت سه نیمرخ ساختاری عرضی و عمود بر محور تاقدیس ترسیم شده است. دگرشکلی کلی منطقه به وسیله گسل‌های راندگی، گسل راستالغز و چین خوردگی‌های مرتبط کنترل شده که گسل‌های راندگی و راستالغز بدون شواهد سطحی و پوشیده هستند. سازندهای گرو و امیران از سطوح جدایش اساسی در منطقه مورد مطالعه هستند که سبک چین-خوردگی سطحی و زیرسطحی را کنترل می‌کنند. همچنین در این پژوهش با استفاده از روش‌های اندازه-

$$S = (\text{Calculated Shortening } L_b)/10 \quad (1)$$

$$RL = \sin \alpha / \sin \beta \quad (2)$$

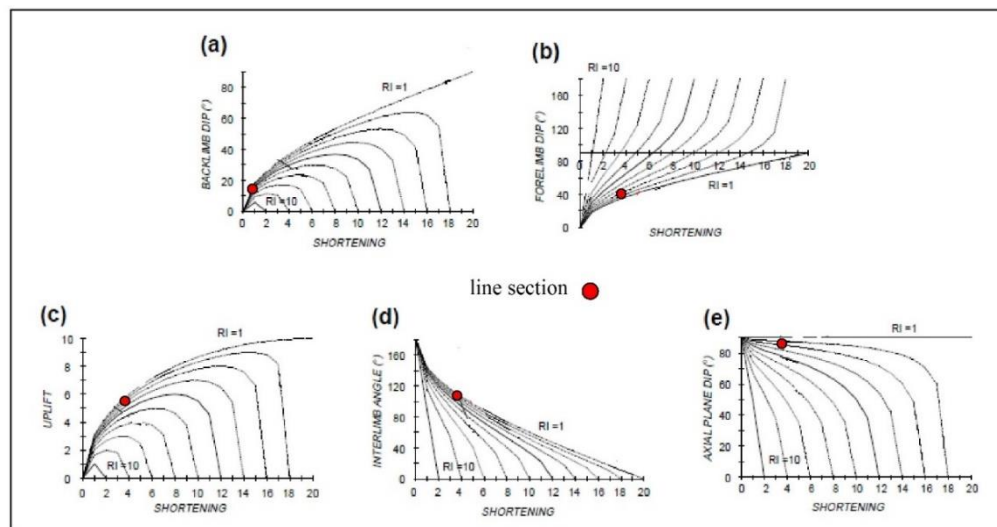
مقدار کوتاه‌شدگی به دست آمده از نمودار باید در رابطه ۱ جایگزین شود تا میزان کوتاه‌شدگی واقعی به دست آید. باتوجه به پارامترهای محاسبه شده در جدول ۱ موقعیت تاقدیس نفت جهت برآورد میزان کوتاه‌شدگی بر روی نمودار (شکل ۷) نشان داده شده است.

در واقع این نمودارها با استفاده از پارامترهای هندسی چین‌خوردگی، کوتاه‌شدگی، بالآمدگی محاسبه می‌شوند (Poblet and McClay, 1996). بنابراین پارامترهایی مثل زاویه بین‌یالی که زاویه بین دو خط مماس بر یال‌های چین در نقاط عطف می‌باشد، زاویه چین‌خوردگی که زاویه بین دو خط عمود بر سطح چین خورده در نقاط عطف چین می‌باشد، طول یال جلویی، طول یال پشتی، شیب یال جلویی، شیب یال پشتی و نسبت RL برای محاسبه کوتاه‌شدگی مورد نیاز است (جدول ۱). برای به دست آوردن میزان کوتاه‌شدگی واقعی باید مقدار کوتاه‌شدگی به دست آمده از نمودار را بر مبنای طول پس‌یال نرمالیزه کرد. مقدار کوتاه‌شدگی واقعی و همچنین نسبت RL از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

جدول ۱: مشخصات هندسی چین‌های سطحی و زیرسطحی تاقدیس نفت و پارامترهای هندسی لازم جهت استفاده از نمودارهای مربوطه (Jamison, 1987; Poblet and McClay, 1996).

Table 1: Geometric characteristics of the surface and subsurface folds of the Naft anticline and the geometric parameters necessary to use the corresponding diagrams (Jamison, 1987; Poblet and McClay, 1996).

