



Research Article

OPEN ACCESS

Kharazmi Journal of Earth Sciences

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

Tectonic analysis of curved northern border of the Sistan zone with the Lut Block, north of Birjand

Shahriyar Keshtgar ^{1*}, Mahmoud Reza Heyhat², Sasan Bagheri³, Ebrahim Gholami ², Seyed Naser Raiisosadat⁴

1. Ph.D student, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran.

2. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

3. Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

4. Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

Article info

Article history

Received: 25 December 2023

Accepted: 19 February 2024

Keywords:

Tectonic analysis, Buckling, Thrust, Conical fold, Lut block, Eastern Iran.



Abstract

The curved fold-thrust belt of North Birjand contains some outcrops of Upper Paleozoic to Cenozoic sequences that have undergone several stages of deformation. Thrusting, large-scale parallel and radial folds, penetrative shear cleavage, tectonic klippe, tensile fractures, and conjugate strike-slip faults are exposed in this structural arc. The Chah-hoz region consists of Upper Cretaceous mélanges and listvenites with NW-trending thrust sheets dipping to the NE. The Mousavieh area includes pre-Cretaceous metamorphic rocks belonging to the basement of the Lut block, Cretaceous ophiolite and turbidite complex, and Eocene platform limestone. The dip of thrust planes in the outer part of this arc is SSE and in the inner part of the arc is generally NNW indicating the direction of regional tectonic transport towards the interior of the arc. The abrupt boundary between the Eocene-Oligocene continental deposits in the north of this arc is either thrust or characterized by two types of major folds: The first type is the parallel folds with the edge of the arc, which are often cylindrical, but under the influence of the younger generation folds, they have become non-cylindrical, and the second type is the conical folds with a radial arrangement, the apex of the cone is plunged towards the NNW.

Therefore, it seems that the structures of the northern curved border of the Lut and Sistan terrains do not follow the model of common structures in linear collision mountains i.e., eastern Iran continental crust rifting and subsequent linear collision of the Lut and Afghan blocks. According to this research, it seems that the NW movement of the North Birjand platform was caused by buckling in the Late Eocene-Oligocene.

Introduction

The fold-thrust belts are among the most important large-scale curved structures in the world (Carey, 1955), such as: Alpine (Apennines), Appalachian (Kingstone), and South Asian (Makran) (Sengor et al., 1988; Stampfli and Borel, 2002; PastorGalan, 2012).

The tectonics of eastern Iran is thought to be influenced by the existence of strip of the Neotethys ocean between two continental blocks, the Afghan block in the east and the Lut block in the west (McCall, 1997; Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983).

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.104162>

*Corresponding author: Shahriyar Keshtgar; E-mail: shahriyar.keshtgar@birjand.ac.ir

How to cite this article: Keshtgar, Sh., Heyhat, M.R., Bagheri, S., Gholami, E., Raiisosadat, N., 2024. Tectonic analysis of curved northern border of the Sistan zone with the Lut Block, north of Birjand. Kharazmi Journal of Earth Sciences 9(2), 163-196. <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.104162>



The eastern Iranian ranges, which is also known as the Sistan suture zone, includes the Cretaceous-Eocene turbidites, ophiolite mélanges and high pressure metamorphic rocks (Bagheri and Damani Gol, 2020). The Lut block was accreted to the Eurasian continent during the closure of the Paleotethys Ocean in the Late Triassic. However, there is no consensus on the Middle Eocene (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) or Late Cretaceous (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013, Bonnet et al., 2018) timing of the closure of the Neotethyan oceanic branch between the Lut and Afghan continental blocks.

The purpose of this research is to investigate the ductile and brittle structures caused by the progressive deformation associated with the evolution of the North Birjand. The most important questions are: is the orientation of structures and especially thrust sheets compatible with the linear collision model of the Lut and Afghan continental blocks? Is the direction of tectonic vergence towards the interior of the Sistan terrain and centripetal? What is the temporal relationship between the successive deformation, the shortening direction, the age of various magmatic pulses, and the age of sedimentary basins during the Eastern Iran orogeny?

Materials and Methods

This research is based on field studies in order to understand the nature of deformation events and effective stress regimes in the study area. In this regard, three geological sections have been selected in different directions of the North Birjand arc. The structural data include various folds, cleavages, bedding and faults, especially the thrust sheets. In this study, geological map and structural sections

are drawn and corrected. To analyze data, Stereonet and Gis10.3 software were used.

Results and Discussion

In the Chah-hoz area, reverse folds can be seen in the Eocene shale and sandstone sequences. The vergence of these folds is different depending on the part of the curved structure in the north of Birjand.

In the central part of the North Birjand structural arc, several thrust sheets and reverse folds are well exposed at the boundary of the Cretaceous ophiolite mélange with Eocene carbonate platform. There are two different generations of folds in the studied area: the first-generation folds are parallel to the main thrusts (mostly cylindrical folds) and have a curved shape with a concavity towards the southeast. The second-generation folds have a radial orientation along the north-west axial surface and are conical in shape, located within the Birjand structural arc (in the old foreland), leading to the rise of the sedimentary basin. The plunge direction of these radial folds is towards the north-northeast. Along the curved northern border of the Lut and Sistan terrains, conjugate strike-slip faults can be observed on satellite images (for example, in the Mahirud, Ahangaran, Sechengi and Mousavieh areas). In eastern Iran and the North Birjand buckle fold, the NE strike-slip faults have right-slip and the NW strike-slip faults have left-slip movements.

Conclusions

Tectonic analysis of fold-thrust belt in the north of Birjand, indicates that simultaneously with the development of thrusts, other related structures such as: tensile (fractures, veins, sliding and normal faults), strike-slip (conjugate faults) and compression (thrusts, parallel and conical folds) have occurred in the region. Analysis of these structures indicates

the occurrence of three distinct deformation events (Fig.1).

Therefore, it seems that the fold-thrust structures in the curved northern border of the Lut and Sistan terrains are not expected

structures in the classical fold-thrust belts. Also, these structures do not resemble to the expected structures that are common in the linear collision zones, but resemble large-scale buckling orogens (orocline).

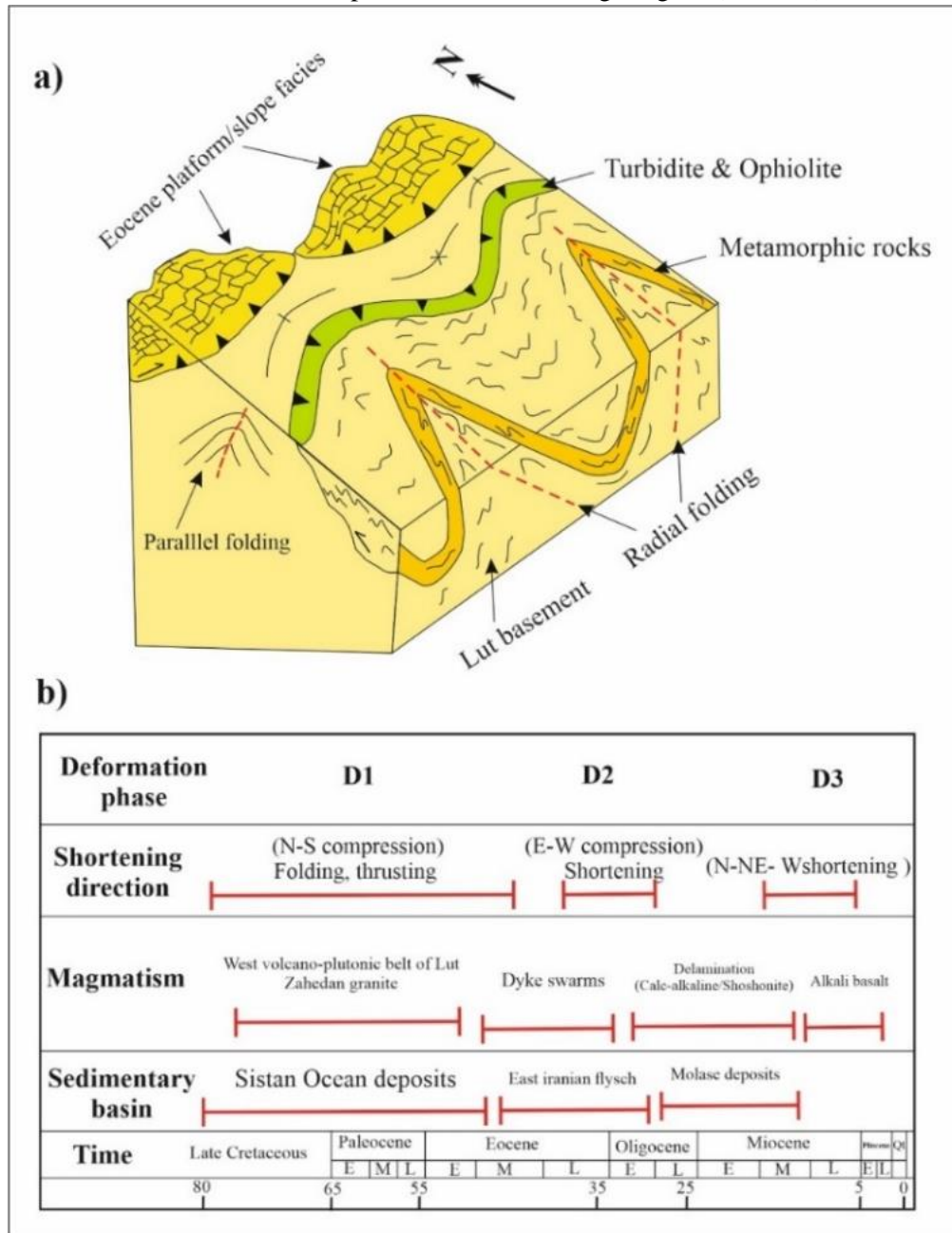


Fig.1. a) Proposed tectonic model of the northern curved border of the Lut and Sistan terrains. b) Time chart for the temporal relationship between the successive deformation, the shortening direction, the age of various magmatic pulses, and the age of sedimentary basins during the East Iranian orogeny.

References

- Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J., Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic mélangé (Eastern Iran). *Lithos* 156(159), 139–158.
- Bagheri, S. Damani Gol, S.H., 2020. The eastern Iranian Orocline. *Earth Science Review* 210, 1–43.
- Bonnet, G., Agard, P., Angiboust, S., Monié, P., Jentzer, M., Omrani, J., Whitechurch, H., Fournier, M., 2018. Tectonic slicing and mixing processes along the subduction interface: The Sistan example (Eastern Iran). *Lithos* 310–311, 269–287.
- Camp, V.E. Griffis, R.J., 1982. character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15, 221–239.
- Carey, S.W. 1955. The orocline concept in geotectonics: Proceedings of the Royal Society of Tasmania, 89, 255–288.
- McCall, G. J. H., 1997. The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(6), 517–531.
- Pastor-Galaín, D., Gutiérrez-Alonso, G, Mulchrone, K. F., Huerta P., 2012. Conical folding in the core of a orocline. A geometric analysis from the Cantabrian Arc (Variscan Belt of NW Iberia). *Journal of structural geology* 39, 210–223.
- Sengor, A.M.C., Altmer, D., Cin, A., Ustaömer, T., Hsü, K.J., 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. Geological Society of London, Special Public, 119–181.
- Stampfli, G.M., 2000, Tethyan oceans. Geological Society of London, Special Public 173, 1–23. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2000.173.01.01>.
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letter* 196, 17–33.
- Tirrul, R., Bell, L.R., Griffis, R.J., Camp, V.E. 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran. *Geological Society of American Bulletin* 94, 134–150.
- Zarrinkoub, M. H., Pang, K.-N., Chung, S.-L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.-Y., Lee, H.-Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 154, 392–405.

ORCID iD authorship contribution statement

	Investigation-Writing - Original Draft, Software
Shahriyar Keshthgar	
	Supervision, Funding acquisition
Mahmoud Reza Heyhat	
	Supervision, Conceptualization, Validation
Sasan Bagheri	
	Writing - Review & Editing
Ebrahim Gholami	
	Writing - Review & Editing
Seyed Naser Raiisasadat	



آنالیز تکتونیکی مرز خمیده شمالی پهنه سیستان با بلوک لوت در شمال بیرجند

شهریار کشتگر^{۱*}، محمودرضا هیهات^۲، ساسان باقری^۳، ابراهیم غلامی^۲، سید ناصر رئیس السادات^۴

۱. دانشجوی دکترا، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

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

۳. دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

۴. استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

چکیده

ساختار چین‌خورده-رانده خمیده شمال بیرجند متشکل از رخنمون‌های اندکی از سازندهای پالئوزوئیک بالایی، تریاس و کرتاسه همراه با توالی‌های سنوزوئیک است که دچار چندین مرحله دگربرختی شده‌اند. راندگی، چین‌های موازی و شعاعی بزرگ مقیاس، تورق برشی نافذ، بازمانده‌های تکتونیکی، شکستگی‌های کششی و گسل‌های امتدادلغز مزدوج، در این قوس ساختاری رخنمون دارند. منطقه چاه‌حوض که در یال شرقی ساختار چین رانده وجود دارد، متشکل از برگه‌های راندگی متوالی در ملائزها و لیستونیت‌های کرتاسه بالایی است که امتداد شمال غرب و شیب به سمت شمال شرق دارند. در منطقه موسویه، سه توالی مجزا شامل سنگ‌های دگرگونی قدیمی‌تر از کرتاسه مربوط به پی‌سنگ لوت، مجموعه افیولیت و توربیدایت کرتاسه، و سنگ آهک‌های پلاتفرمی ائوسن وجود دارد. شیب صفحات راندگی در بخش بیرونی قوس به سمت SSE و در بخش درونی قوس عموماً به سمت NNW است که جهت انتقال زمین‌ساختی به سمت داخل قوس نشان می‌دهند. مرز ناگهانی بین نهشته‌های قاره‌ای ائوسن-الیگوسن در شمال این قوس یا از نوع راندگی است و یا توسط چین‌های با دامنه‌های بزرگ مشخص می‌شود که از دو نوع هستند: نوع اول چین‌های موازی با حاشیه قوس می‌باشند که اغلب سیلندری بوده اما تحت تأثیر نسل جوان‌تر چین‌خوردگی، غیرسیلندری شده‌اند و نوع دوم چین‌های مخروطی با آرایش شعاعی هستند که رأس مخروط آنها به سمت NNW پلانژ دارد. بنابراین به نظر می‌رسد ساختارهای مرز خمیده شمالی لوت و سیستان از مدل ساختارهای رایج در کوهزادهای برخوردی خطی (بازشدگی پوسته قاره‌ای شرق ایران و برخورد خطی بلوک‌های لوت و افغان) تبعیت نمی‌نماید. بر اساس نتایج این پژوهش، به نظر می‌رسد حرکت رو به شمال غرب پلاتفرم شمال بیرجند و خمش همزمان آن در اواخر ائوسن-الیگوسن عامل ایجاد دگرشکلی‌های متنوع بوده است.

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۰۴

پذیرش: ۱۴۰۲/۱۱/۳۰

واژه‌های کلیدی

آنالیز تکتونیکی، خمش، راندگی، چین مخروطی، لوت، شرق ایران.



مقدمه

"نعل اسبی" دیده می‌شود و دچار خم‌شدگی ثانویه شده است (Carey, 1955). چنین کوهزادی در ابتدا به صورت یک کمربند خطی بوده که تحت تأثیر حادثه کوهزاد ثانویه حول یک محور قائم دچار خمش

بسیاری از کمربندهای چین‌خورده-رانده در طبیعت به شکل خطی ظاهر نشده و اشکال منحنی شکل تا خمیده دارند. بر اساس تعریف، یک کوهزاد خم‌شده عبارتست از کوهزادی که روی نقشه به شکل

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.104162>

*نویسنده مسئول: شهریار کشتگر shahriar.keshtgar@birjand.ac.ir

استناد به این مقاله: کشتگر، ش.، هیهات، م.، ر.، باقری، س.، غلامی، ا.، رئیس السادات، ن. (۱۴۰۲) آنالیز تکتونیکی مرز خمیده شمالی پهنه سیستان با بلوک لوت در شمال بیرجند. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۹، شماره ۲، صفحه ۱۶۳ تا ۱۹۶.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2024.9.2.104162>



مولفه‌های تنشی فرعی متأثر از گسلش راندگی به طور هم‌زمان در لایه‌های مجاور هم به وجود آیند (Ferrill et al., 2021).

