

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	Abstract					
Article history	The Naft anticline is located in the NW-SE of the N Lurestan sub-zone and the					
Accepted: 20 July 2021	Zagros fold and thrust belt. In this sub-zone, the structural geometry of the folded					
Keywords:	sequence is significantly influenced by the basemen thrust and strike-slip faults and					
Cross-section,	detachment levels. In this research, for the geometrical analysis of the Naft anticline,					
Basement	we utilized the structural profile perpendicular to the anticline in the central region,					
Lurestan,	information from drilling wells in the study area and neighboring anticlines, and the					
Zagros.	deformation pattern and structural geometry of the Naft anticline. The anticline has					
ini eta 19 mil	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					
3002633	folding. An N-S basement strike-slip fault in the middle part of the anticline has					
av di	shifted the anticline axis from N70W in the northwest to N50W in the southeast. In					
	addition, the minor and shallow thrust faults propagations 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 subzone, 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-Kashkan, Asmari and Gachsaran Zng. 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 strikeslip 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 anticline. The research Naft 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 marle 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 detachment intermediate 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 strikeslip 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 rightlateral 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 علی پور^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

چکیدہ	اطلاعات مقاله
تاقدیس نفت با راستای شمال باختری-جنوب خاوری در شمال پهنه ساختاری لرستان و باختر کمربند چینخورد	تاريخچه مقاله
رانده زاگرس واقع شده است. در این پهنه گسلهای راندگی و راستالغز پیسنگی و سطوح جدایشی نقش مهمی ا	دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۲۹
هندسه ساختارهای چینخورده ایفا میکنند. در این پژوهش جهت تحلیل هندسی تاقدیس نفت با استفاده از ترس	پذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۲۴
نیمرخ ساختاری عمود بر راستای تاقدیس در بخش مرکزی، اطلاعات چاههای حفاری شده در منطقه مورد مطالعه	واژه های کلیدی
تاقدیسهای همجوار و تجزیه و تحلیلهای مربوطه، الگوی دگرریختی و هندسه ساختاری تاقدیس نفت مورد مطال	نيمرخ ساختارى، تاقديس
قرار گرفته است. این تاقدیس دارای دو سطح جدایش بالایی (سازند امیران) و میانی (سازند گرو) است. سطوح جدایش	نفت،
و راندگیهای پیسنگی در یال جنوب باختری تأثیر زیادی بر هندسه چینخوردگی ایجاد کردهاند که باعث عدم انطبا	پىسنگ،
چین خوردگی سطحی و عمقی شده است. یک گسل راستالغز پیسنگی با راستای شمالی-جنوبی در بخش میان	لرستان، ۱۰
تاقدیس باعث تغییر راستای محور تاقدیس از N70W در بخش شمالباختری به N50W در بخش جنوبخاوری ش	زا درس.
است. همچنین راندگیهای کوچک و سطحی که از سطح جدایش بالایی منتشر شده است یا راندگیهای مستقل	
سازند گورپی باعث تشکیل محوری از دو لولای جناغی و مدور در بخش میانی تاقدیس نفت در ساختارهای چینخور	
شده است. تجزیه و تحلیل مشخصههای هندسی تاقدیس نفت نشان میدهد که این تاقدیس یک چین نامتقارن	
استوانهای و از نظر فشردگی باز و از نظر کندی چین در رده نیمهزاویهدار قرار دارد.	

*نویسنده مسئول: رضا علی پور 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 ۲۵ تا۹۶



مقدمه

کمربند کوهزایی زاگرس به عنوان بخشی از سیستم کوهزایی آلپ-هیمالیا ، از جوانترین پهنههای برخورد قارمای می باشد که با طولی حدود ۱۸۰۰ کیلومتر، از جنوب خاور توسط خطواره عمان و از شمال باختر بهوسیله گسل امتدادلغز چپگرد آناتولی در ترکیه محدود شده است (Takin) 1972; Haynes and McQuillan 1974; Falcon, 1969; Berberian and King, 1981; Koyi, .(1990چینخوردگیها 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 می کند، یک عامل کنترل کننده مهم در سبک چینخوردگی در کمربند چینخورده-رانده زاگرس می باشد (Cotton and Koyi, 2000; Turrini et al., 2001; Spratt et al., 2004). تاقدیس نفت در منطقه لرستان در زاگرس چینخورده که روند کلی آن همراستا با زون راندگیهاست (آقانباتی، ۱۳۸۳) واقع شده است. بررسی هندسه و سبک ساختاری تاقدیسها در كمربند چين خورده-رانده زاگرس از آن جهت حائز اهميت است که این کمربند دارای ذخایر هیدروکربوری عظیمی است و اکثر تلههای نفتی تاقدیسی میباشند. هدف اصلی این پژوهش، بررسی چینهای مرتبط با گسل راندگی، گسلهای راستالغز راست گرد در منطقه و به کارگیری و