مقطع عرضی	زاویه میان‌یالی	زاویه چین‌خوردگی	زاویه تمایل	موقعیت فضایی محور	سطح محوری	دامنه چین	طول موج	نسبت ابعادی	کندی چین	طول یال عقبی	طول یال جلویی	شیب یال عقبی	شیب یال جلویی	R_L	کوتاه‌شدگی برحسب نمودار
نیمرخ عرضی	۱۱۱	۷۰	۱۰۰	۱۲۵.۰	۰۳۵.۷۷	۱،۱	۱۶	۰،۱۳	۰.۴۱	۶	۳،۷	۲۵	۴۵	۱.۹	۹،۳٪



شکل ۷- نمودارهای تعیین پارامترهای هندسی چین‌های جدایشی (Poblet and McClay, 1996). اعداد پارامتر RL در نمودارها به ترتیب ۱، ۱/۱، ۱/۲۵، ۱/۴۳، ۱/۶۷، ۲/۵۰، ۳/۳۳، ۵ و ۱۰ هستند. موقعیت تاقدیس نفت براساس پارامترهای هندسی آن بر روی نمودار نشان داده شده است.

Fig. 7. Diagrams for determining the geometric parameters of detachment folds (Poblet and McClay, 1996). The numbers of RL parameter in the graphs are 1, 1.1, 1.25, 1.43, 1.67, 2.50, 3.33, 5 and 10, respectively. The location of the Naft anticline is shown on the diagram based on its geometrical parameters.

مرتبط با گسل نشان می‌دهد که تاقدیس نفت از نوع چین‌های جدایشی نامتقارن (asymmetric) و استوانه‌ای است. این تاقدیس در امتداد طولی خود به صورت خط مستقیم نیست. بلکه به دلیل تغییر در لیتولوژی سنگ منطقه، اختلاف مقاومت میان سازندها و فشار وارده به منطقه دچار خمیدگی و انحنای در مسیر محور خود گشته است. در نقاطی که بیشترین میزان خمیدگی وجود دارد، تاقدیس نفت به دو قسمت بالای محور و پایین محور تقسیم می‌شود به همین دلیل احتمال شکستگی و گسلش بیشتر است. یک گسل به طول چند کیلومتر به صورت کاملاً مستقیم نبوده و در امتداد خود به دلایلی مانند وجود اختلاف مقاومت بین واحدها و تغییر در سنگ‌شناسی سنگ میزبان، دچار خمیدگی شده و همچنین زاویه شیب متفاوتی در فواصل مختلف نیز از خود نشان می‌دهد. در

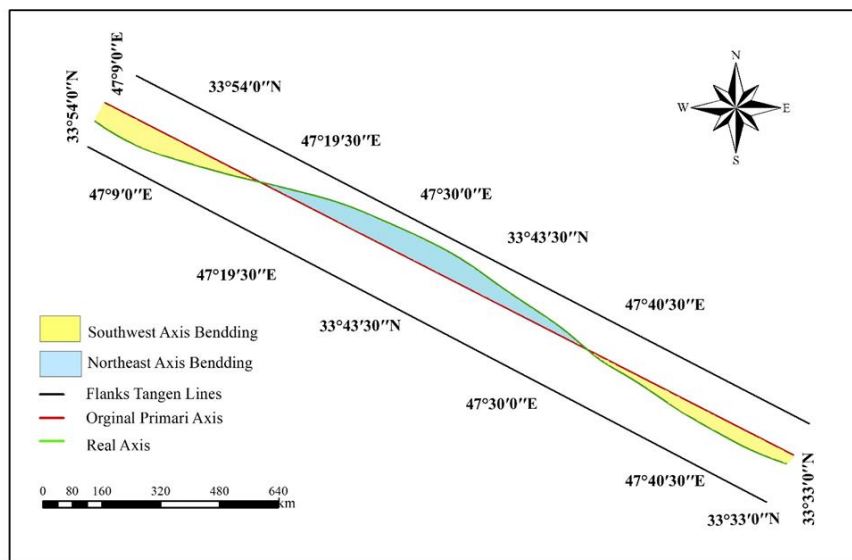
مقادیر بر مبنای $Lb = 10$ نرمالیزه شده‌اند. مقدار کوتاه‌شدگی واقعی بر مبنای نمودار برای یال پشتی از رابطه (۱) به دست می‌آید. با توجه به مقدار RL به دست آمده برای تاقدیس نفت مقدار کوتاه‌شدگی برای یال پشتی و یال جلویی محاسبه شد. این مقدار کوتاه‌شدگی که از نمودار به دست آمده است در نمودارهای شکل (۷ c,d,e) قرار داده تا مقدار برخاستگی، زاویه بین‌یالی و شیب سطح محوری محاسبه شود.