در فلات ایران و حواشی آن مثال‌هایی از سیستم‌های کمربند چین-رانده دوران سنوزوئیک دیده می‌شود که پهنه سیستان نمونه‌ای از این نوع کمربندها است. در حاشیه شرقی بلوک لوت، در محل راندگی کوه‌های شرق ایران و بلوک لوت، قطعات تکتونیکی از پهنه سیستان به شکل قوس‌های ساختاری با تحدب به سمت شمال وارد بلوک لوت شده و به صورت متناوب باهم قرار گرفته‌اند (مناطق آهنگران-موسویه-سه چنگی). در بخش مرکزی این ساختار، پلاتفرم کربناته ائوسن بنام قوس ساختاری بیرجند گسترش دارد که دچار دگرریختی شدیدی شده است. چین‌های برهم‌نهاد از مهم‌ترین ساختارهای بزرگ مقیاس شرق ایران است که اولین بار توسط تیرول و همکاران (Tirrul et al., 1983) مورد بحث قرار گرفته است. این محققین منشاء و مکانیسم تشکیل چین‌های برهم‌نهاد حوضه سفیدآبه با اثر محوری E-W را که متأثر از یک رژیم تنشی شمالی-جنوبی در زمان قبل از ائوسن میانی به وجود آمده‌اند را ابهام برانگیز دانسته‌اند. به طوری که جهت‌یابی محور دو نسل چین‌های برهم‌نهاد، با مدل‌های تکتونیکی ارائه شده (Tirrul et al., 1983; Pang et al., 2013; Zarrinkoub et al., 2012; McCall, 1985; Angiboust et al., 2013) برای شرق ایران توجیه‌پذیر نیستند. برخی محققین ساختارهای خمیده کوهزاد شرق ایران را نوعی اوروکلاین ثانویه

شده است. بنابراین ساختار مذکور به عنوان یک قوس هلالی ثانویه محسوب می‌شود. اثرات ناحیه‌ای چین‌ها، گسل‌ها و تورق‌ها در کمربندهای چین‌خورده-رانده به صورت خمش‌هایی بر روی نقشه‌ها قابل مشاهده هستند (Marshak, 2002). از مهم‌ترین ساختارهای بزرگ مقیاس ناحیه‌ای دنیا می‌توان به خم‌شدگی‌های آلیپ (Apennines)، آپالاش (Kingstone) و خم-شدگی‌های جنوب آسیا (مکران) اشاره نمود.

در مطالعه کمربندهای چین‌خورده-رانده به دلیل وجود خصوصیات زمین‌شناسی و ساختاری متفاوت، عوامل متعددی در هر نوع از این کمربندها تأثیرگذار هستند (Poblet and Lisel, 2014). این عوامل عبارتند از: محیط تکتونیکی که کمربندهای چین‌خورده-رانده در آن تکامل یافته‌اند به لحاظ اینکه نازک پوسته یا ضخیم پوسته باشند؛ نقش چینه‌شناسی مکانیکی؛ حضور، گسترش و ضخامت واحد نمک/شیل در زون جدایش؛ وجود فرسایش و نهشته‌شدن و تدفین رسوبات همزمان با کوهزایی؛ عمق زون جدایش؛ ضخامت الاستیک موثر سنگ‌کره، وجود ساختارهای از قبل موجود پی‌سنگی و مدت زمان تأثیر و نرخ دگرشکلی (Fitz-Diaz et al., 2011). با توجه به اختلافات سنگ‌شناسی، زمان نسبی عملکرد فاز دگرشکلی، شدت و ماهیت کرنش و مقیاس مشاهدات صورت گرفته، دگرشکلی ممکن است به صورت‌های مختلفی ظهور پیدا کند که می‌بایست در تفسیر نتایج مورد بررسی قرار گیرد. گسیختگی‌های کششی، هیبرید، برشی، برش متأثر از فشارش، و گسیختگی فشارشی نیز می‌تواند در

معرفی نموده‌اند که حاصل خمش بزرگ در مقیاس لیتوسفر، متأثر از برخورد هند-اوراسیا در اواخر پالئوسن - اوایل ائوسن است و ماگماتیسم پالئوژن شمال لوت را مرتبط با خمش اوروکلاین در نظر گرفته‌اند (Bagheri and Damani Gol, 2020).

در تقسیم‌بندی دیگری، چهار زیر پهنه یا واحد تکتونیکی از جنوب به شمال برای مرز قوسی خمیده سیستان-لوت معرفی شده است (Samimi et al., 2020): ۱- واحد افیولیت باقران، ۲- واحد ملانژ افیولیتی، ۳- پلاتفرم کربناته قوس، ۴- واحد چین-خورده پهنه شوشود. موسوی و همکاران (Mousavi et al., 2010) با روش وارون‌سازی تنش در جنوب بیرجند، از زمان کرتاسه تا ائوسن تعداد ۳ فاز دگرشکلی مختلف فشارشی، فشارشی-برشی و کششی را به دست آورده‌اند. احمدی کمیجانی و همکاران (Ahmadi Comijany et al., 2019) بر اساس برداشت‌های صحرایی میزان کوتاه شدگی پوسته شرق ایران در منطقه ماهیرود را محاسبه و جهت انتقال زمین‌ساختی این منطقه را به سوی جنوب باختر به دست آورده‌اند. ساختار چین‌خورده تداخلی آچانی و نحوه جهت‌یابی دایک‌های مرتبط با آن، در منطقه قائن که در شمال ابرقوس خمیده لوت-سیستان واقع شده است، توسط رجحانی و همکاران (Rojhani et al., 2021) مطالعه شده‌اند که منشأ این ساختار عظیم به یک نوع خمش اوروکلاینی در زمان ائوسن ارتباط داده شده است.

هدف این پژوهش بررسی انواع ساختارهای شکل‌پذیر تا شکننده ناشی از دگرشکلی پیشرونده

مرتبط با تکامل راندگی‌های اصلی قوس بیرجند به منظور پی بردن به مکانیسم و شرایط تشکیل آن می‌باشد. در این پژوهش مهم‌ترین پرسش ما عبارت است از اینکه: آیا جهت‌یابی انواع ساختارها و به خصوص راندگی‌ها با مدل‌های برخورد خطی بلوک‌های لوت و افغان سازگاری دارد؟ آیا جهت انتقال زمین‌ساختی و جهت برگشتگی چین‌های مرتبط با راندگی، به سمت داخل پهنه سیستان و رو به مرکز است؟ انواع فازهای دگربرخی موثر و ارتباط زمانی این فازها و اثرات آن در مناطق مورد مطالعه به چه نحوی است؟

روش تحقیق

در این پژوهش که مبتنی بر مطالعات صحرایی است، خصوصیات هندسی انواع ساختارهای شکننده، برشی و شکل‌پذیر منطقه، به منظور فهم ماهیت دگرشکلی، زمان رخداد و نوع رژیم‌های تنشی موثر مورد بررسی و تحلیل واقع شده است. در این راستا سه برش زمین‌شناسی در راستاهای مختلف قوس ساختاری شمال بیرجند انتخاب شده است. داده‌های ساختاری جمع‌آوری شده شامل چین‌ها و گسل‌های مختلف به خصوص راندگی‌ها می‌باشد. به منظور تجزیه و تحلیل داده‌های ساختاری جمع‌آوری شده ابتدا برش‌های زمین‌شناسی ترسیم شد و بر اساس تصاویر ماهواره ای (Landsat 8) ترکیب باند ۱-۴-۷ و تصاویر (SAS Planet) و برداشت‌های صحرایی، نقشه ساختاری و زمین‌شناسی منطقه ترسیم گردید. برای تجزیه و تحلیل داده‌ها از نرم‌افزارهای Stereonet و Gis10.3 استفاده شده‌است.

زمین‌شناسی منطقه

ایران و سرزمین‌های مجاور آن به صورت بلوک-های قاره‌ای هستند که در طرحی موزاییکی، توسط کمربندهای چین و گسل خورده سیستم‌های کوهزایی مختلف به یکدیگر پیوند خورده‌اند. تکامل چنین سیستم عظیمی به وسیله باز و بسته شدن اقیانوس-های تیتسی کنترل شده است (Sengor et al., 1988; Stampfli and Borel, 2002). قلمرو تیتسی به طور عمده در بردارنده قلمروهای پالتوتیتسی در شمال، نئوتیتسی در جنوب و حوضه‌های حاشیه‌ای آن می-باشد (Stocklin, 1972). پالتوتیتسی اقیانوسی بوده که قلمرو واریسکن را از بلوک‌های سیمین مشتق شده از گندوانا، جدا کرده است. در مقابل نئوتیتسی اقیانوسی بوده که بلوک‌های سیمین در شمال را از گندوانا در جنوب جدا کرده است. پالتوتیتسی طی ریفت‌شدگی اردوئیسین پایانی-سیلورین باز شده و در تریاس به دلیل فرورانش به سمت شمال به زیر حاشیه‌ی جنوبی اوراسیا بسته شده است (Stampfli and Borel, 2002). در مورد نئوتیتسی اغلب شواهد دلالت بر بازشدگی آن در زمان پرمین آغازی و در نهایت بسته شدن آن در ترشیاری پایانی دارند (Stampfli, 2000).

برخی محققین تکتونیک شرق ایران را متأثر از وجود باریکه‌ای از اقیانوس نئوتیتسی در بین بلوک‌های قاره‌ای افغان در شرق و لوت در غرب می‌دانند (McCall 1997) که در کرتاسه باز شده است (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983). تقسیم‌بندی‌های متفاوتی برای واحدهای

ساختاری ایران توسط محققین مختلف ارائه شده است اما برای محدوده مورد مطالعه دو پهنه ساختاری سیستان و لوت عمومیت دارد (شکل ۱). رشته کوه‌های شرق ایران که با نام زمین‌درز (پهنه) سیستان نیز شناخته می‌شود، شامل توالی‌های توریدایتی کرتاسه-ئوسن، افیولیت ملانژها و دگرگونی‌های فشار بالا (در بخش شمالی) است. مجموعه فوق به عنوان سرزمین پیش بوم قدیمی (Foreland) در نظر گرفته می‌شود و منطقه پس بوم (Hinterland) در شمال مرز دندانه‌ای و خمیده بین لوت و سیستان وجود دارد (Bagheri and Damani, 2020; Gol., 2020). مطالعات ساختاری دیگری نیز در این پهنه انجام شده است (Jentzer et al., 2017, 2022; Rashidi et al., 2023) که بر اساس مطالعات تنش دیرین، حوادث دگرشکلی و راستای میدان تنش موثر در زمان‌های مختلف در شرق ایران تفکیک شده‌اند. همچنین با مطالعه شواهد ماگماتیسیم، مدل تکامل تکتونیکی پهنه‌های لوت-سیستان بازسازی شده است (Jentzer et al., 2017, 2022; Rashidi et al., 2023).

پهنه ساختاری لوت عمدتاً توسط آتشفشانی‌های ترشیاری و رسوبات قاره‌ای پوشیده شده است. در کنار آن می‌توان رخنمون‌های پراکنده‌ای از واحدهای پالتوزویک و مزوزویک و یک هسته سنگ‌های دگرگونی را نام برد (Stocklin, 1972). مهم‌ترین واحدهای زمین‌شناسی لوت عبارتند از: ۱- پی‌سنگ کادومین (Guillou et al., 1981; Rowshanravan, 2006)، ۲- رسوبات پالتوزویک (Berthiaux et al.,

جنوب شرق منطقه به صورت قطعات خرد شده و گسله دیده می‌شود. رخنمون‌های تریاس شامل سازند سرخ شیل است که در زیر دولومیت‌های شتری قرار دارند. رخنمون سازند شتری در جنوب شرق نقشه بر روی شیل‌های آهکی قرمز قرار گرفته است. سازندهای کرتاسه که توالی‌های کاملی را در برمی‌گیرند شامل تناوب‌های شیل، آهک، ماسه‌سنگ و رسوبات فلیشی‌اند که گاهی توف، بازالت و آندزیت نیز در میان توالی‌ها وجود دارد. روند عمومی چین‌خوردگی‌های محدوده، امتداد تقریبی E-W دارد که در پایانه‌های انتهایی زمین‌درز سیستان به سوی NE-SW متمایل شده است. بخش شمالی محدوده متأثر از گسل چاهک با روند NE-SW است و بارزترین چین‌ها در آهک‌های ائوسن دیده می‌شوند. فعالیت زمین‌ساختی منطقه از اواخر ائوسن پیشین به بعد زیادتر شده و باعث بالآمدگی رسوبات کرتاسه پیشین تا ائوسن پیشین شده است. این فعالیت‌ها منجر به نهشته‌شدن رسوبات آتشفشانی-رسوبی در فروافتادگی‌ها شده است. به جز چند حوضه که نهشته‌های آهکی به صورت پیشرونده روی سنگ‌های قدیمی‌تر کرتاسه پسین قرار دارند، در فاصله زمانی ائوسن پسین- الیگوسن بقیه مکان‌ها در خارج از محیط رسوبگذاری پیشرونده قرار داشته‌اند (Rowshanravan et al., 2006). در این محدوده گسل‌های امتدادلغز، نرمال و رانده و گسل‌های فعال کواترن وجود دارند. گسل‌های امتدادلغز جوان بیشتر حرکات راست‌بر و چپ‌بر دارند. سفره‌های رورانده و بازمانده‌های تکتونیکی در فلیش‌های کرتاسه بالایی

۱۹۹۱)، ۳- سنگ‌های ولکانوکلاستیک تریاس- ژوراسیک (Azimi and Saidy, 1975)، ۴- کربنات‌های پلاتفرمی کرتاسه - پالتوسن (Ohanian and Tatevosian, 1978)، ۵- پلاتفرم تخریبی ائوسن. این سرزمین در تریاس پسین در نتیجه بسته شدن اقیانوس پالتوتیس به قاره اوراسیا پیوسته است. زمان بسته‌شدن حوضه اقیانوسی نئوتتیس در شرق ایران همچنان جای بحث است به طوری که برخی زمان برخورد بلوک‌های لوت و افغان را ائوسن میانی (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) و برخی دیگر اواخر کرتاسه (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013, Bonnet et al., 2018) می‌دانند.

محدوده مورد مطالعه در نقشه‌های زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ موسویه (Rowshanravan et al., 2006)، بیرجند (Ohanian and Tatevosian., 1978) و خوسف (Vahdati Daneshmand and Kholghi, 1987) قرار دارد که در واقع منطقه مرزی بین سرزمین پس‌خشکی (Hinterland) در بخش شمالی قوس (متعلق به لوت) و ناحیه پیش‌خشکی (Foreland)، در بخش جنوبی قوس شمال بیرجند (متعلق به پهنه سیستان) است. بلندترین ارتفاعات منطقه توسط فلیش و افیولیت ملانژهای کرتاسه (کوه باقران) و توالی‌های آهک، شیل، ماسه‌سنگ قرمز و کنگلومرا تشکیل شده است (شکل ۲). رخنمون‌هایی از سازندهای پالتوزوئیک بالایی و سازندهای تریاس- کرتاسه همراه با توالی‌های سنوزوئیک نیز وجود دارند. اندک رخنمون سازندهای پالتوزوئیک بالایی در

ضعیف فیلیت و شیست وجود دارند که متعلق به پی‌سنگ لوت هستند. بر اساس برداشت‌های صحرایی، نیمرخ عرضی ترسیم شده از منطقه چاه حوض در شکل ۴-f نشان داده شده است.