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

مواد و روشها

منطقه مورد مطالعه

تاقدیس نفت در شمال زیرپهنه لرستان در کمربند چین خورده-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 چینه شناسی منطقه مورد مطالعه با استفاده از دادههای چاههای حفاری شده (طوری که ضخامت سازندها در این چاهها میانگین گرفتهشده) و عملیات صحرایی برای واحدهایی جوان تر 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 زون-های 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 زمین-شناسی یک پیشآمدگی در کمربند چینخورده- رانده زاگرس به شمار میآید (شکل۱) (Talbot and Alavi, .(1996



شکل۱- a) نقشه جایگاه ساختاری و زیرپهنه های تکتونیکی کمربند چین خورده رانده زاگرس در جنوب باختر ایران که موقعیت منطقه مورد مطالعه درکمربند چینخورده-رانده زاگرس با مستطیل سیاه رنگ مشخص شده است (Homke et al., 2004). d) 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 (شکل۲) (مطیعی، ۱۳۷۲ ,casciello et al., ۱۳۷۲ ; 2009). از نظر چینهشناسی، منطقه مورد مطالعه دارای سازندهای اواخر کرتاسه تا الیگوسن می باشد. 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 می باشد که یکی از بزرگترین تغییرات ضخامت را به نمایش گذاشته است. این سازند از شیل های

Strata								
Era	System	Series	Formation	Thick (m)	Stratigraphy	Litology	Structural role	
enozoic	Tertiary	Pliocene Miocene	Gachsaran	300		Evaporite	Very Weak layers	
Ů		Oligocene	Asmari-Shahbazan	350		1	Stiff layers	
		Eocene	Kashkan	250		Limestone		
		Paleocene	Amiran	150	400400	Fiysch	Weak lavers	
			Gurpi	700	<u>0 0.4 0 0.4</u>	Shales, Marls		
	Cretaceous		llam - Sarvak	1000	Limestone		Stiff layers	
zoi			Garau	850		Limestone, Shales, Marls		
Meso	Jur	assic	Jurassic evaporites	600		Evaporite		
	i në forsi fi		Neyriz-Dashtak	250		Limestone, Shales, Marls	Weak layers	
	Tri	assic	Kangan	100		Dolomite		
	Permian		Dalan	650		Limestone	Stiff layers	
	Carboniferous							
oic	De	vonian				Sandstone	Weak layers	
aleoz	Silurian		Lower paleozoic rocks	1300		Shales		
	Orde	ovician	1					
	Can	nbrian						
	Neopi	roterozoic	Pan - African basement				Very Weak layers	

شكل ۲- ستون چينهشناسی منطقه مورد مطالعه در زير 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 درنظر گرفتن حفظ ضخامت لایهها ترسیم شده و پارامترهای هندسی مختلف چینخوردگی نیز در این تاقدیس اندازه-گیری 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 زمین شناسی 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

نيمرخ عرضى و هندسه ساختارى

تاقدیس نفت با راستای شمال باختری – جنوب خاوری درازای حدود ۲۰ 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 می – کنند، تبخیریها و شیلهای ژوراسیک (مانند سازند گرو) سطح جدایش میانی، مارن و شیلهای کرتاسه بالایی (سازند امیران) نیز نقش سطح جدایش بالایی را بازی می – تاقدیس و همچنین ساختارهای عمیق پیسنگی، نیمرخ ساختاری عرضی و عمو د بر محور تاقدیس با روش کینک ترسیم شده است.

نيمرخ عرضى

نیمرخ ساختاری با طول حدود ۳۰ کیلومتر و عمود بر تاقدیسهای نفت و هولیلان ترسیم شده است (شکل۳).