نتایج و بحث

مطالعه نیم‌رخ عرضی ساختاری ترسیم شده، تجزیه و تحلیل‌های مربوط به مشخصه‌های هندسی، توسعه راندگی در یال جنوبی تاقدیس، عدم گسترش پس‌راندگی در یال شمالی و الگوهای مطرح‌شده در مورد چین‌های

تاق‌دیس مورد نظر نیز خمیدگی طولی ایجاد می‌شود هرچه شیب راندگی کم‌تر باشد، نرخ لغزش بیش‌تر و هرچه مقدار این شیب بیش‌تر باشد نرخ لغزش آن کم‌تر خواهد بود (شکل ۸).

نتیجه تغییر روند گسل، نرخ لغزش متفاوت این گسل راندگی که خود ناشی از زاویه شیب متفاوت آن در بخش‌های مختلف می‌باشد، موجب اختلاف در زاویه شیب یال‌ها، شدت چین‌خوردگی، پهنای چین و در طول ساختار



شکل ۸- نواحی مستعد شکستگی‌های کششی ناشی از خمیدگی طولی (محوری) ساختار در طول تاق‌دیس نفت.

Fig. 8. Susceptible areas of extensional fractures due to longitudinal (axial) bending of the structure along the Naft anticline.

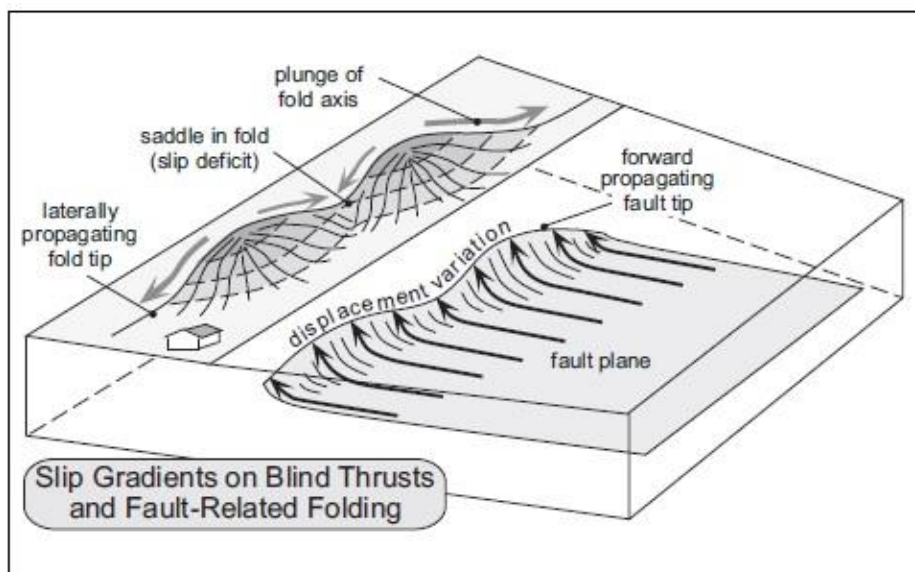
و عرضی به بلوک‌های کوچک‌تری تقسیم شده‌اند)، موجب ایجاد بالا آمدگی و پایین‌افتادگی‌ها در طی گذر زمان شده است (Ameen, 1992).

بنابراین از عواملی که در خمیدگی محوری تاق‌دیس مؤثر است، مکانیسم خاصی از تنش‌های برشی می‌باشد که به وسیله گسل‌های پی‌سنگی (ناشی از همگرایی ورقه عربی و ورقه ایران مرکزی) کنترل می‌گردد. عملکرد این گسل‌ها به همراه دیگر عوامل کنترلی، باعث خمیدگی طولی تاق‌دیس نفت شده است (علی پور و همکاران، ۱۳۹۲). بربنک و اندرسن معتقدند که تغییر نرخ لغزش در

گسل‌های پی‌سنگی نیز در خمیدگی شدید محور تاق‌دیس‌هایی مانند رگ‌سفید و اهواز در منطقه فروافتادگی دزفول و تاق‌دیس‌های گیسکان و سربالش در حوالی گسل کازرون تأثیر بسزایی داشته‌اند (مطیعی ۱۳۷۴). تعدادی از محققین بر این باورند که گسل‌های پی‌سنگی علاوه بر این‌که در ایجاد ساختارهای بزرگ ناحیه زاگرس دخالت داشته‌اند، در شکل‌گیری ساختارهای کوچک‌تر مثل تاق‌دیس‌ها و خمیدگی محوری موجود در آن‌ها نیز تأثیرگذاراند (Player, 1969; Falcon, 1961; Faver, 1975; Kent, 1977). حرکت بلوک‌های بزرگ پی‌سنگی (که به وسیله گسل‌های طولی

بیش‌تر هستند ایجاد می‌شوند. ساختارهای زمین‌اسپی نیز نشان‌دهنده فاصله‌هایی از گسل هستند که دارای نرخ لغزش کم‌تر می‌باشد (شکل ۹).