ساختارهای شمال بیرجند

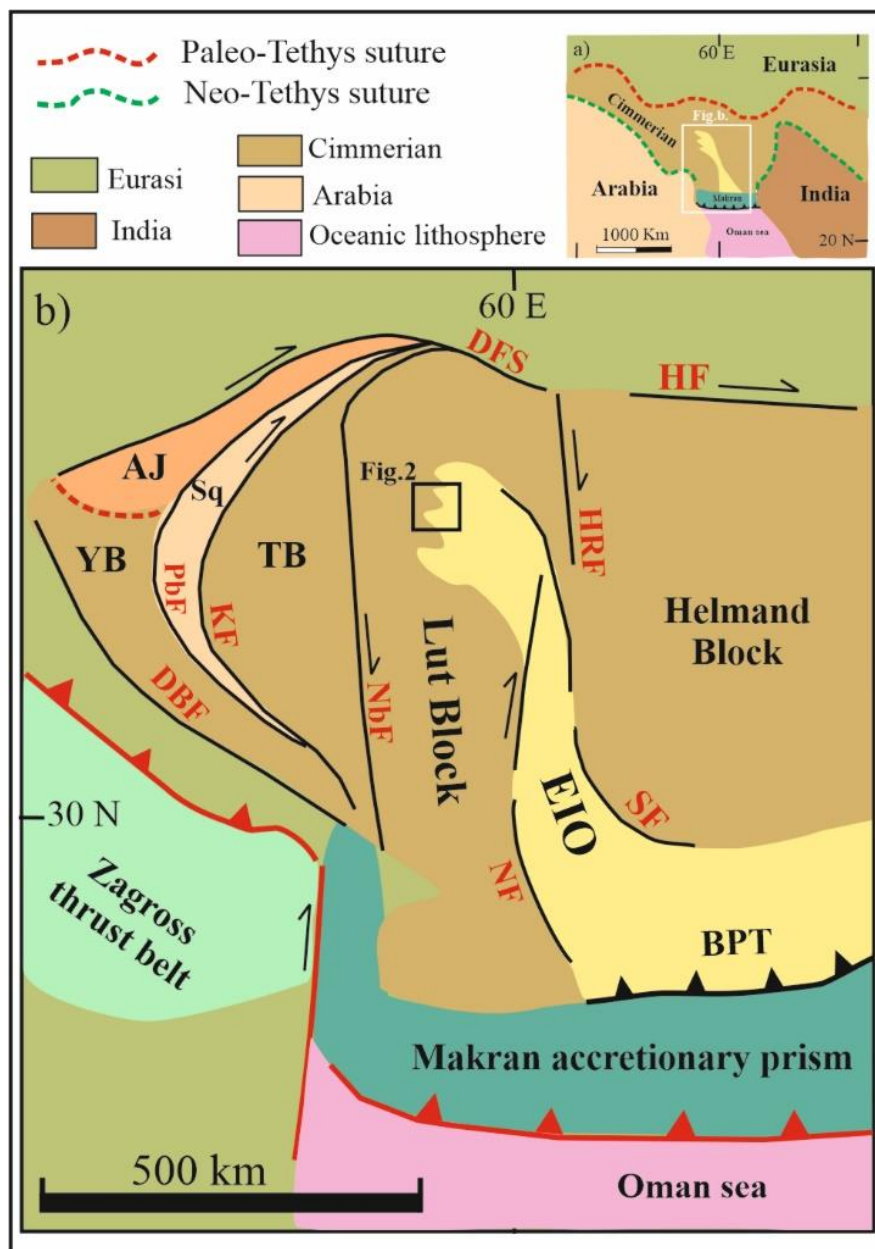
قوس ساختاری بیرجند متشکل از پلاتفرم کربناته ائوسن به صورت برگه‌های راندگی است که توسط مرز جدایشی شاخصی از نهشته‌های فلیشی کرتاسه جدا می‌گردد. این پلاتفرم کربناته به شکل سفره‌ای در پهنه وسیعی گسترش یافته و امکان لغزش و چین‌خوردگی آن بر روی یک فرودپواره لغزنده فراهم بوده است. این برش ساختاری (شکل ۵ در راستای خط B در شکل ۲-a) متشکل از واحد-های کربناته ائوسن شامل توالی آهک و ماسه‌سنگ قرمز نومولیت-آلوئولین دار است. میزان کوتاه شدگی قوس ساختاری شمال بیرجند توسط یعقوبی و باقری (Yaghoobi and Bagheri, 2020) بین ۳۰ تا ۴۰ درصد محاسبه و بازسازی شده است. در ادامه انواع ساختارهای مرتبط با مولفه‌های تنش‌های کششی، امتداد لغز و فشارشی متأثر از تنش اصلی ناحیه‌ای در این کمربند چین‌خورده-رانده بررسی می‌شوند:

دیده می‌شوند که در جنوب غرب ده موشی، سنگ آهک‌های کرتاسه زیرین به صورت بازمانده‌هایی بر روی واحدهای شیل-ماسه‌سنگی کرتاسه بالایی قرار گرفته‌اند.

تحلیل تکتونیکی

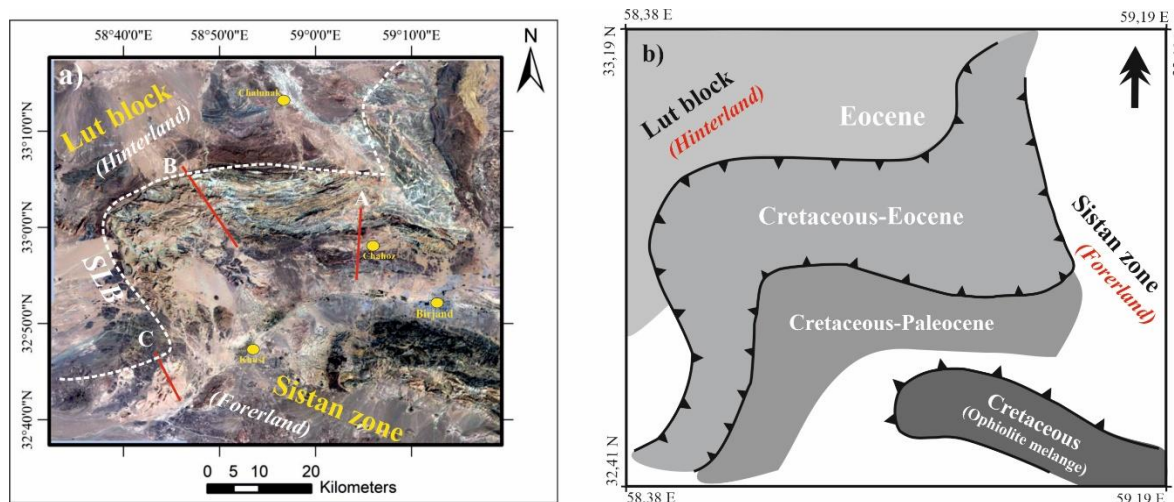
ساختارهای محدوده چاه حوض

در محدوده چاه حوض (خط A در شکل ۲) چین‌های برگشته در توالی‌های شیل و ماسه‌سنگ ائوسن قابل مشاهده است. جهت برگشتگی این چین‌ها بسته به اینکه در کدام بخش از یال‌های ساختار خمیده شمال بیرجند قرار داشته باشند، متفاوت است (شکل ۳). همچنین توالی‌های راندگی متعددی (Thrust sequences) وجود دارد که دارای امتداد شمال غرب و شیب به سمت شمال شرق هستند و منجر به راندگی ملانژها و لیستونیت‌های کرتاسه بر روی کربنات‌های ائوسن شده است (شکل ۴-a تا ۴-c). در بخش جانبی جبهه راندگی، گسلش راندگی با مولفه راست‌الغز وجود دارد به طوری که خش‌لغزهای کاملاً واضح و رگه‌های کششی متعددی در لیستونیت‌ها قابل مشاهده است (شکل ۴-d و ۴-e). در قاعده راندگی‌ها، سنگ‌های دگرگونی درجه



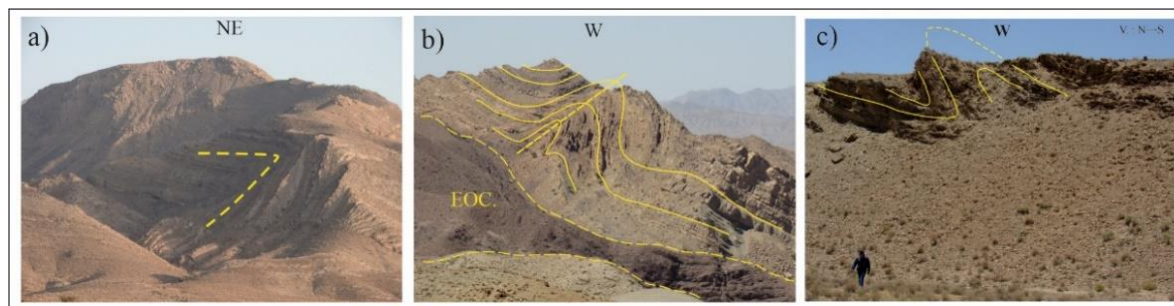
شکل ۱- (a) موقعیت کوه‌های شرق ایران در کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا. کادر سفید رنگ در شکل b بزرگنمایی شده است. (b) موقعیت منطقه مورد مطالعه (کادر سیاه) نسبت به پهنه‌های تکتونیکی ایران که در شکل ۲ بزرگنمایی شده است. YB: بلوک یزد، AJ: سرزمین انارک -جندق، TB: بلوک طبس، Sq: کمپلکس ساغند، BPT: راندگی بم‌پشت، DFS: سیستم گسله درونه، DBF: گسل دهشیر-بافت، HF: گسل هرات، HRF: گسل هریرود، KF: گسل کلمرد، Nb: گسل نایبند، NF: گسل نهبندان-نصرتاباد، PbF: گسل پشت بادام، SF: گسل سیاهان.

Fig.1. a) Geographic location of the East Iranian Ranges in the Alpine-Himalaya orogenic belt. b) Schematic map of the study area in relation to the tectonic zone of Iran (the inset shows the location of Fig. 2); YB: Yazd block, AJ: Anark-Jandagh region, EIO: Eastern Iran Orogen, TB: Tabas block, Sq: Saghand complex. BPT: Bamposht thrust, DFS: Doruneh fault system, DBF: Dehshir-Baft Fault, HF: Herat Fault, HRF: Harir-Rud Fault, KF: Kalmard Fault, Nb: Nayband Fault, NF: Nosrat-Abad Fault, PbF: Posht-Badam Fault, SF: Syahan Fault.



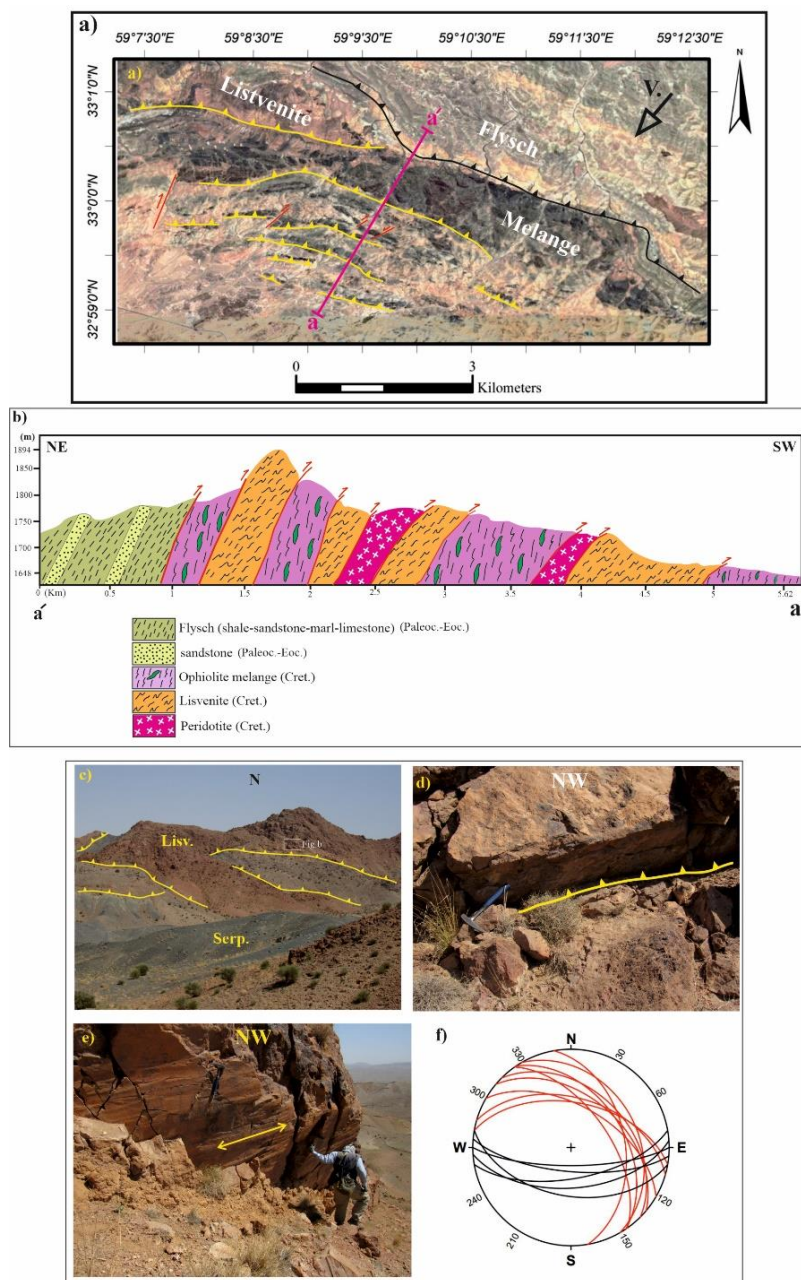
شکل ۲- a) تصویر ماهواره‌ای Landsat 8 مرز خمیده شمالی لوت-سیستان (SLB) در شمال بیرجند و موقعیت پیمایش‌های صحرائی انجام شده در مناطق چاه‌حوض (A)، جنوب موسویه (B) و خوسف (C). b) نقشه ساده شده واحدهای زمین‌شناسی (بر اساس نقشه ۱:۱۰۰۰۰۰ بیرجند و قائن) و تکتونیکی قوس چین‌خورده-رانده شمال بیرجند.

Fig. 2. a) Satellite image of the curved northern border of Lut-Sistan in the north of Birjand. The lines show the location of the field profiles. A: Chah-Hoz, B: South Mousavieh and C: Khusf area. b) Simplified map of geological and tectonic units of the North Birjand fold-thrust belt (Ohanian and Tatevosian, 1978).



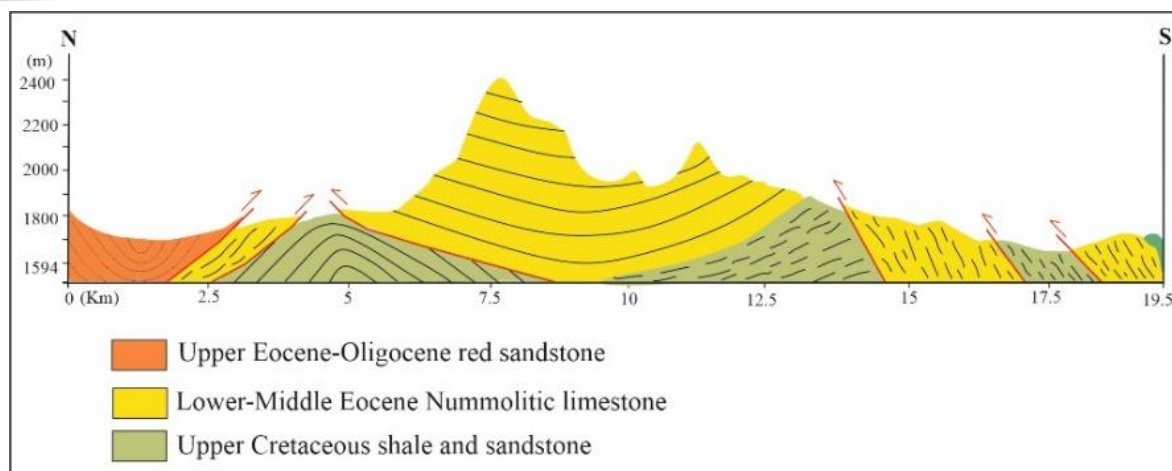
شکل ۳- a) چین برگشته با جهت میل به سمت جنوب شرق در توالی‌های اتوسن، بخش داخلی قوس ساختاری بیرجند (خط A در شکل ۲). b) چین در واحدهای شیل و ماسه‌سنگ قرمز اتوسن. c) چین برگشته در شیل منطقه چاه‌حوض با میل به سمت جنوب.

Fig. 3. a) Recumbent fold with SE vergence in the Eocene sequence, interior part of the Birjand structural arc (A in Fig. 2). b) A large fold in the Eocene red shale and sandstone units. c) Recumbent fold in the Chah-Hoz shale with S vergence.



شکل ۴-ا) تصویر ماهواره‌ای از توالی‌های راندگی (Thrust sequences) در مرز فلیش‌ها و ملانژهای کرتاسه بالایی منطقه چاه‌حوض. (ب) نیم‌رخ عرضی ترسیم شده از منطقه چاه‌حوض (خط A در شکل ۲-ا). V: جهت انتقال زمین ساختی. (ج) توالی راندگی‌ها در لیسونیت و ملانژهای منطقه چاه‌حوض. (د) صفحه گسلش راندگی در لیسونیت‌ها. (ه) خش‌لغزهای بخش جانبی برکه راندگی با مولفه حرکتی راست‌الغز. (ف) استریوگرام راندگی‌ها (خطوط قرمز) و لایه‌بندی (خطوط سیاه).

Fig. 4. a) Satellite image of thrust sequences at the boundary of the Upper Cretaceous flysch and mélanges in the Chah-Hoz area. b) Structural section from Chah-Hoz area (A in Fig. 2-a). c) Thrust sequences in listvenites and mélanges of the Chah Hoz area. d) Thrust fault plane in listvenite. e) Slickensite in the right lateral thrust sheet. f) Stereogram of thrusts (red lines) and bedding (black lines).



شکل ۵- نیمرخ عرضی ترسیم شده بر اساس داده‌های صحرایی از ساختار چین‌خورده-رانده شمال بیرجند (خط پیمایش B در شکل ۲-ا).