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 یی سنگ 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. جوان ترین رخنمون سطحی مربوط به سازند آسماری در یال شمالی ناودیس هولیلان میباشد و سازند آسماری، کشکان، تلهزنگ و امیران در یال شـمالی این ناودیس رخنمون دارد. گسل راستالغز پیسنگی در یال جنوبی تاقدیس نفت، لایهها را تا سطح جدایش بالایی (سازند امیران) با شـيب زياد جابهجا كرده و باعث رخنمون سـازند گورپي در سطح شده است و راستای محور تاقدیس را از N70W در بخش شــمالباختری به N50W در بخش جنوبخاوري تغيير داده است.





شکل۳- 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 راست گرد 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.

در بخشهای میانی تاقدیس عملکرد راندگیهای کوچک و سطحی در سازند گورپی باعث شده که محور تاقدیس به دو محور تبدیل شود (شکل۴). 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





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.

(Hanging Syncline) در آمده است (شکل۵۵). لایه-
های مقاوم سازند آسماری در هسته ناودیس و در ارتفاع

ناودیس هولیلان در این منطقه به علت عملکرد سطوح جدایش بالایی به شکل ناودیس معلق

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 ۵۵) و گسلهای معکوس به موازات سطح محوری تشکیل شده است. در این گسلهای معکوس قدیمی بر اساس شواهدی ازجمله جهت خشرلغزها و

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 می شوند، کلسیتهای رشتهای در امتداد گسلهای این منطقه تشکیل شده اند (شکل۵۵).



شکل۵. 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.

باتوجه به مشخصههای هندسی و ترسیم استریوگرام چین، در امتداد این نیمرخ تاقدیس نفت دارای موقعیت محوری ۱۲۵/۰ (میل/روند) و شیب سطح محوری آن ۱۳۵/۷۷ (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

محاسبه شده برای پارامتر کندی (Bluntness) چین در راستای این نیمرخ ساختاری ۸/۰ > \underline{b} > ۶/۰ و در رده نیمه گرد قرار داد. همچنین مقادیر به دست آمده برای نسبت ابعادی این نیمرخ ۵/۲۵ > p > ۱ میباشد که نشان دهنده عریض بودن چین است.



شکل۶- 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.

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 چینخوردگی های 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-

گیری پارامترهای هندسی یک سطح چینخورده 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 چینخوردگی جدایشی در کمربند میباشد. باتوجه به اهمیت چینخوردگی جدایشی در کمربند میباشد. این و هندسی این چینخوردگی ها ارائه شده است و جنبشی و هندسی این چینخوردگیها ارائه شده است و میتقدند که چنانچه میزان شیب یالهای تاقدیس و نسبت سینوس آنها اندازه گیری شود میتواند جهت محاسبه میزان کوتاه شدگی لایه مقاوم بالای لایه جدایشی شکل-پذیر که چین در آن توسعه یافته است استفاده می شود.

$$S = (Calculated Shortening Lb)/10$$
 (1)

$$RL = \sin vf / \sin vb$$
 (7)

مقدار کوتاه شدگی به دست آمده از نمودار باید در رابطه ۱ جایگزین شود تا میزان کوتاه شدگی واقعی به دست آید. باتوجه به پارامترهای محاسبه شده در جدول ۱ موقعیت تاقدیس نفت جهت برآورد میزان کوتاه شدگی بر روی نمودار (شکل ۷) نشان داده شده است. در واقع این نمودارها با استفاده از پارامترهای هندسی چینخوردگی، کوتاهشدگی، بالاآمدگی 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 (جدول۱). 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:

جدول۱: مشخصات هندسی چینهای سطحی و زیرسطحی تاقدیس نفت و پارامترهای هندسی لازم جهت استفاده از نمودارهای مربوطه (Jamison, 1987; Poblet and McClay, 1996).

كوتاه	R_l	شيب	شيب	طول	طول	کندی	نسبت	طول	دامنه	سطح	موقعيت	زاويه	زاويه	زاويه	مقطع
شدگی		يال	يال	يال	يال	چين	ابعادى	موج	چين	محورى	فضايى	تمايل	چين	ميان	
برحسب		جلويى	عقبى	جلويى	عقبى						محور		خورد	يالى	
نمودار													گی		
٩,٢%	۱.۹	۴۵	۲۵	۳,۷	۶	۴۱.	۰,۱۳	18	١,١	۰۳۵.۷۷	170.0	۱۰۰	٧٠	111	نيمرخ
															عرضى

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).