گسل‌های راندگی زیرسطحی، در شکل بالآمدگی و چین‌خوردگی تاقدیس بالایی آن مؤثر است دماغه میل چین در بالای گسل و در جایی که چین‌خوردگی کم می‌شود و کوهانه‌ها در بالای فواصلی از گسل که دارای نرخ لغزش



شکل ۹- گسترش جانبی راندگی زیرسطحی باعث توسعه چین‌خوردگی در پوشش رسوبی می‌شود که نرخ لغزش متفاوت این راندگی‌ها، در شدت بالآمدگی و چین‌خوردگی تاقدیس بالای آن مؤثر است (Burbank and Anderson, 2012).

Fig. 9. The lateral propagation of the subsurface thrust causes the development of folds in the sedimentary cover, and the different slip rates of these thrusts are effective in the intensity of uplift and folding of the upper anticline (Burbank and Anderson, 2012).

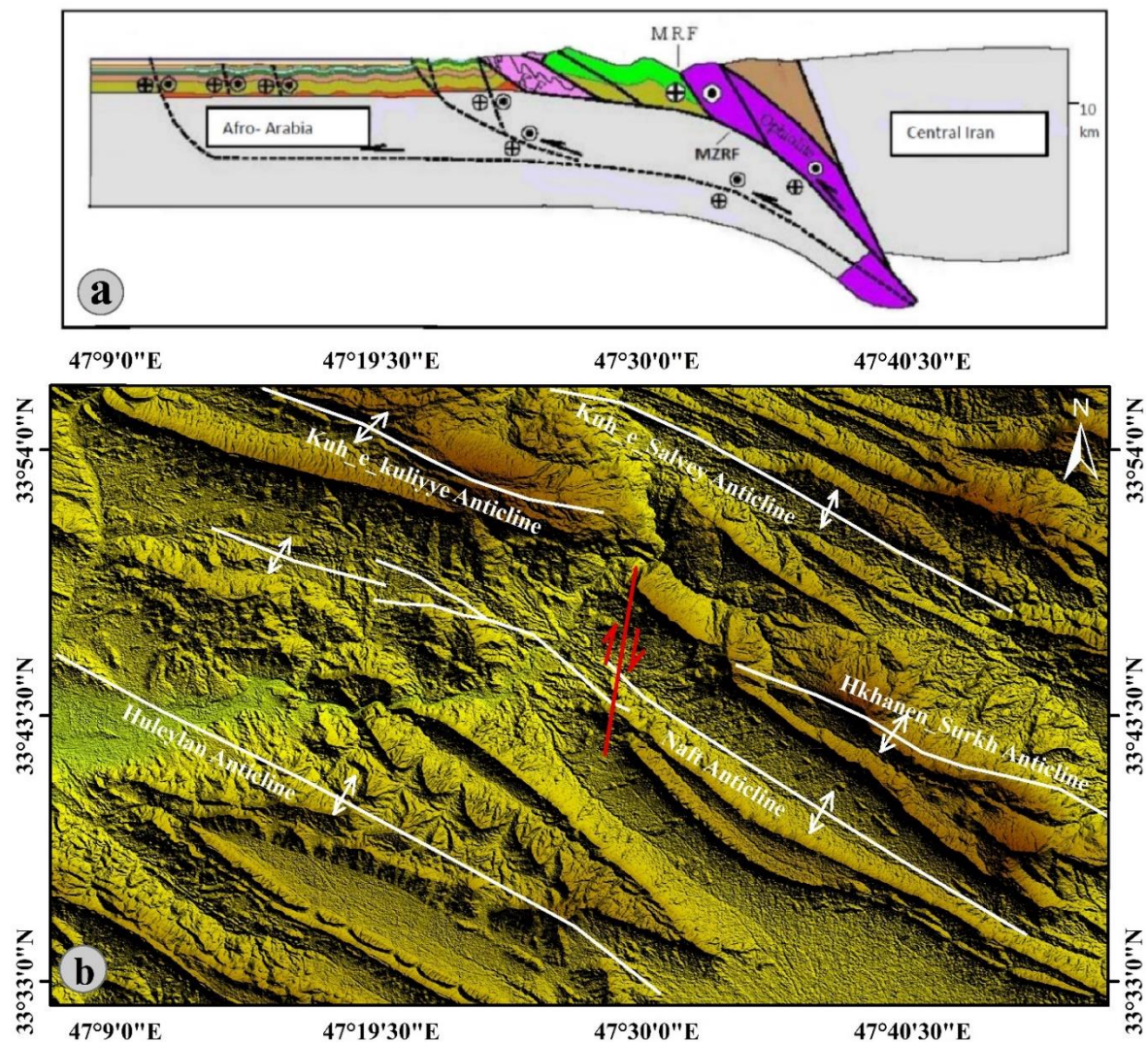
علاوه بر عوامل ذکر شده در دگرریختی ساختارهای چین‌خورده کم‌ریند چین‌خورده‌رانده زاگرس، گسلش راستالغز پی‌سنگی نیز از عوامل مؤثر بر دگرریختی هندسی ساختارها است. به طور کلی دگرریختی جنوبا در فلات ایران حاصل همگرایی ورقه‌های عربی و اوراسیا می‌باشد (Walker and Jackson, 2002) این همگرایی مایل در چین‌ها و راندگی‌های عمود بر راستای کوتاه‌شدگی، گسل‌های راستالغز راست‌گرد با راستای شمال‌باختر-جنوب‌خاور تا شمالی-جنوبی در بخش‌های شمال‌باختر، باختر و خاور فلات و گسل‌های راستالغز چپ‌گرد با راستای خاوری-باختری در خاور و شمال‌باختر آن نمود می‌یابد (Yassaghi and Marone, 2019). همگرایی یاد شده بر خلاف بخش‌های دیگر سیستم کوهزایی آلپ-هممالیا، که دگرریختی آن در ناحیه بزرگی (چندین هزار کیلومتر) گسترده شده است، در این گستره به نسبت کوچک انباشته شده است (Walker and Jackson, 2002). گسل اصلی جوان-زاگرس یکی از گسل‌های مهم زاگرس است. این گسل، فعال و لرزه‌زا به شمار می‌آید و رومرکز چند زمین‌لرزه دستگامی در امتداد این گسل در کردستان ایران و عراق به ثبت رسیده است (Berberian, 1995; Talebian and Jackson, 2002). حرکت راستالغز این گسل به دلیل مورب بودن بردار جابه‌جایی این گسل نسبت به خط