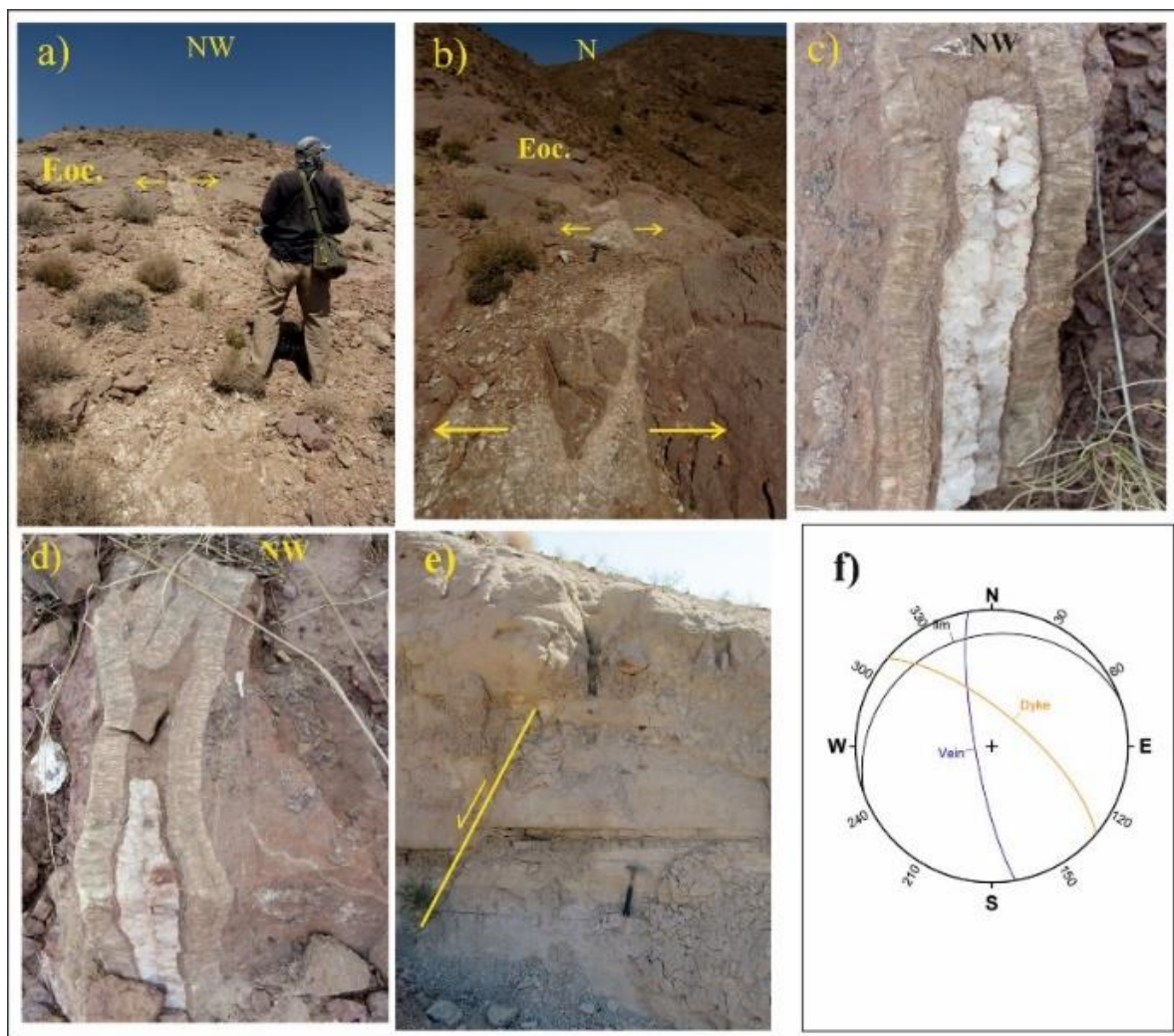
Fig.5. Structural section of the North Birjand fold-thrust belt (B in Fig. 2a)

ساختارهای مرتبط با مولفه کششی

در محدوده مورد مطالعه رگه‌های کششی مرتبط با راندگی وجود دارد که در بخش بیرونی و درونی این قوس ساختاری خمیده جهت‌یابی نموده‌اند (شکل ۶-ا و ب). در منطقه چاه‌حوض این رگه‌ها که از نوع Syntaxial ساده و مرکب هستند، در ملانژها و لیسونیت‌ها وجود دارند (شکل ۶-ج و د). در قوس داخلی ساختار خمیده شمال بیرجند نیز رگه‌ها و شکستگی‌های کششی متعدد در ابعاد بسیار متفاوت با طول و عرض سانتی‌متری تا چندین ده‌متری در توالی‌های رسوبی آهک و ماسه‌سنگ ائوسن وجود دارند. وجود گسلش نرمال در توالی آهک و مارن پالئوسن-ائوسن همراه پهنه‌های راندگی در این

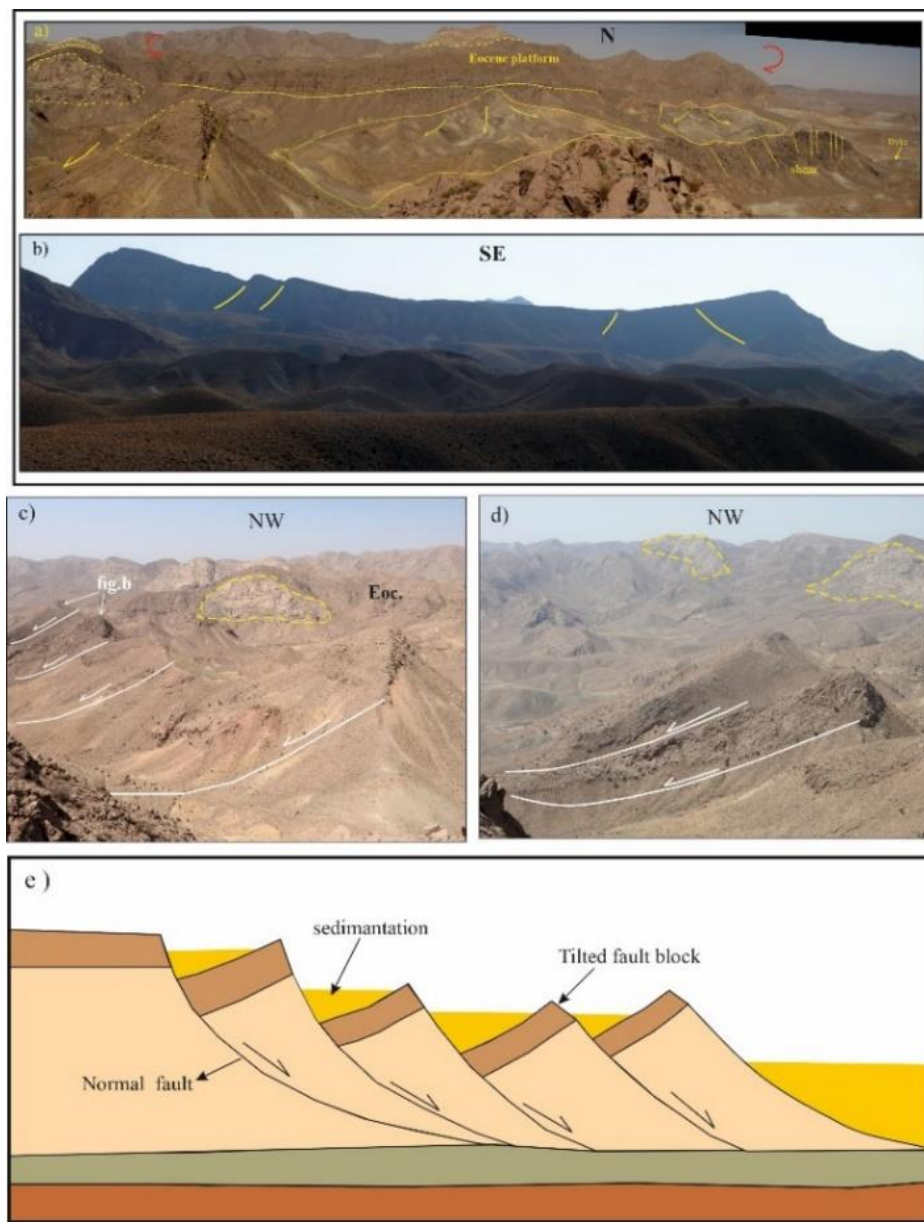
محدوده نیز تأییدی بر حاکم بودن رژیم کششی طی

رخداد دگرشکلی پیشرونده است (شکل ۶-ه). ساختارهای لغزشی بزرگ مقیاسی نیز در توالی‌های مارن، شیل، ماسه‌سنگ و آهک ائوسن شمال بیرجند وجود دارد و تورق‌های برشی نافذ، ساختارهای خمیده قوسی شکل را قطع نموده است (شکل ۷-ا). وجود ساختارهای ناوگون خمیده بزرگ از دیگر ساختارهای رایج در بخش داخلی این قوس چین‌خورده-رانده است (شکل ۷-ب). علاوه بر این، گسلش نرمال بزرگ مقیاس به صورت بلوک‌های سرخرده متوالی (شکل ۷-ج تا e) در بخش داخلی این ساختاری خمیده، وجود دارد.



شکل ۶- a و b) شکستگی‌های کششی سیلیسی در پلتفرم کربناته شمال بیرجند. c و d) رگه‌های کششی syntaxial در منطقه چاه‌حوض. e) گسلش نرمال در آهک و مارن‌های شمال بیرجند. f) استریوگرام توزیع دایک‌ها و شکستگی‌های کششی در محدوده نیمرخ صحرائی B در شکل ۲.

Fig. 6. a, b) Silica-filled tensile fractures with north-south extension in the carbonate platform of North Birjand. c) Normal faulting in the Paleocene-Eocene limestone and marl in North Birjand. d) Stereogram of the dykes and tensile fractures in B profile of Figure 2.

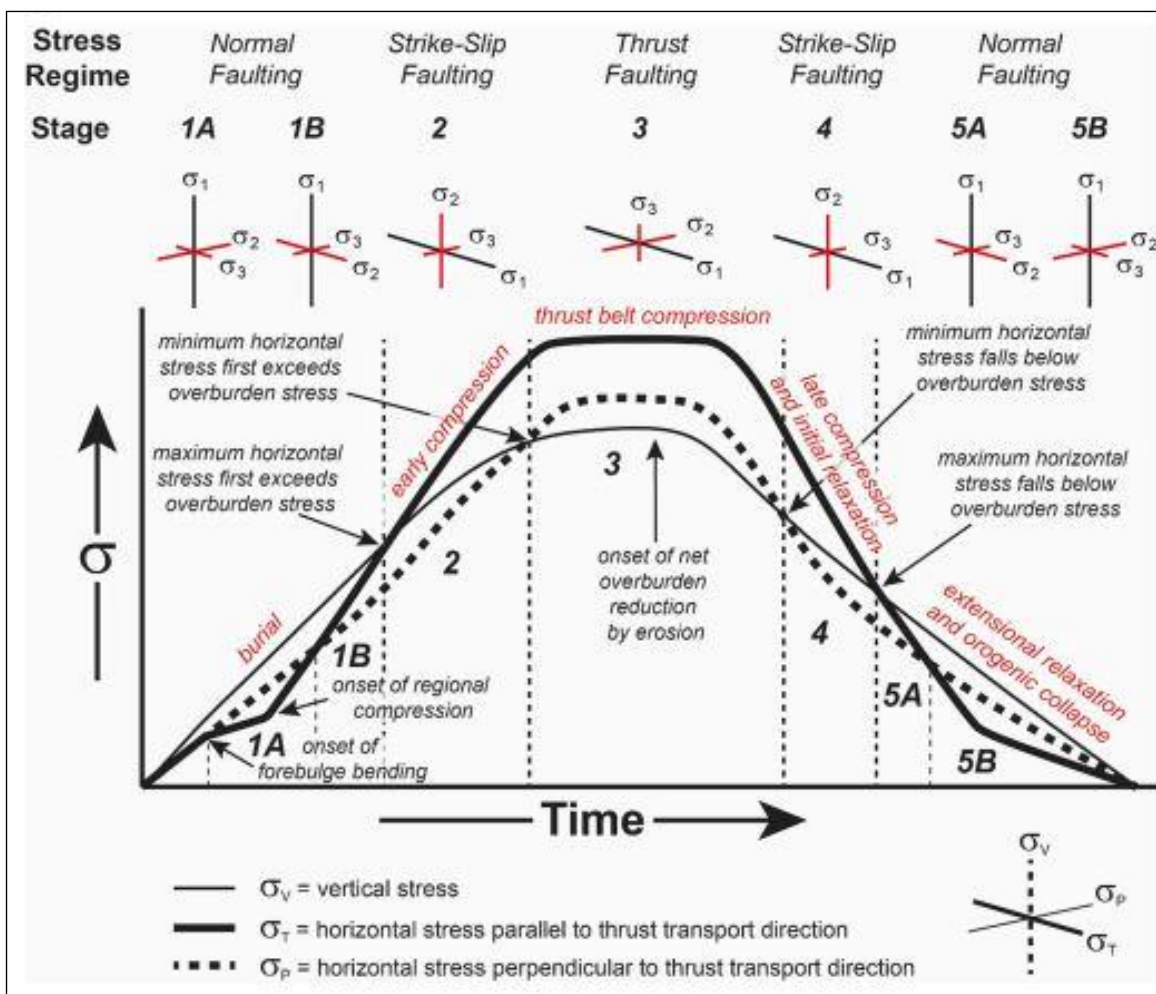


شکل ۷-ا) عکس صحرایی پانوراما از ساختارها و رخساره‌های ریزشی، گسلش نرمال، تورق‌های برشی و دایک آذرین بریده شده توسط گسل‌های امتدادلغز در شمال بیرجند. پیکان‌های قرمز رنگ راستای خم‌شدگی ناحیه‌ای در پلتفرم کربناته ائوسن را نشان می‌دهند. (ب) عکس صحرایی پانوراما از ناو فرم بزرگ حاصل از خمش پلتفرم ائوسن. (ج و د) توالی بلوک‌های گوه‌ای کج شده حاصل گسل نرمال در رخساره‌های آهک نومولیتی-آلوئولین دار ائوسن. دو ساختار نشان داده شده در شکل ج، در شکل د بزرگنمایی شده است. (ه) تصویر شماتیک از توالی بلوک‌های گوه‌ای شکل کج شده و لغزیده حاصل از گسلش نرمال. تصاویر مربوط به نیمرخ B در شکل ۲-ا هستند.

Fig.7. a) Panoramic field photo of the sliding facies, normal faulting, shear cleavage, and dyke cut by strike-slip faults in the north of Birjand. Red arrows point to regional buckling in the Eocene carbonate platform. b) Panoramic photo of a large synform in the Eocene platform. c, d) The sequence of tilted blocks resulting from normal faulting in the Eocene nummulitic-alveolina limestone. Enlarged tilted blocks of Figure c. e) Schematic picture of tilted blocks resulting from normal faulting. The images were taken along the B profile in Fig. 2a.

چین خورده-رانده و نواحی فورلند ایجاد شوند (Ferrill et al., 2021). به نظر می‌رسد ساختارهای مورد مطالعه در این کمربند چین خورده-رانده متأثر از چنین فرآیندهایی تشکیل شده باشند.

مطالعات نشان داده است که در طی مراحل زمانی مختلف تکامل یک کمربند چین-رانده، ساختارها می‌توانند به صورت یک توالی پیشرونده طی پنج مرحله (شکل ۸) در طی فعالیت یک کمربند



شکل ۸. نمودار تنش-زمان برای رخداد انواع رژیم‌های دگرشکلی پیشرونده (طی پنج مرحله) مرتبط با تکامل تدریجی یک کمربند چین خورده-رانده (Ferrill et al., 2021).

Fig. 8. Stress-time diagrams for the occurrence of various types of progressive deformation regimes (during five stages) related to the gradual evolution of a fold-thrust belt (Ferrill et al., 2021).