بررسی دگرریختی سطوح جدایشی، گسلهای راندگی و راستالغز پیسنگی ...

على پور و همكاران



شکل۷- نمودارهای تعیین پارامترهای هندسی چینهای جدایشی (Poblet and McClay, 1996). اعداد پارامتر RL در نمودارها به ترتیب ۱، ۱/۱، ۱/۲۵، ۱/۴۳، ۲/۵۰، ۲/۵۰، ۵۰ 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.

مقادیر بر مبنای ۱۰ = Lb نرمالیزه شدهاند. مقدار کوتاه شدگی 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 کوتاه شدگی برای یال پشتی و یال جلویی محاسبه شد. این مقدار کوتاه شدگی که از نمودار به دست آمده است در نمودارهای شکل (۲ c,d,e) قرار داده تا مقدار برخاستگی، زاویه بینیالی و شیب سطح محوری محاسبه شود.

نتايج 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

مرتبط با گسل نشان میدهد که تاقدیس نفت از نوع چینهای جدایشی نامتقارن (asymmetric) و استوانهای است. این تاقدیس در امتداد طولی خود بهصورت خط مستقیم نیست. بلکه به دلیل تغییر در لیتولوژی سنگ منطقه، اختلاف مقاومت میان سازندها و فشار وارده به منطقه دچار خمیدگی و انحنا در مسیر محور خود گشته-منطقه دچار خمیدگی و انحنا در مسیر محور و پایین محور است. در نقاطی که بیشترین میزان خمیدگی وجود دارد، تقسیم میشود به همین دلیل احتمال شکستگی و گسلش بیشتر است. یک گسل به طول چندکیلومتر 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 میده. در تاقدیس مورد نظر نیز خمیدگی طولی ایجاد می شود هرچه شیب راندگی کمتر باشد، نرخ لغزش بیشتر و هرچه مقدار این شیب بیشتر باشد نرخ لغزش آن کمتر خواهد بود (شکل۸).

نتیجه تغییر روند گسل، نرخ لغزش متفاوت این گسل راندگی که خود ناشی از زاویه شیب متفاوت ان در بخش-های مختلف میباشد، موجب اختلاف در زاویه شیب یال-ها، شدت چین خوردگی، پهنای چین و در طول ساختار



شکل۸- 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 می باشد که به وسیله گسلهای پی سنگی (ناشی از همگرایی ورقه عربی و ورقه ایران مرکزی) کنترل می گردد. 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 این که در ایجاد ساختارهای بزرگ ناحیه زاگرس دخالت داشتهاند، در شکل گیری ساختارهای کوچکتر مثل تاقدیسها و خمیدگی محوری موجود در آنها نیز تأثیر گذاراند (Falcon, 1961; Faver, 1975). حرکت بلوکهای بزرگ پیسنگی (که به وسیله گسلهای طولی بیشتر هستند ایجاد میشوند. ساختارهای زیناسبی نیز نشاندهنده فاصلههایی از گسل هستند که دارای نرخ لغزش کمتر میباشد (شکل۹).

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





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).

Marone, 2019). همگرایی یاد شده بر خلاف بخشهای دیگر سیستم کوهزایی آلپ-هیمالیا، 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، زاگرس یکی از گسلهای مهم زاگرس است. این گسل، فعال و لرزهزا به شمار می آید و رومرکز چند زمین لرزه فعال و لرزهزا به شمار می آید و رومرکز چند زمین لرزه فعال و لرزهزا به شمار می آید و رومرکز چند زمین لرزه به ثبت رسیده است (and Jackson, 2002) دلیل مورب بودن بردار جابه جایی این گسل نسبت به خط علاوه بر عوامل ذکر شده در دگرریختی ساختارهای چینخورده کمریند چین خوردهرانده زاگرس، گسلش راستالغز پی سنگی نیز از عوامل موثر بر دگرریختی هندسی ساختارها است. به طور کلی دگرریختی جنبا در فلات ایران حاصل همگرایی ورقههای عربی و اوراسیا می-باشد (Walker and Jackson, 2002) این همگرایی مایل باشد (2002, Walker and Jackson) این همگرایی مایل در چینها و راندگیهای عمود بر راستای کوتاهشدگی، گسل-های راستالغز راست گرد با راستای شمال باختر جنوب خاور تا شمالی جنوبی در بخشهای شمال باختر، باختر و خاور فلات و گسلهای راستالغز چپ گرد با راستای خاوری –باختری در Yassaghi and (