علاوه بر عوامل ذکر شده در دگرریختی ساختارهای چین‌خورده کم‌ریند چین‌خورده‌رانده زاگرس، گسلش راستالغز پی‌سنگی نیز از عوامل مؤثر بر دگرریختی هندسی ساختارها است. به طور کلی دگرریختی جنوبا در فلات ایران حاصل همگرایی ورقه‌های عربی و اوراسیا می‌باشد (Walker and Jackson, 2002) این همگرایی مایل در چین‌ها و راندگی‌های عمود بر راستای کوتاه‌شدگی، گسل‌های راستالغز راست‌گرد با راستای شمال‌باختر-جنوب‌خاور تا شمالی-جنوبی در بخش‌های شمال‌باختر، باختر و خاور فلات و گسل‌های راستالغز چپ‌گرد با راستای خاوری-باختری در خاور و شمال‌باختر آن نمود می‌یابد (Yassaghi and

خاوری نیست بلکه در قسمت‌های خارجی کمربند چین-خورده-رانده زاگرس در امتداد گسل‌های فعال با روند شمالی-جنوبی توزیع می‌شود. فوکال مکانیسم برخی از پس‌لرزه‌های زلزله از گله-سرپل‌ذهاب همچون پس‌لرزه ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸ زمین‌لرزه‌ای با بزرگای ۶/۴ (مرکز لرزه‌نگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) که پیرامون شهر سرپل‌ذهاب رخ داده است سازوکار راستالغز راست‌گرد با راستای شمالی-جنوبی را نشان می‌دهد. این گسل‌های راستالغز پی‌سنگی در کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس باعث ایجاد پدیده‌هایی چون کج‌شدگی راستای عمومی تاقدیس‌ها و دگرشکلی کلی ساختارهای چین‌خورده شده است. در این مطالعه نیز مشخص شده است تغییر راستای محور تاقدیس نفت، انتقال دگرریختی‌ها به درون حوضه این تاقدیس و جابه‌جایی سازندها و شکستگی‌های موجود دلایلی بر عملکرد یک گسل راستالغز پی‌سنگی در منطقه می‌باشد. که این گسل راستالغز پی‌سنگی در قسمت داخلی تاقدیس نفت، توالی‌ها را از پی‌سنگ تا سطح برش داده و باعث جابه‌جایی سازندها شده است. در رخنمون سطحی تاقدیس، این گسل راستالغز پی‌سنگی باعث تغییر راستای محور از N70W در بخش شمال‌باختری به N50W در بخش جنوب‌خاوری و انتقال دگرریختی‌ها به درون تاقدیس می‌باشد (شکل ۱۰b). بنابراین گسل‌های راستالغز پی‌سنگی به بخش‌های داخلی کمربند چین-خورده-رانده در زیرپهنه لرستان انتشار یافته و باعث دگرریختی تاقدیس‌های سطحی و عمقی شده است.