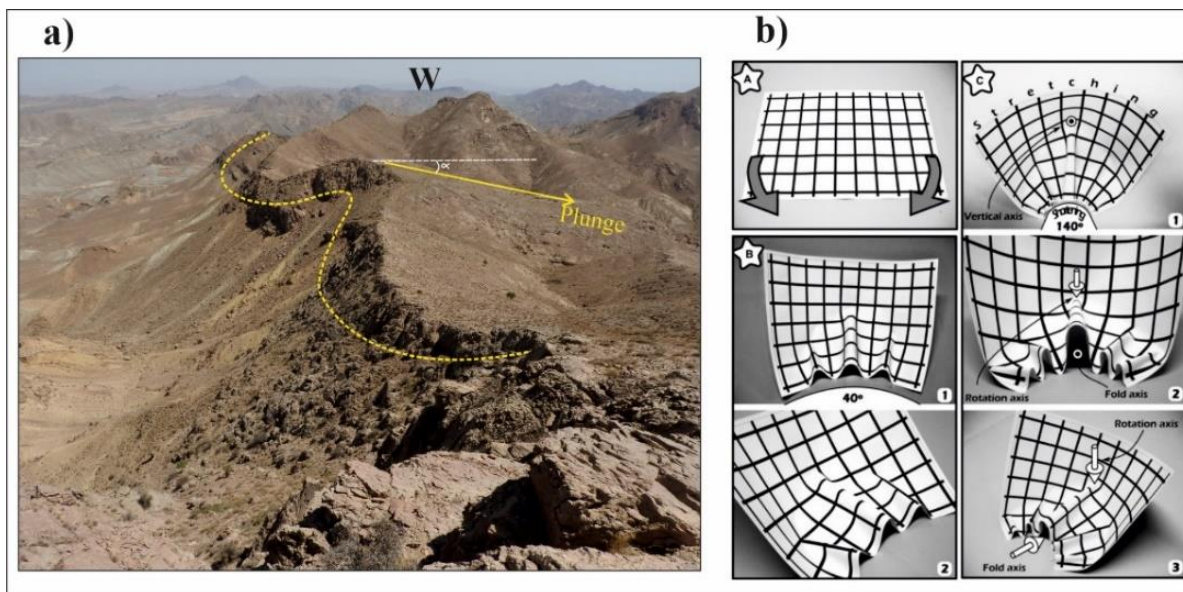
داخلی مرز خمیده پهنه‌های لوت و سیستان وجود دارد. ساختارهای کششی عمدتاً در بخش بیرونی قوس و ساختارهای فشارشی در بخش درونی این

ساختارهای مرتبط با مولفه فشارشی ساختارهای متنوعی متعلق به هر سه مولفه فشارشی، کششی و امتدادلغز در بخش بیرونی و

(شکل ۹-ا). چنین ساختارهایی به خوبی در قوس Cantabrian واقع در کمربند واریسکن اروپا مطالعه و مدل سازی شده است (Pastor Galána et al., 2012) (شکل ۹-ب).

کوهزادهای هلالی شکل مکان مناسبی برای تشکیل چین‌های مخروطی (Conical folds) است زیرا دگرشکلی اولیه همراه با چرخش حول یک محور قائم انجام می‌شود. جهت‌یابی هندسی چین‌های مخروطی در بخش‌های مختلف قوس داخلی و خارجی یک کوهزاد خم شده، متفاوت است به طوری که به صورت یکسری چین‌های مخروطی ناوشکل و ناق شکل در بخش‌های مختلف آن قابل مشاهده‌اند (Pastor-Galan et al., 2012). این چین‌ها از قوس بیرونی به سمت هسته مرکزی کوهزاد (قوس درونی) به صورت همگرای رو به مرکز جهت‌یابی می‌نمایند و معمولاً توسط دو نوع چین مختلف شناسایی می‌شوند (Pastor-Galan et al., 2012): (۱) چین‌هایی که به موازات رخنمون‌های اصلی راندگی‌ها تشکیل شده‌اند و شکل آنها نعل اسبی (Horse-shoe) است. (۲) چین‌هایی که به صورت مخروطی و شعاعی (Radial) نسبت به قوس خمیده قرار گرفته‌اند. از مهم‌ترین عوامل موثر در تشکیل این نوع چین‌های غیرسیلندری، می‌توان به اختلاف رئولوژی، ضخامت واحدها و شدت و مدت زمان تأثیر تنش‌های موثر افقی اشاره کرد.

قوس گسترش یافته‌اند. چنین ساختارهای متنوعی بیانگر رخداد دگرشکلی ناحیه‌ای پیشرونده توأم با تکامل این کمربند چین‌خورده-رانده است که در سایر مناطق مشابه دنیا نیز مطالعه شده‌اند (Tavani et al., 2015). آنچه در خصوص این ساختارها قابل توجه است، وجود ساختارهای فشارشی-کششی-امتدادلغز توأم با رخداد دگرشکلی ناحیه‌ای پیشرونده است. همراهی این ساختارها با همدیگر مشابه تحولات کوهزادهای خمشی در سایر مناطق دنیا است (Ferrill et al., 2021). در بخش مرکزی قوس ساختاری بیرجند پهنه‌های راندگی و چین‌های برگشته وجود دارد که در مرز افیولیت‌ملازهای کرتاسه با پلتفرم کربناته ائوسن به خوبی رخنمون دارند. دو نسل متفاوت چین‌خوردگی در محدوده مورد مطالعه وجود دارد: نسل اول، چین‌خوردگی‌های موازی با رخنمون راندگی‌های اصلی (اکثراً سیلندری) و با شکل خمیده که به سمت جنوب‌شرق تقعر دارند (Yaghoobi and Bagheri, 2020). نسل دوم، چین‌های با راستای سطح‌محوری شمال‌غربی که جهت‌یابی شعاعی دارند و از نوع مخروطی هستند (Bagheri and Damani Gol, 2020). این نسل چین‌ها، در داخل قوس ساختاری (در ناحیه فورلند قدیمی) قرار دارند و منجر به برخاستگی توالی‌های زمین‌شناسی شده است. به طوری که جهت میل محور این چین‌های شعاعی به سمت شمال-شمال شرق است



شکل ۹- a) چین‌های شعاعی (مخروطی) در بخش داخلی پلتفرم ائوسن شمال بیرجند (خط پیمایش B در شکل ۲) با میل محوری به سمت شمال. b) مدل تجربی نحوه تشکیل چین‌های شعاعی مخروطی در قوس داخلی خمش با زوایای بین یالی ۴۰ و ۱۴۰ درجه (Pastor Galan et al., 2012).

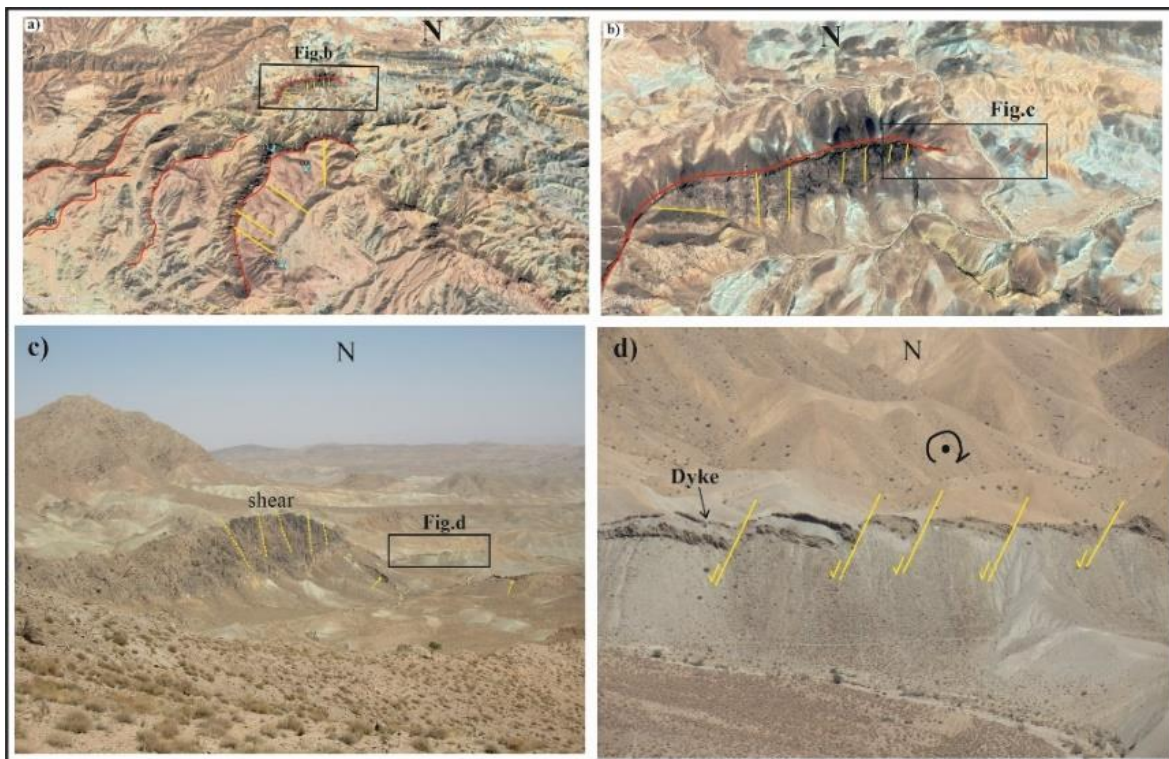
Fig. 9. a) Radial (conical) folds in the inner part of the Eocene platform in the north of Birjand (B in Fig. 2) with northward plunge. b) Experimental model of radial (conical) folds in the inner arc buckling with 40° and 140° inter limb angles (Pastor-Galan et al., 2012).

۱۱-d) با ساختارهای کششی نظیر بودیناژ (شکل ۱۱-a و ۱۱-b) و گسل امتدادلغز که رگه‌های کششی را بریده و به صورت چپ‌گرد جابجا نموده است، اشاره کرد (شکل ۱۱-e). در استریوگرام شکل ۱۱-f ارتباط این ساختارها با هم نشان داده شده‌اند. همانطور که ملاحظه می‌شود لایه‌بندی و راندگی‌ها امتداد شمال شرقی و شیب به سمت شمال غرب دارند.

در توالی‌های شیل و ماسه‌سنگ این بخش از منطقه، ساختار دوپلکس بزرگ مقیاسی وجود دارد که جهت حرکت راندگی از شرق به سمت غرب را نشان می‌دهد (شکل ۱۲-a و ۱۲-b). وجود چین‌های فشرده تنگ و ریزچین‌های جناغی و جعبه‌ای متأثر از

در مجاورت این چین‌ها تورق‌های برشی در مقیاس‌های بزرگ تا کوچک وجود دارد (شکل ۱۰). همچنین گسل‌های امتدادلغز متعددی در داخل قوس بیرجند سایر ساختارها نظیر دایک‌ها را بریده و جابجا نموده‌اند که یک چرخش ساعت‌گرد را نشان می‌دهند (شکل ۱۰). از مهم‌ترین ساختارهای مرتبط با مولفه تنش فشارشی در این قوس ساختاری، وجود گسلش راندگی در مقیاس‌های مختلف، ساختارهای دوپلکس و چین‌های برگشته است که در شکل ۱۱ نشان داده شده است. نکته قابل توجه در این محدوده همراهی انواع ساختارهای مختلف است که می‌توان به ریزگسل راندگی، چین‌های برگشته مزوسکپی (شکل ۱۱-a تا

راندگی، از دیگر مشخصات ساختارهای این محدوده است (شکل ۱۲- c).



شکل ۱۰- a) تصویر ماهواره‌ای از ساختارهای خمیده و چین‌خورده (خطوط قرمز)، و تورق‌های برشی نافذ (خطوط زرد). b) تصویر ماهواره‌ای بزرگنمایی شده شکل a که ساختار خمیده و تورق‌های برشی را نشان می‌دهند. کادر سیاه رنگ در شکل c بزرگنمایی شده است. c) عکس صحرایی از ساختار برشی شکل b. کادر روی تصویر یک دایک دگرشکل شده است که در شکل d بزرگنمایی شده است. d) دایک قطع شده توسط گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد که جابجایی توام با چرخش ساعت‌گرد را نشان می‌دهند.

Fig. 10. a) Satellite image of bent and fold structures (red lines) and shear cleavage (yellow lines). b) The enlarged satellite image of Figure a showing the bent and sheared structure. The box is enlarged in Figure c. c) Field photo of structures of Figure b. The box shows a deformed dyke enlarged in Fig. d. d) Deformed dyke cut by sinistral strike-slip faults and clockwise rotation.

دگرشکل شده تحت تأثیر تنش طولی مماسی نشان داده می‌شوند به طوری که منجر به رخداد کشش در قوس بیرونی و فشارش و ضخیم‌شدگی در قوس درونی خواهد شد (Weil et al., 2013) (شکل ۱۳- a). این تنش می‌تواند به صورت رشد و توسعه کلیواژ-ها، گسترش شکاف‌ها و انتشارهای گسلی اصلی ظاهر شود (Ramsay and Huber, 1987). در شکل ۱۳- b،

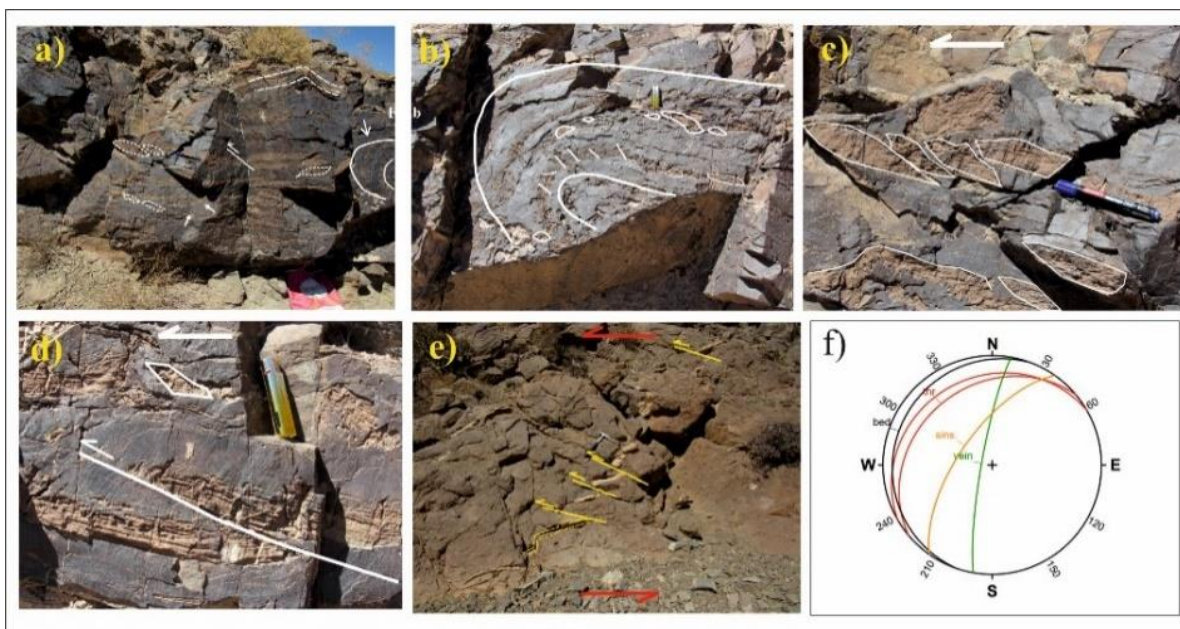
ساختارهای مرتبط با مولفه امتدادلغز

در کمربندهای چین‌خورده-رانده و کوهزادهای خمیده، همزمان با تکامل تدریجی برگه‌های راندگی، با تغییر رژیم تنش محلی ساختارهای مرتبط با مولفه‌های تنش برشی نیز می‌توانند به وجود آیند (Ferrill et al., 2021). مکانیزم‌های چین‌خوردگی به صورت تنش داخلی در دوایر تنش در یک لایه

در نظر گرفت. از طرفی بیضوی‌ها قائم را می‌توان معادل چین‌های شعاعی و خمش‌های نوافرم و تاق‌فرم ناحیه‌ای جنوب بیرجند دانست. هر چه اعمال تنش بیشتر شود به دلیل اینکه خمش به حداکثر کوتاه‌شدگی خود رسیده است در پیشانی و در محدوده کوتاه‌شده، برش‌های مزدوج تشکیل می‌شود. در سرتاسر مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت-سیستان می‌توان این گسل‌های مزدوج را مشاهده نمود که سایر ساختارها را بریده و جابجا نموده‌اند (به عنوان مثال در مناطق ماهیرود آهنگران، سه‌چنگی و موسویه).