درز زاگرس است . به این ترتیب که کوتاه شدگی به دو مؤلفه عمود بر راستای زاگرس و به موازات آن قابل جدایش می شود که بردار عمود بر راستای زاگرس، گسل های راندگی و رشد چین ها را موجب می شود و بردار در راستای زاگرس، حرکتی راستالغز راست گرد را در راستای گسل اصلی جوان زاگرس و قطعات آن ایجاد می کند. جابه جایی عادی در امتداد گسل اصلی-قطعات آن ایجاد می کند. جابه جایی عادی در امتداد گسل اصلی-موان زاگرس در اثر انحراف از امتداد جابه جایی راستالغز کامل بوان زاگرس در اثر انحراف از امتداد جابه جایی راستالغز کامل رخ می دهد (Raipoor). گسل اصلی جوان زاگرس در حد واسط پاره-گسل های پیرانشهر در شمال باختر و مریوان در جنوب-خاور، خمیده و با گسترش پهنه رهایی همراه شده است. (Talebian and Jackson, 2002).

در قسمت شمال باختری کمربند چین خورده-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. در حالیکه گسل راستالغز جوان اصلیزاگرس با زاویه زیاد از پیسنگ منشا گرفته، توالیها را تا سطح برش داده و باعث از پیسنگ منشا گرفته، توالیها را تا سطح برش داده و باعث انتقال دگرریختی به درون پهنه لرزهزا شده است (شکل ۱۰۵) وقوع زلزله از گله-سرپل ذهاب 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 شمال باختری-جنوب-

خاوری نیست بلکه در قسمتهای خارجی کمربند چین-خورده-رانده زاگرس در امتداد گسلهای فعال با روند شمالی-جنوبی توزیع می شود. فوکال مکانیسم برخی از پسلرزههای زلزله ازگله-سرپلذهاب همچون پسلرزه ۲۵ نوامبر ۲۰۱۸ زمین لرزهای با بزرگای ۶/۴ (مرکز لرزهنگاری مؤسسه ژئوفیزیک دانشگاه تهران) که پیرامون شهر سریل ذهاب رخ داده است سازوکار راستالغز راست گرد 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 تاقديس نفت، انتقال دگرريختي ها 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 سطحى تاقديس، اين گسل راستالغز پيسنگي باعث تغيير راستای محور از N70W در بخش شمالباختری به N50W در بخش جنوبخاوری و انتقال دگرریختیها به درون تاقدیس می باشد (شکل۱۰b). 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.



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.

دود ۷۰ کیلومتر و با هندسه ساختارهای عمقی به ویژه گروه بنگستان را ور در شمال زیرپهنه تحت تأثیر قرار میدهد، به عنوان سطح جدایش میانی اسیک (سازند گرو) که و فلیشیهای پالئوسن (سازند امیران) به عنوان سطح

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 مدور تشکیل شده است. با توجه به پارامترهای مدور تشکیل شده است. این تاقدیس از نظر فشردگی هندسی در تاقدیس نفت، این تاقدیس از نظر فردگی مردگی میخان 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 راندگی-های پیسنگی در این تاقدیس باعث اختلاف عمق زیاد پیسنگ در طول تاقدیس، افزایش ضخامت رسوبات در محل راندگیهای پیسنگی و همچنین کچشدگی تاقدیسها و عدم تطابق شیب یالها بر روی سازندها شده است.گسل راستالغز پیسنگی در یال

منابع

آقانباتی، 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 جواناصلیزاگرس 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 ۲۰۸. علیپور، ر.، علوی، ا، قاسمی، م.ر.، مختاری، م.، گلالزاده، ع.ر.، "تحلیل شکستگیهای سنگ مخزن آسماری در میدان نفتی پازنان

(جنوب باختر 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., "Acritarch 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 devolopment 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.
- Sprrat, 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 intracontinental 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.