درز زاگرس است. به این ترتیب که کوتاه‌شدگی به دو مؤلفه عمود بر راستای زاگرس و به موازات آن قابل جدایش می‌شود که بردار عمود بر راستای زاگرس، گسل‌های راندگی و رشد چین‌ها را موجب می‌شود و بردار در راستای زاگرس، حرکتی راستالغز راست‌گرد را در راستای گسل اصلی جوان‌زاگرس و قطعات آن ایجاد می‌کند. جابه‌جایی عادی در امتداد گسل اصلی-جوان‌زاگرس در اثر انحراف از امتداد جابه‌جایی راستالغز کامل رخ می‌دهد (Talebian and Jackson, 2002; Alipoor et al., 2012). گسل اصلی جوان‌زاگرس در حد واسط پاره-گسل‌های پیرانشهر در شمال‌باختر و مریوان در جنوب-خاور، خمیده و با گسترش پهنه‌رهایی همراه شده است. (Talebian and Jackson, 2002).

در قسمت شمال‌باختری کمربند چین‌خورده-رانده زاگرس گسل معکوس اصلی زاگرس با زاویه کم از پی-سنگ منشا گرفته، به سمت بالا منتشر و باعث دگرریختی توالی‌ها شده است و از زیر پهنه لرزه‌زا سرچشمه گرفته است. درحالی‌که گسل راستالغز جوان‌اصلی زاگرس با زاویه زیاد از پی‌سنگ منشا گرفته، توالی‌ها را تا سطح برش داده و باعث انتقال دگرریختی به درون پهنه لرزه‌زا شده است (شکل ۱۰a) (Yassaghi and Marone, 2019). علاوه بر این، پس از وقوع زلزله از گله-سرپل‌ذهاب با بزرگای ۷/۳ ریشتر یکی از بزرگ‌ترین حوادث لرزه‌ای ثبت‌شده در این کمربند است که مسبب آن گسل راندگی و پی‌سنگی جبهه کوهستان بوده است مشخص شده که گسل راستالغز سنوزوئیک مربوط به گسل‌های موازی کوهزایی با راستای شمال‌باختری-جنوب-



شکل ۱۰- (a) ارتباط بین گسل جوان اصلی و گسل معکوس اصلی زاگرس ناشی از برخورد صفحات ایران مرکزی و عربستان (Yassaghi and Marone, 2019). (b) مدل ارتفاع رقومی منطقه مورد مطالعه که گسل راستالغز پی‌سنگی باعث انتقال دگربختی توالی‌ها به بخش‌های درونی کمربند چین خورده رانده شده است.

Fig. 10. a) The relationship between the main Recent Fault and the Main Zagros Reverse Fault caused by the collision of the Central Iran and Arabia plates (Yassaghi and Marone, 2019). b) The digital elevation model of the study area where the right-lateral basement fault has caused the transformation of the deformation to the inner parts of the fold and thrust belt.

نتیجه‌گیری

هندسه ساختارهای عمقی به ویژه گروه بنگستان را تحت تأثیر قرار می‌دهد، به عنوان سطح جدایش میانی و فلیشی‌های پالئوسن (سازند امیران) به عنوان سطح

تاقدیس نفت با درازای حدود ۷۰ کیلومتر و با راستای شمال‌باختر-جنوب‌خاور در شمال زیرپهنه لرستان قرار دارد. شیل‌های ژوراسیک (سازند گرو) که

جنوبی تاقدیس لایه‌ها را تا سطح جدایش بالایی (سازند امیران) با شیب زیاد جابه‌جا کرده و باعث تغییر روند محور تاقدیس از N70W در بخش شمال-باختری به N50W در بخش جنوب‌خاوری شده است. همچنین به دلیل عملکرد راندگی‌های کوچک و سطحی، منطقه محوری از دو لولای جناغی و لولای مدور تشکیل شده است. با توجه به پارامترهای هندسی در تاقدیس نفت، این تاقدیس از نظر فشردگی باز، از نظر نسبت ابعادی از نوع چین‌های عریض و همچنین از نظر کندی چین در رده نیمه‌زاویه‌دار قرار دارد.