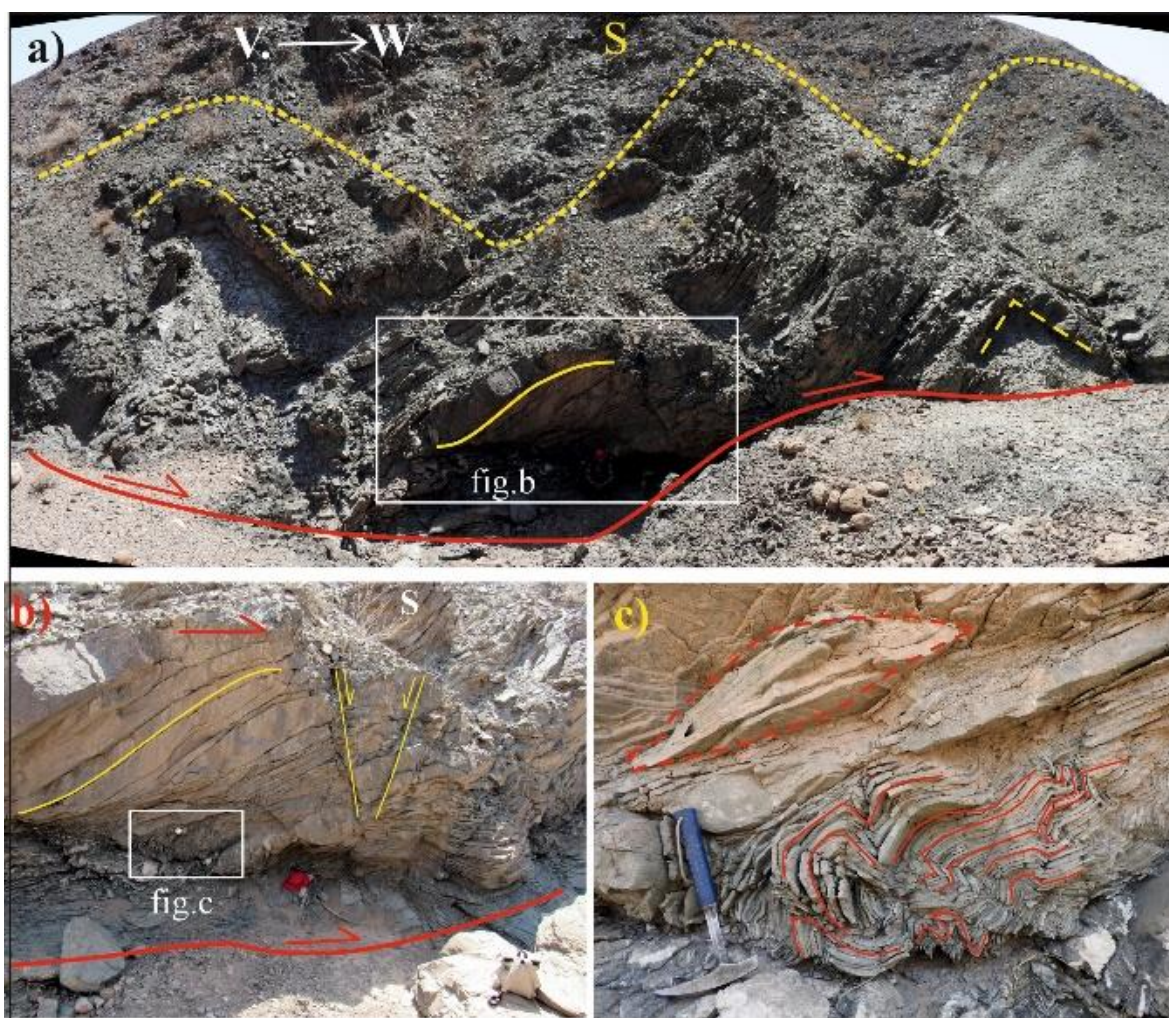
تورق‌ها در منطقه کشش افقی و در منطقه کوتاه‌شده شعاعی هستند در صورتی که در شکل ۱۳- c، شکاف-ها در منطقه کشش حالت شعاعی و در منطقه کوتاه‌شده افقی می‌باشند. در شکل ۱۳- d، در منطقه کشش و کوتاه شده در اثر حداکثر اعمال تنش، شکستگی-های مزدوجی تشکیل شده است که بسیار مشابه قوس ساختاری بیرجند است به طوری که یک لغزش خمشی که با برش‌هایی نیز همراه می‌باشد، به وقوع پیوسته است (شکل ۱۳- e).

در ساختار قوسی چین‌خورده-رانده شمال بیرجند، بیضوی‌های افقی را می‌توان همان چین‌های موازی در پهنه شوشود، منطقه خوسف و سه‌چنگی



شکل ۱۱- ساختارهای چین‌خورده-رانده در قوس ساختاری شمال بیرجند. (a و b) راندگی، چین برگشته و بودیناژ که در شکل‌های c و d بزرگنمایی شده‌اند. (c) ریزساختارهای هم‌آغوش با جهت برش چپگرد. (d) راندگی با شیب به سمت شمال غرب. (e) رگه کششی سیلیسی که توسط گسل‌های برشی چپگرد جابجا شده است. (f) استریوگرام نشان‌دهنده وضعیت ساختارها در شکل‌های a تا e.

Fig.11. Fold-thrust structures in the structural arc of North Birjand. a and b) Thrust, recumbent fold and boudinage enlarged Figures c and d. c) Duplex structures with sinistral shear sense. d) Mesoscale thrust with NW dip. e) Silicic tensile vein cut by sinistral faulting. f) Stereogram of structures shown in Figures a to e.

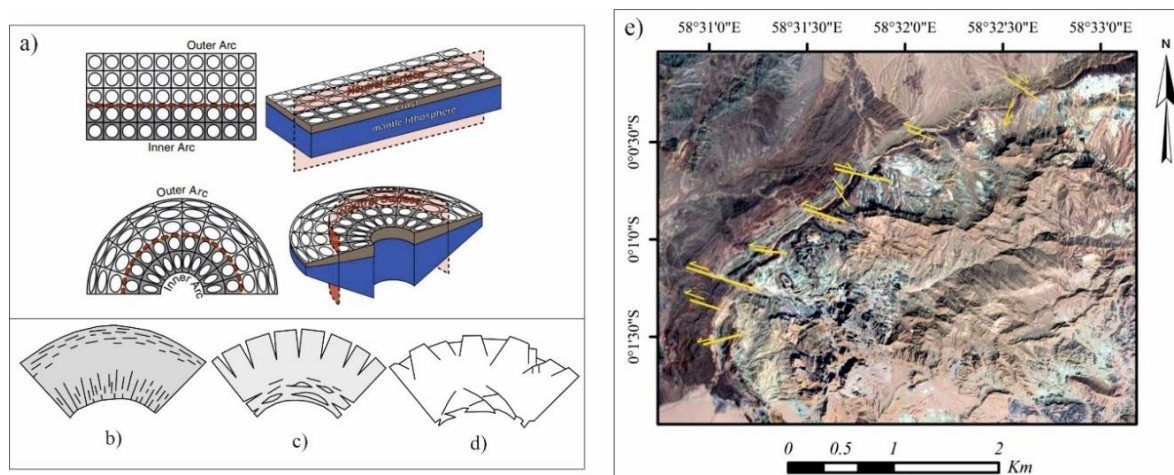


شکل ۱۲- a) ساختار چین‌خورده-رانده در توالی آهک، شیل و ماسه‌سنگ ائوسن شمال بیرجند. b) تصویر بزرگنمایی شده از ساختار اسب (horse)، گسل نرمال و ریزچین‌های قاعده توالی رسوبی. c) ریزچین‌های جعبه‌ای و جناغی در شیل‌های قاعده راندگی. V: جهت انتقال عمومی زمین‌ساختی.

Fig.12. a) fold-thrust structure in the shale, sandstone and limestone sequences in the North Birjand area. b) The enlarged horse structure, normal faulting and microfolds. c) Box and chevron folds in the shales at the base of thrust sheet. V: tectonic vergence.

مزدوج اندازه‌گیری شده در منطقه سه‌چنگی (Keshtgar et al., 2021) نیز در شکل ۱۴-b نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود روند و مشخصات این گسل‌ها و جهت‌یابی محورهای اصلی تنش در این مناطق مشابه همدیگر است.

در شرق ایران و در محدوده مورد مطالعه گسل‌های با روند NE جابه‌جایی راست‌الغز و گسل‌هایی با روند NW جابه‌جایی چپ‌الغز قابل ملاحظه‌ای را نشان می‌دهند. استریوگرام جهت‌یابی گسل‌های مزدوج در منطقه مورد مطالعه در شکل ۱۴-a نشان داده شده است. به منظور انجام مقایسه، استریوگرام گسل‌های



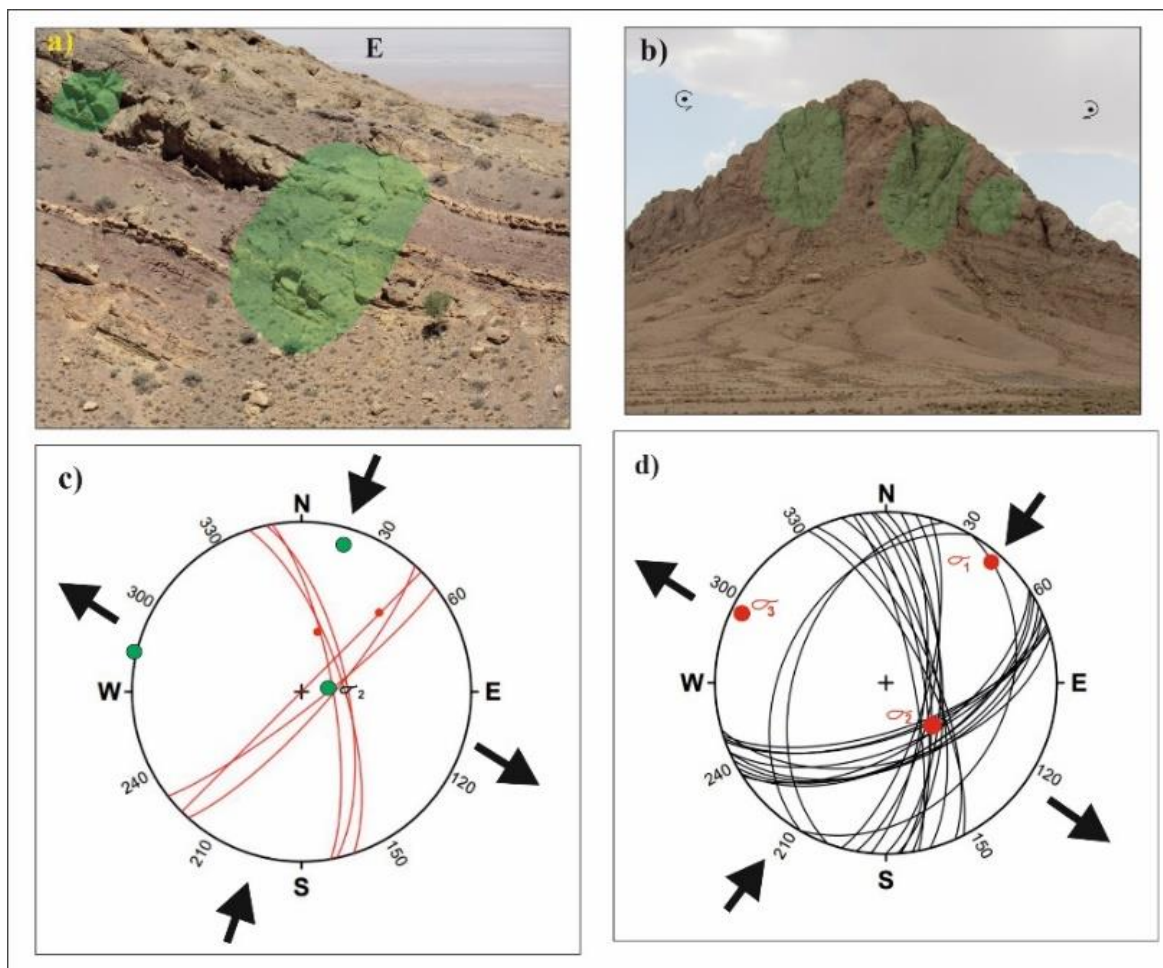
شکل ۱۳- (a) توزیع بیضوی واتنش در قوس بیرونی و درونی حاصل خمش در پوسته و قاعده لیتوسفر (Weil et al., 2013). (b) نمایش توزیع کرنش به شکل توسعه کلیواژها. (c) بازشدگی شکافها. (d) ایجاد شکستگی‌های مزدوج (Ramsay and Huber, 1987). (e) تصویر ماهواره‌ای گسل‌های مزدوج برشی در پیشانی قوس ساختاری بیرجند.

Fig.13. a) Stress ellipsoid distribution in the outer and inner arc resulting from buckling in the crust and base of the lithosphere (Weil et al., 2013). b) Strain distribution with development of cleavages. c) Opening cracks. d) Conjugate fractures (Ramsay and Huber, 1987). e) Satellite image of conjugate faults in the North Birjand structural arc.

ساختارهای محدوده خوسف

و تحت تأثیر حادثه دوم دگرشکلی قرار نگرفته‌اند (شکل ۱۵). چنانچه ساختارهای ناحیه‌ای شرق ایران از جمله قوس ساختاری بیرجند به حالت قبل از دگرشکلی برگردانده شود، در واقع چین‌های موازی نسل اول، روند شرقی-غربی خواهند داشت که با راستای تنش فشارشی ناشی از فرورانش رو به شمال نئوتتیس در کرتاسه بالایی مطابقت دارد. چین‌های موازی اکثراً در قوس بیرونی (نظیر پهنه‌های شوشود و خوسف) و چین‌های شعاعی در قوس داخلی و در راستای محور خمش وجود دارند.

در یال غربی ساختار قوسی شمال بیرجند در منطقه خوسف چین‌های موازی متعددی در سنگ‌آهک‌های پالئوسن-ائوسن رخنمون دارند که با اثر محوری شمال شرقی-شمالی، به موازات لبه شمال شرقی بلوک لوت جهت‌یابی نموده‌اند. وجود چین‌های برهم نهاده نسل دوم با اثر محوری شمال غربی در توالی‌های ائوسن میانی-الیگوسن میانی شرق ایران، بیانگر این است که برخی از چین‌های موازی به دلیل قرار گرفتن در یال‌های ابرچین‌ها دچار چرخش شده



شکل ۱۴- (a) گسل‌های مزدوج (محدوده‌های سبز رنگ) در توالی ماسه‌سنگ و آهک ائوسن شمال بیرجند. (b) گسل‌های مزدوج (محدوده‌های سبز رنگ) در آهک‌های ائوسن خوسف. (c) استریوگرام گسل‌های مزدوج و موقعیت محورهای اصلی تنش در توالی ائوسن بیرجند. (d) استریوگرام گسل‌های مزدوج و موقعیت محورهای اصلی تنش در منطقه سه‌چنگی (Keshtgar et al., 2021) به منظور مقایسه با شکل c.

Fig.14. a) Conjugate faults (green areas) in the Eocene sandstone and limestone sequence, north of Birjand. b) Conjugate faults in the Khusf Eocene limestones. c) Stereogram of conjugate faults and stress axes in Birjand Eocene sequence. d) Stereogram of conjugate faults and main stress axes in the area of Sechengi area (Keshtgar et al., 2021) in order to compare with Figure c.

طبق نظر خطیب (Khatib, 1999)، پایانه‌های

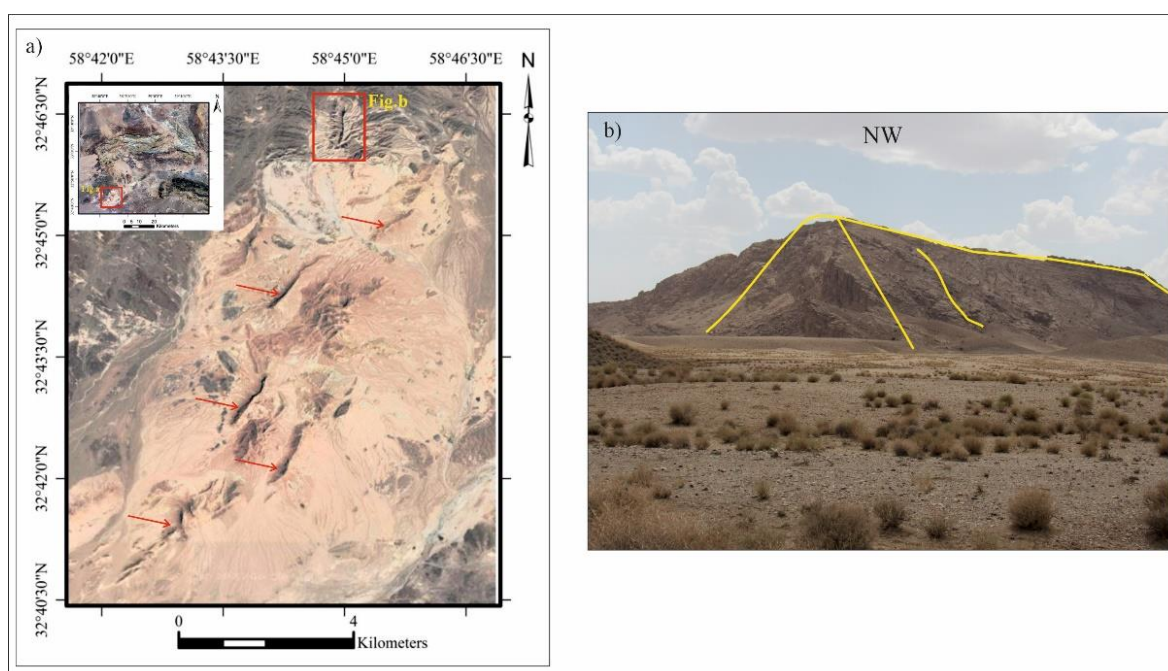
بحث

گسل‌های امتدادلغز شرق ایران علت خمش و چین-خوردگی هستند به طوری که وجود سیستم گسلی نه‌بندان در مرز پهنه‌های ساختاری سیستان و لوت موجب دگرشکلی شدید واحدهای سنگی در حاشیه و درون ایالت ساختاری سیستان شده است. هندسه

تا کنون در مورد نحوه ایجاد و تکامل ساختارهای خمیده پهنه‌های لوت و سیستان نظریات و فرضیه‌های متفاوتی عنوان شده است که در ذیل به اختصار مورد بررسی قرار می‌گیرند.

آن بررسی نشده و قابل توجیه نیست. همچنین ارتباط سنی پایانه‌های گسل با ساختارهای اشاره شده و با توزیع چین‌خوردگی‌های مجدد و گسل‌های مزدوج شرق ایران تحلیل نشده است.

پایانه گسل‌های امتدادلغز در پوسته قاره‌ای بیشتر به صورت اریب‌های فرعی هستند که طی چند مرحله می‌تواند تشکیل شوند. در سیستم گسلی نه‌بندان سه اریب قانات، بیرجند و سهل‌آباد برای پایانه شمالی تشخیص داده شده است. طبق این نظریه، قوس ساختاری بیرجند و منشأ ساختار قوسی شکل شمال



شکل ۱۵- a) چین‌های یال غربی قوس شمال بیرجند (علامت پیکان) در منطقه خوسف. کادر قرمز رنگ در شکل b نشان داده شده است. b) تصویر صحرایی از یک چین موازی با لبه شمال شرقی بلوک لوت واقع در غرب خوسف.

Fig.15. a) Satellite image of fold orientation in western limb of the North Birjand arc in the Khusf area. b) A fold parallel to the northeastern border of the Lut block in western Khusf area.

از انشعاباتش است، گسل اصلی انشعاباتش را قطع نموده است و پایانه‌ها از آن منشعب نشده‌اند. همچنین چین‌های خمشی اغلب در میان یک زوج گسل مزدوج ظاهر می‌شوند و نمی‌تواند متأثر از گسل‌های پلکانی باشد. از طرف دیگر تمامی گسل‌های درون پهنه سیستان حالت واگرا دارند که

در مدل رشیدی و همکاران (Rashidi et al., 2023)، ساختار قوسی شمال بیرجند به عنوان یکی از انشعابات پایانه گسلی راستالغز نه‌بندان تحت عنوان پایانه گسلی خوسف معرفی شده است که تحت تأثیر مکانیسم ترافشارشی تشکیل گردیده است. این مدل ابهاماتی دارد از جمله اینکه سن گسل اصلی جوان‌تر

مدل تکامل زمین ساختی

در حاشیه شمال شرقی بلوک لوت، قوس‌های ساختاری با تحدب به سمت شمال شرق وجود دارند که حرکت رو به شمال داشته‌اند. هر یک از این قوس‌ها به صورت مستقل اما مرتبط با یکدیگر توسط گسل‌های جداکننده خود در مسیری منحنی شکل حول یک محور قائم در خلاف جهت عقربه‌های ساعت چرخیده‌اند. این رخداد باعث شده است که قوس‌ها به صورت تیغه‌هایی به درون پهنه لوت وارد شوند و بنابراین با جابه‌جایی وسیع و مکرر بین دو پهنه جوش خورده سیستان و بلوک لوت همراه بوده‌اند (Bagheri and Damani Gol, 2020). در پی حرکت فراری رو به غرب بلوک افغان در حادثه برخورد هند و آسیا در ائوسن، بلوک لوت دچار چرخش خلاف جهت عقربه‌های ساعت گردیده و اصطکاک شدید پهنه جوش خورده سیستان با لوت توانسته تراشه‌هایی از لبه لوت و سنگ‌های مربوط به گوه‌های افزایشی پهنه جوش خورده را بریده و به سمت شمال جابه‌جا نماید. به نظر می‌رسد که پلاتفرم کربناته ائوسن در نتیجه خمش، در ابتدا متحمل چین‌های موازی و راندگی شده است و با تداوم کوتاه‌شدگی در راستای شمالی- جنوبی همراه است (Yaghobi and Bagheri, 2020). در مرحله دوم دگرشکلی پیشرونده، لایه‌ها دچار خمش شده و تشکیل قوس آغاز می‌شود که در این مرحله، چین‌های شعاعی ظاهر می‌شوند (شکل ۱۶). پس از آن که قوس به نهایت خمش و کوتاه‌شدگی رسید امکان فشردگی دیگر وجود ندارد و قوس در محل پیشانی خود به

متأثر از چین‌های پارازیتی و تورق‌های سطح محوری عظیم و فراگیر ناشی از یک خمش عظیم هستند (نظیر ابرناودیس شکنجی سازند نسفنده در منطقه بندان). علاوه بر این، بر اساس یافته‌های پژوهش‌های اخیر حرکت راندگی‌ها و انتقال زمین‌ساختی در مرز خمیده ساختاری بین لوت و سیستان (مناطق آهنگران-موسویه-سه‌چنگی)، حالت رو به مرکز (به سمت درون پهنه سیستان) دارند در حالی که در انشعابات گسلی ذکر شده، بایستی حرکت راندگی‌ها رو به بیرون (واگرا) باشد.

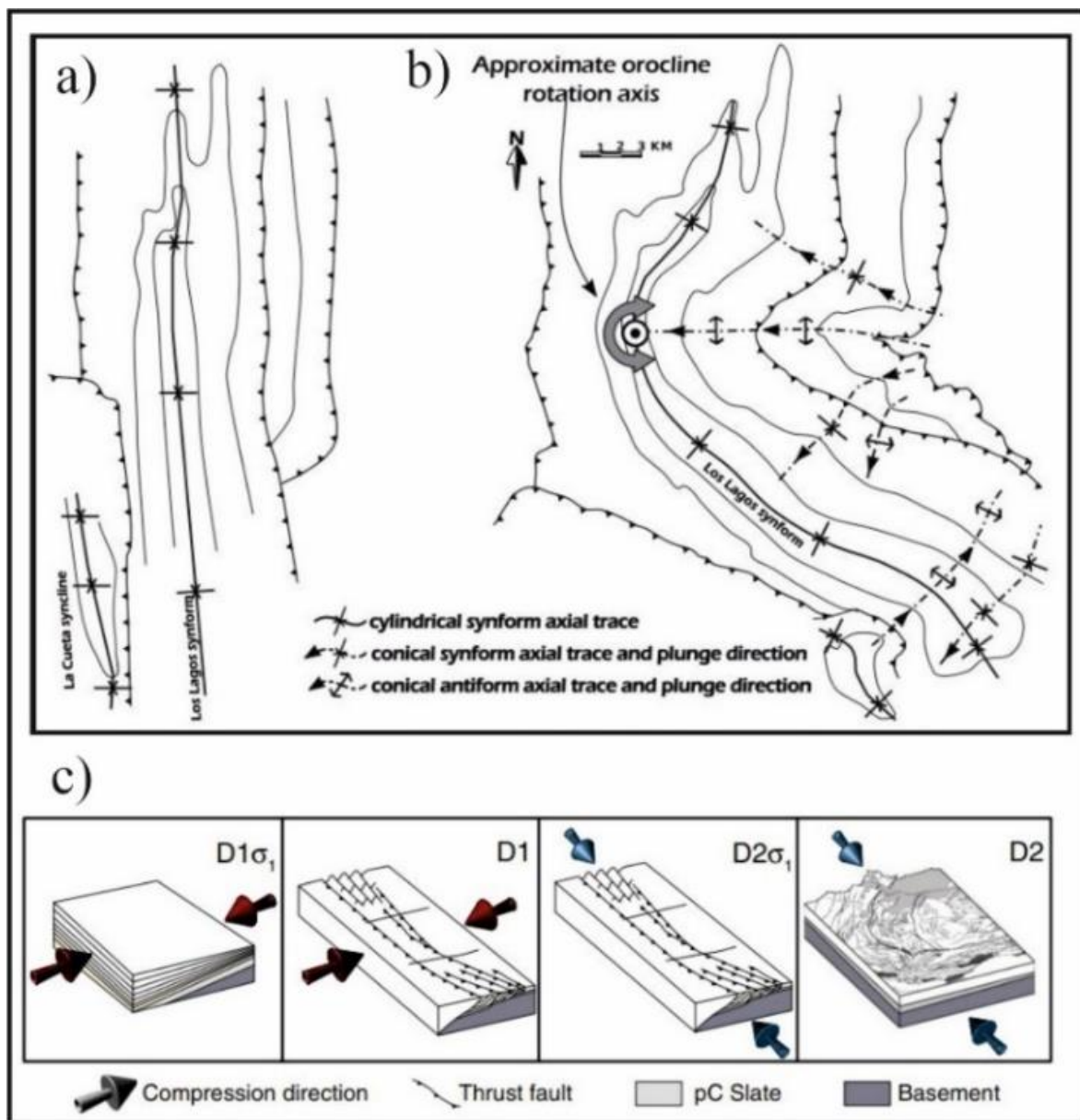
در مدل پیشنهاد شده دیگر (Bagheri and Damani Gol, 2020)، خمش (Buckling) کمربند چین- راندگی شمال بیرجند علت شکل‌گیری قوس ساختاری بوده است که مشابه مدل اوروکلاین پیشرونده است (Johnston et al., 2013; Pastor-Galána et al., 2012). در این مدل، رخداد چندین مرحله دگرریختی پیشرونده در پهنه سیستان به عنوان قوس داخلی خمش (ناحیه فورلند)، سبب ایجاد تورق‌های برشی فراگیر، دو نسل راندگی، چین‌خوردگی‌های بزرگ مقیاس از نوع موازی و شعاعی (مخروطی)، گسلش راندگی، گسلش نرمال و گسلش امتدادلغز در قوس درونی و بیرونی در فلیش‌ها و افیولیت‌ملازهای کرتاسه و توالی‌های پالئوژن شده است. همچنین ماگماتیسیم و ولکانیسم مرتبط با این نوع خمش لیتوسفری در بخش داخلی و بیرونی قوس تحلیل شده است. این مدل با نوع و جهت‌یابی ساختارهای منطقه مورد مطالعه سازگاری بیشتری دارد.

به تشکیل چین‌های هم‌شیب فشرده و تنگ (Tight) و کلیواژهای سطح محوری مرتبط (S1) هستند که خمیدگی پیدا کرده‌اند (به عنوان مثال در فلیش‌های کمپلکس خاش در بلوچستان). این چین‌ها با تمایل به سمت جنوب همراه با راندگی‌هایی هستند که به سمت شمال خمیدگی نشان می‌دهند. به عنوان مثال در اطراف گرانیب زاهدان، سنگ‌های دگرگونی به شدت دگرشکل شده بر روی توالی‌های غیر دگرگونی رانده شده‌اند. فرورانش رو به شمال نئوتتیس به زیر بلوک‌های لوت-افغان عامل اصلی کوتاه‌شدگی در راستای شمالی-جنوبی بوده است. رخداد راندگی‌ها در زمان ائوسن میانی در پهنه سیستان فراگیر است و چین‌های هم‌شیب تنگ ائوسن میانی-بالایی در توالی‌های آتشفشانی-رسوبی قرمز و سبزرنگ بخش شمالی مرز لوت و سیستان نظیر کمر بند نابرجای قائن به خوبی گسترش یافته‌اند.

حادثه دوم دگرشکلی که اواخر پالئوژن در جهت شرقی-غربی رخ داده است، منجر به خمیدگی ساختارهای قبلی از جمله سطح محوری چین‌های نسل اول (که راستای سطح محوری شرقی-غربی داشته‌اند) شده و راستای جدید شمال غربی پیدا نموده‌اند (F2). همچنین پله (Ramp) راندگی‌های حادثه اول (با امتداد شرقی-غربی) مجدداً فعال شده و جهت‌یابی جدید NNW پیدا نمودند که جهت انتقال تکتونیکی به سمت SSE نشان می‌دهند.

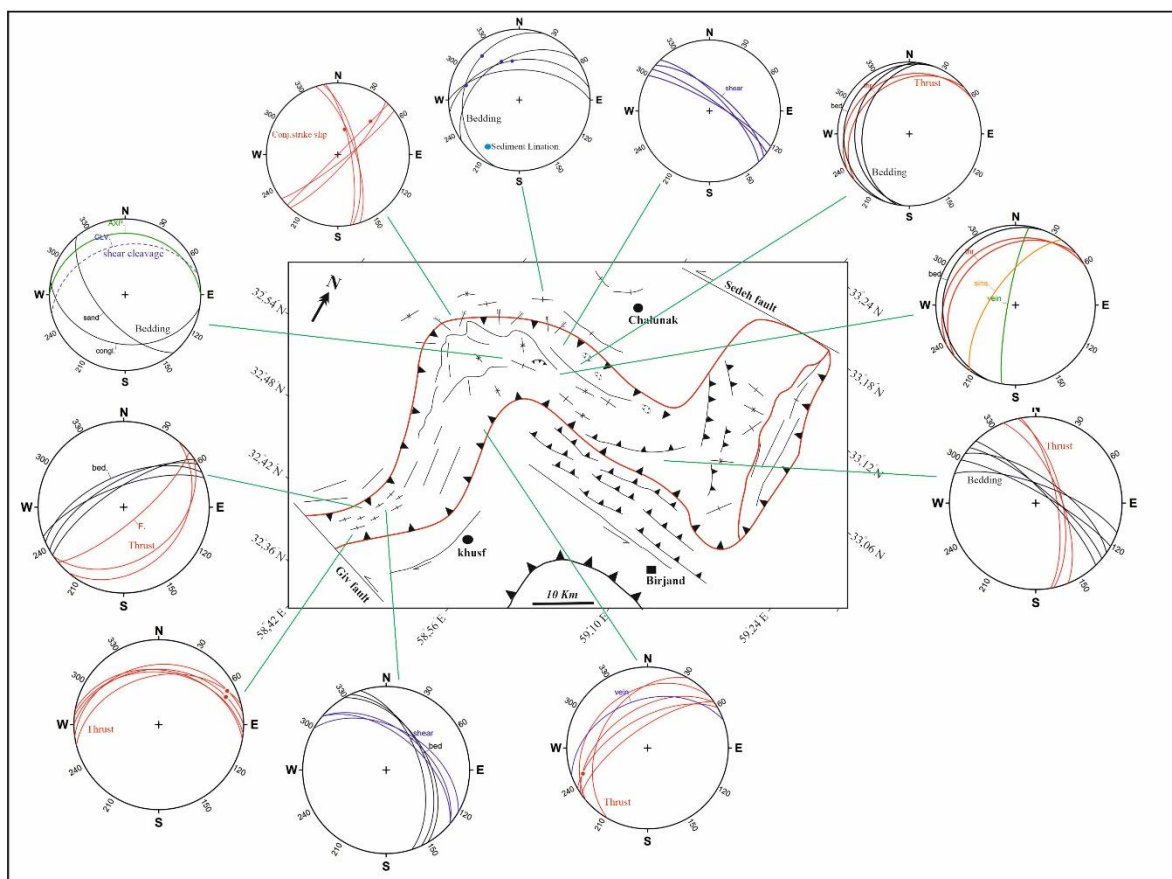
وسيله‌ی گسل‌های مزدوج بریده می‌شود (Yaghobi and Bagheri, 2020; Keshtgar et al., 2021). راستا و جهت حرکت راندگی‌های مرز پلاتفرم کربناته و پهنه شوشود این موضوع را تأیید می‌کند. اما به سبب چرخش کلی بلوک لوت، حرکتی در جهت عکس به تراشه‌ها داده و سبب شکل‌گیری قوس ساختاری شمال‌غرب بیرجند شده است. حاشیه شمالی به راندگی‌های با شیب به سمت جنوب‌شرق و میل به سمت شمال‌غرب محدود می‌گردد. با دور شدن از لولای خمش، به تدریج راندگی با چین‌های با دامنه بزرگ محدود گشته و پلاتفرم ائوسن با شیب تند به زیر نهشته‌های قاره‌ای جوان‌تر فرو می‌رود. در مقابل در حاشیه جنوبی قوس، سنگ‌های ائوسن به تدریج در زیر نهشته‌های ترشیری پوشیده شده و یا کاملاً فرسایش یافته و از بین رفته است. این منطقه سبب شده تا ارتفاع پلاتفرم به سمت لبه شمال‌غربی بیشتر شود. چنین ساختارهایی، در مناطق زمین‌شناسی مشابهی در دنیا مورد مطالعه واقع شده است. از جمله آن می‌توان به تکامل کوهزاد واریسکن اروپا در قوس کانتابریا (Cantabrian arc) اشاره نمود (Pastor-Galan et al., 2012) (شکل ۱۶).