جدایش بالایی نقش مهمی در دگرشکلی ایجاد کرده اند. در این نیمرخ عرضی گسل‌های راندگی پی‌سنگی در یال جنوبی تاقدیس نفت، سازندها را از پی‌سنگ تا سطح جدایش میانی (سازند گرو) بریده و باعث تغییر ضخامت در واحدهای نامقاوم گرو، و در سطح جدایش بالایی حالت هموار پیدا کرده است. فعالیت راندگی‌های پی‌سنگی در این تاقدیس باعث اختلاف عمق زیاد پی‌سنگ در طول تاقدیس، افزایش ضخامت رسوبات در محل راندگی‌های پی‌سنگی و همچنین کج‌شدگی تاقدیس‌ها و عدم تطابق شیب یال‌ها بر روی سازندها شده است. گسل راستالغز پی‌سنگی در یال

منابع

- آقاباتی، ع.، "زمین‌شناسی ایران". سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، (۱۳۸۳).
- علی‌پور، ر.، صدر، ا. ح.، امینی، پ.، "تحلیل پویایی تکتونیکی گسل مروارید در پهنه گسلی جوان اصلی زاگرس با استفاده از داده‌های دورسنجی و تحلیل فرکتالی"، یافته‌های نوین زمین‌شناسی کاربردی، دوره ۱۱، شماره ۲۱ (۱۳۹۶)، صفحه ۱۲۵ تا ۱۳۸.
- علی‌پور، ر.، صدر، ا. ح.، ایزدی، م.، "تحلیل خطواره‌ها و شکستگی‌های مرتبط با پهنه گسلی صحنه با استفاده از تکنیک‌های دورسنجی و فرکتالی (باختر ایران)"، پژوهش‌های دانش زمین، شماره ۳۷ (۱۳۹۸)، صفحه ۱۸۶ تا ۲۰۵.
- علی‌پور، ر.، علوی، ا.، قاسمی، م. ر.، مختاری، م.، گلال‌زاده، ع. ر.، "تحلیل شکستگی‌های سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی پازنان (جنوب‌باختر ایران)"، نشریه علوم دانشگاه خوارزمی، جلد ۱۲ شماره ۲ (۱۳۹۲)، صفحه ۴۸۳ تا ۵۰۰.
- مطیعی، ه.، زمین‌شناسی ایران: چینه‌شناسی زاگرس، سازمان زمین‌شناسی کشور، (۱۳۷۲).
- Alipoor, R., Zaré, M., and Ghassemi, M. R., "Inception of activity and slip rate on the main recent fault of Zagros Mountains, Iran", *Geomorphology*, 175–176 (2012) 86–97.
- Ameen, M.S., "Effect of basement tectonics on hydrocarbon generation migration and accumulation in northern Iraq", *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 76 (1992) 356-370.
- Bachmanov, D., Trifonova, V., Hessami, Kh., Kozhurina, A., Ivanova, T., Rogozhind, E., Hademi, M., Jamali, F., "Active faults in the Zagros and central Iran", *Tectonophysics* 380 (2004) 221–241.
- Berberian, M. and King, G.C.P., "Towards the paleogeography and tectonic evolution of Iran", *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18 (1981) 210-265.

- Berberian, M., "Master Blind thrust faults hidden under the Zagros folds: active basement tectonics and surface morphotectonics", *Tectonophysics*, 241 (1995) 193–224.
- Burbank, D.W., Anderson, R.S., "Tectonic geomorphology", (2012) Blackwell science.
- Casciello, E., Vergés, J., Saura, E., Casini, G., Fernández, N., Blanc, E., "Fold patterns and multilayer rheology of the Lurestan Province, Zagros Simply Folded Belt (Iran)". *Journal of the Geological Society of London*, 166 (2009) 947–959.
- Colman-Sadd, S.P., "Fold development in Zagros simply folded belt, Southwest Iran", *American Association of Petroleum Geologist Bulletin*, 62(6) (1978) 984-1003.
- Cotton, J. T., Koyi, H. A., "Modeling of thrust fronts above ductile and frictional detachment: application to structures in the Salt Range and Potwar Plateau, Pakistan", *Geological Society of America Bulletin*, 112(3) (2000) 351-363.
- Falcon, N.L., "Problems of the Relationship between Surface Structures and Deep Displacements Illustrated by the Zagros Range. In: P. Kent, G.E. Satterthwaite and A.M. Spencer (Eds.), *Time and Place Orogeny*", Geological Society of London, Special publication, 3 (1969) 9-22.
- Faver, G., "Structures in the Zagros Orogenic Belt", (1975) OSCO, Report No.1233 Unpub.
- Ghavidel, M., "Acratich biostratigraphy of the Paleozoic Rock units in the Zagros Basin, Southern Iran", *Acta Universitatis Carolinae Geologica*, 40 (1996) 385-411.
- Haynes S. J., McQuillan H., "Evolution of the Zagros suture zone, southern Iran", *Geological Society of America Bulletin*, 85(5) (1974) 739–744.
- Homke, S., J. Vergés, M. Garcés, H. Emami, and R. Karpuz., "Magnetostratigraphy of Miocene–Pliocene Zagros foreland deposits in the front of the Push-e Kush Arc (Lurestan Province, Iran)", *Earth and Planetary Science Letters*, 225 (2004) 397-410.
- James, G. A., Wynd, J. G., "Stratigraphic Nomenclature of Iranian Oil Consortium Agreement Area", *Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists*, 49, (1965) 2182-2245.
- Jamison, W.R., "Geometric analysis of fold development in overthrust terranes", *Journal of Structural Geology*, 9 (1987) 207-219.
- Kent, P.E., "Review of the Kazerun lineament system. OSCO", (1977) Technical Note, Unpub.

- Koyi, H.A., "Experimental modeling of the role of gravity and lateral shortening in the Zagros mountain belt", AAPG Bulletin, 74(4) (1990) 515–516.
- Motiei, H., "Stratigraphy of Zagros", (1994) Geological Survey of Iran Publications, (In Persian).
- Player, R.A., "The Hormuz Salt Plugs of southern Iran", (1969) IOOC, Report No.1146 Unpub.
- Poblet, J.A. and McClay, K.R., "Geometry and kinematics of sin-gle layer detachment folds", AAPG Bulletin, 80 (1996) 1085-1109.
- Spratt, D.A., Dixon, J.M., Beattie, E.T., "Changes in structural style controlled by lithofacies contrast across transverse carbonate bank margins Canadian Rocky Mountains and scaled physical models. In: McClay, K.R. (eds) Thrust tectonic and hydrocarbon systems", AAPG Memoir, 82 (2004) 259-275 .
- Suppe, J., "Principles of structural geology", (1985) Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
- Szabo, F., Kheradpir, A., "Permian and Triassic stratigraphy, Zagros basin, south-west Iran", Journal of Petroleum Geology, 1(2) (1978) 57-82.
- Talbot, C. J., Alavi, M., "The past of a future syntaxis across the Zagros, In: Salt tectonics, (Eds. by G.I. Alsop, D. J. Blundell, I. Davison)", Special Publications, Geological Society of London, 100 (1996) 89-109.
- Talebian, M. and Jackson, J., "Offset on the Main Recent Fault of the NW Iran and implications for the late Cenozoic tectonics of the Arabia-Eurasia collision zone", Geophysical Journal International, 150 (2002) 422–439.
- Tavarnelli, E., "Structural evolution of a foreland fold-and-thrust belt: the UmbriaMarche Apennines, Italy", Journal of Structural Geology, 19(3-4) (1997) 523-534.
- Turrini, C., Ravaglia, A., Perotti, C.R., "Compressional structural in a multilayered mechanical stratigraphy: insights from sandbox modeling with three dimensional variation in basal geometry and friction", In: Koyi, H.A., Mancktelow, N.S., (eds) tectonic Modeling: A Volume in Honour of Hans Ramberg. Geological Society of American Memoir, 193 (2001) 153-178.
- Walker, R. and Jackson, J., "Offset and evolution of the Gowk fault, S.E. Iran: a major intra-continental strike-slip system", Journal of Structural Geology, 24 (2002) 1677-1698.

- Warrak, M., "Origin of the Hafit structure: implications for timing the Tertiary deformation in the Northern Oman Mountains", *Journal of Structural Geology*, 18(6) (1996) 803-818.
- Yang Y.H, Hu J.C, Yassaghi A, Tsai MC., Zare M, Chen Q, Wang Z.G, Rajabi A.M, and Kamranzad F., "Midcrustal Thrusting and Vertical Deformation Partitioning Constraint by 2017 Mw 7.3 Sarpol Zahab Earthquake in Zagros Mountain Belt, Iran", *Seismological Research Letters*, 89(6) (2018) 2204–2213
- Yassaghi, A., Marone, C., "The relationship between fault zone structure and frictional heterogeneity, insight from faults in the High Zagros", *Tectonophysics*, 762 (2019) 109-120.