نقشه ساختاری منطقه مورد مطالعه (شکل ۱۷) نحوه توزیع و جهت‌یابی انواع ساختارهای مرتبط با خمش ناحیه‌ای در این قوس را نشان می‌دهد. بر این اساس، تاریخچه دگرشکلی شرق ایران متشکل از سه حادثه اصلی است که در شکل ۱۸ به صورت خلاصه نشان داده شده است. حادثه اول دگرشکلی که منجر



شکل ۱۶- تکامل کوهزاد واریسکن در قوس خمیده کانتابریا (Cantabrian bent arc) در ارتباط با تغییر راستای میدان تنش فشارشی. (a) جهت یابی اثر محوری چین ها و راندگی ها قبل از رخداد خمش. (b) تغییر آرایش ساختارهای مرتبط با خم شدگی پوسته در قوس های داخلی و بیرونی، خم شدگی راندگی های اولیه و تشکیل چین های شعاعی مخروطی. (c) بلوک دیاگرام سه بعدی از نحوه تکامل قوس خمیده کانتابریا (Pastor-Galan et al., 2012).

Fig. 16. The evolution of the Variscan mountain in the Cantabrian bent arc in relation to the change in direction of the compressive stress field. a) Orientation of axial trace folds and thrusts before the buckling event. b) Re-arrangement of the structures related to the crust buckling in the inner and outer arcs and the bending of the primary thrusts and formation of radial conical folds. c) 3D block diagram for evolution of the Cantabrian arc (Pastor-Galan et al., 2012).



شکل ۱۷. نقشه ساختاری قوس شمال بیرجند به همراه استریونت ساختارهای برداشت شده که جهت‌یابی راندگی‌ها، چین‌ها، تورق‌های برشی و لایه‌بندی را در محدوده مورد مطالعه نشان می‌دهد.

Fig.17. Structural map of the North Birjand area and stereonet of thrust faults, folds axial planes, shear cleavages and bedding in the study area.

اٲوسن-اوايل اليگوسن منجر به تشكيل الگوهاي تداخلی چین‌هاي برهم‌نهاده از نوع گنبد و حوضه شده که در توربیدایت‌هاي شرق ايران به وضوح قابل مشاهده است. رخنمون‌هاي ناحیه‌اي از چین‌هاي تداخلی که مشابه چین‌هاي برهم‌نهاده تپ I و II رمزی است، در منطقه ماهیرود (Keshtgar et al., 2015, 2018) و نیز در فلیش‌هاي کرتاسه در مناطق بندان و کمپلکس خاش در بلوچستان مطالعه شده‌اند (Bagheri and Damani Gol, 2020).

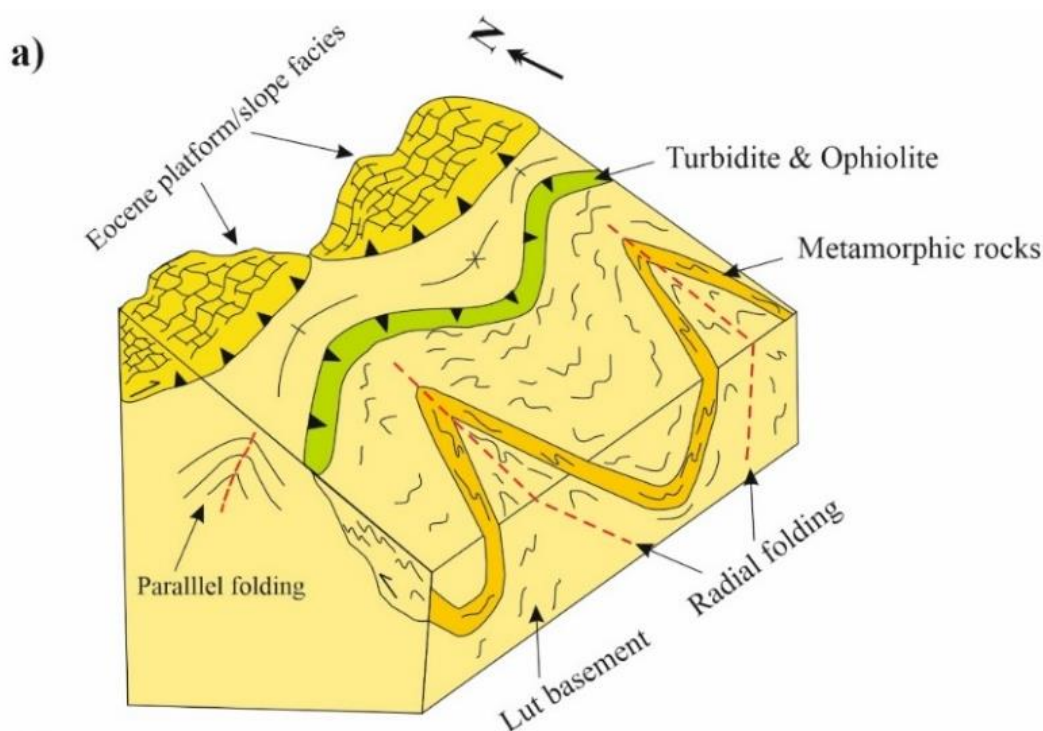
الگوهاي چین‌هاي سینوسی (کمر بند نابرجای قائن) و پشته‌هاي تکتونیکی (Ridge) بزرگ مقیاسی در شمال پهنه سیستان (بیرجند) وجود دارد که همراه با کلیواژ فراگیر در هسته چین‌ها هستند. اینها در حادثه دوم دگرشکلی ایجاد شده‌اند. تشکیل چین‌هاي مخروطی بزرگ مقیاس شمالی-جنوبی که ناهماهنگ و تنگ هستند و میل (پلانژ) به سمت شمال دارند نیز متأثر از حادثه دوم است. بنابراین کوتاه‌شدگی شرقی-غربی پوسته شرق ایران در اواخر

زمان‌های ائوسن پایانی تا اوایل الیگوسن در رخساره‌های فلیشی رخ داده است که میدان تنش تغییر جهت داده و راستای ENE پیدا نموده است که منجر به تشکیل نسل دوم چین‌خوردگی‌های تداخلی بزرگ مقیاس با سطح محوری NNW شده است. در این مرحله راندگی‌های قبلی دچار خمش شده و جهت انتقال تکتونیکی عمومی از شمال-شمال غرب به سمت جنوب-جنوب شرق بوده است. این حادثه دگرشکلی را می‌توان در ارتباط با برخورد هند-اوراسیا دانست که تکتونیک فرار نقش برجسته‌ای در برهم‌افزایش بلوک‌های مجزای قاره‌ای از جمله پهنه‌های لوت-سیستان داشته است. حادثه سوم دگرریختی از الیگوسن پایانی تا میوسن میانی اتفاق افتاده که منجر به کوتاه‌شدگی ناحیه‌ای در راستای NNE شده و دو دسته گسل‌های مزدوج امتدادلغز شرق ایران، متأثر از آن بوده است. بر این اساس، به نظر می‌رسد الگوی کوتاه‌شدگی این پلاتفرم کربناته متأثر از خمش کوهزاد (Buckling) باشد. با مقایسه ساختارهای مطالعه شده در منطقه با ساختارهای سایر مناطق شرق ایران از جمله ماهیرود، آهنگران و سه‌چنگی، به نظر می‌رسد ساختارهای چین‌خورده-رانده مرز خمیده شمالی لوت و سیستان مشابه ساختارهای مورد انتظار در مناطق چین‌خورده-رانده کلاسیک دنیا نیست و منشأ و نحوه آرایش آنها از مدل ساختارهای کوهزاده‌های برخوردی خطی (مدل شکستن و بازشدگی پوسته قاره‌ای شرق ایران و برخورد خطی) تبعیت نمی‌نماید.

حادثه دگرشکلی سوم منجر به تشکیل گسل‌های امتدادلغز راستالغز و چین‌خوردگی نهشته‌های قاره‌ای نئوژن شرق ایران شده است. این گسل‌های مزدوج با روند NNE و حرکت امتدادلغز راستالغز و روند WNW که امتدادلغز چپگرد هستند، در سرتاسر شرق ایران قابل مشاهده هستند. به طوری که محور چین‌ها را بریده و تورق‌های برشی نافذ ایجاد نموده است و در مواردی با ولکانیسم نئوژن نیز همراه هستند (نظیر گسل نه شرقی و غربی، گسل نایبند، گسل نصرت آباد و گسل کهورک).

نتیجه‌گیری

آنالیز تکتونیکی ساختارهای چین‌خورده-رانده در قوس ساختاری شمال بیرجند حاکی از این است که همزمان با تکامل تدریجی راندگی‌ها، انواع ساختارهای مرتبط با مولفه‌های کششی-لغزشی (نظیر شکستگی‌ها و رگه‌های کششی، گسلش نرمال و لغزش‌ها)، امتدادلغز-برشی (گسلش مزدوج) و فشارشی (راندگی‌ها، چین‌های موازی و شعاعی مخروطی، چین‌های برگشته) در منطقه به وجود آمده است. تحلیل این ساختارها حاکی از رخداد سه حادثه دگرریختی متفاوت است. حادثه دگرشکلی اول در واحدهای کرتاسه تا ائوسن میانی رخ داده است که تحت تأثیر تنش فشارشی شمالی-جنوبی ناشی از فرورانش رو به شمال اقیانوس نئوتتیس به زیر اوراسیا (از جمله بلوک‌های لوت و افغان)، چین‌ها و راندگی‌ها با محور شرقی-غربی به وجود آمده‌اند. جهت انتقال تکتونیکی در این مرحله از شمال به سمت جنوب در نظر گرفته شده است. دومین حادثه دگرریختی در



b)

Deformation phase	D1	D2	D3
Shortening direction	(N-S compression) Folding, thrusting	(E-W compression) Shortening	(N-NE- Wshortening)
Magmatism	West volcano-plutonic belt of Lut Zahedan granite	Dyke swarms	Delamination (Calc-alkaline/Shoshonite) Alkali basalt
Sedimentary basin	Sistan Ocean deposits	East iranian flysch	Molase deposits
Time	Late Cretaceous	Paleocene	Eocene
		E M L	E M L
			Oligocene
			E L
			Miocene
			E M L
			Pliocene/Quaternary
			E L
			0
	80	65	55
			35
			25
			5

شکل ۱۸. a) مدل تکتونیکی مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت و سیستان حاصل این پژوهش. b) جدول زمانی ارتباط بین دگرشکلی پیشرونده، جهات کوتاه‌شدگی، سن ماگماتیسم‌های مختلف و سن حوضه‌های رسوبی طی تکامل کوهزاد شرق ایران. با تغییرات از باقری و دامنی‌گل (Bagheri and Damani Gol, 2020).

Fig.18. a) Proposed tectonic model of the curved northern border of Lut and Sistan. b) Time chart for the temporal affiliation between the successive deformation, shortening direction, the age of various magmatic pulses, and the age of sedimentary basins during the Eastern Iranian orogeny. Modified after Bagheri and Damani Gol (2020).

سیاسگزاری

۷۹۱۲ است و از دانشگاه بیرجند بابت حمایت از این

تحقیق قدردانی می‌شود.

این پژوهش بخشی از دستاوردهای رساله دکترای

نویسنده اول مقاله در دانشگاه بیرجند به شماره طرح

faulting deformation regimes. *Journal of Structural Geology* 148, 1-13.

Fitz-Diaz, E., Hudleston, P., Tolson, G., 2011. Comparison of tectonic styles in the Mexican and Canadian Rocky Mountain fold-thrust belt. *Geological Society of London, Special Publications* 349 (1), 149-167.

Guillou, Y., Maurizot, P., Vaslet, D., De la Villeon, H., 1981. Ahangan Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.

Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M. M. Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics* 36(2), 321-339.

Jentzer, M., Agard P., Bonnet G., Monié P., Fournier, M., Whitechurch, H., Omrani, J., Zarrinkoub, M.H., Khatib, M.M., Kohansal, R., Do Couto, D., Godbillot, C., Ninkabou, D., 2022. The North Sistan orogen (Eastern Iran): Tectono-metamorphic evolution and significance within the Tethyan realm. *Gondwana Research* 109, 460-492.

Keshtgar, Sh., Bagheri, S., Boomeri, M., 2015. Tectonic history of the MahiRud (Cheshme-ostad) complex according to new structural data, East of Iran. *Tectonics journal*, 1(4), 63-76 (In Persian).

Keshtgar, Sh., Bagheri, S., Boomeri, M., 2018. Tectonic setting of Mahirud Volcano-plutonic Complex: Different insight into the geodynamic history of Eastern Iran. *Scientific Quarterly Journal of Geosciences* 29(113), 131-144 (In Persian).

Keshtgar, Sh., Heyhat, M.R., Bagheri, S., Gholami E., Raiisosadat, S.N., 2021. Analysis of extension and conjugate shear fractures in the Seh-Chengi Conglomerate (The northwestern border of Lut-Sistan terrains). *Tectonics journal* 6(22), 33-45 (In Persian).

References

Ahmadi Comijany, N., Khatib, M.M., Gholami, E., Mirab Shabestari, G., Zarrinkoub, M.H., 2019. Estimation of shortening and vergence in northern part of Sistan Suture Zone for determination of kinematic convergent vectors. *Journal of Advanced Applied Geology* 9(3), 232-255.

Angiboust, S., Agard, P., De Hoog, J.C.M., Omrani, J., Plunder, A., 2013. Insights on deep, accretionary subduction processes from the Sistan ophiolitic mélange (Eastern Iran). *Lithos* 156(159), 139-158.

Azimi, M.A. Saidy, A., 1975. Sechengi Quadrangle map, Scale: 1/100000, sheet 7655, Geological Survey of Iran, Tehran.

Bagheri, S., Damani Gol, Sh., 2020. The eastern Iranian Orocline. *Earth Science Reviews* 210, 1-43.

Barthiaux, A., Christmann, P., Fauvelet, E., 1981. Qayen Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.

Bolourian, Gh., Vahedi, A., 2004. Jonube-Seh-Changi Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.

Bonnet, G., Agard, P., Angiboust, S., Monié, P., Jentzer, M., Omrani, J., Whitechurch, H., Fournier, M., 2018. Tectonic slicing and mixing processes along the subduction interface: The Sistan example (Eastern Iran). *Lithos* 310(311), 269-287.

Camp, V.E., Griffis, R.J., 1982. Character, genesis and tectonic setting of igneous rocks in the Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 15, 221-239.

Carey, S.W., 1955. The orocline concept in geotectonics: *Proceedings of the Royal Society of Tasmania* 89, 255-288.

Ferrill, D., Smart, K.J., Cawood, A.J., Morris, A.P., 2021. The fold-thrust belt stress cycle: Superposition of normal, strike-slip, and thrust

- Khatib, M.M., 1999. Geometry of termination of strike-slip faults in Nehbandan fault zone, east of Iran, Ph.D. thesis (In Persian).
- Marshak, S., Mitra, G., 2002. Basic methods of structural geology. Prentice-Hall.
- McCall, G. J. H., 1997. The geotectonic history of the Makran and adjacent areas of southern Iran. *Journal of Asian Earth Sciences*, 15(6), 517-531.
- Mousavi, M., Alavi, A., Khatib, M. M., 2010, Analysis of paleostress with fault plane inversion method in south Birjand area. *Iranian Journal of geology* 13, 27-38. (In Persian).
- Ohanian, T., Tatevosian, S., 1978. "Birjand" Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Pang, K.-N., Chung, S.-L., Zarrinkoub, M.H., Mohammadi, S.S., Yang, H.-M., Chu, C.-H., Lee, H.-Y., Lo, C.-H., 2012. Age, geochemical characteristics and petrogenesis of Late Cenozoic intraplate alkali basalts in the Lut-Sistan region, eastern Iran. *Chemical Geology* 306(307), 40–53.
- Pastor-Galan, D., Gutierrez-Alonso, G., Mulchrone, K.F., Huerta, P., 2012. Conical folding in the core of a orocline. A geometric analysis from the Cantabrian Arc (Variscan Belt of NW Iberia). *Journal of Structural Geology* 39, 210-223.
- Poblet, J., Lisle, R.J., 2014. Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts. *Geological Society of London, Special Publications*, 349, 1–24.
- Ramsay, J. G., Huber, M. I., 1987. The techniques of modern structural geology volume 2: Folds and Fractures. Academic Press.
- Rashidi, A., Shafiei Bafti, S., Nemati, M., Ezati, M., Gholami, E., Mousavi, S.M., Derakhshani R., 2023. Flexural-slip folding in buckling phases of orogenic belts: Insight into the tectonic evolution of fault splays in the East Iran orogeny. *Frontiers in Earth Science* 11, 1-24.
- Rojhani, E., Ghaemi, F., Bagheri, S., 2021. The Achani interfering folded structure and related linear dyke swarm: a new method to test the Oroclinal buckled arcs; north Qayen, East Iran. *Tectonics journal* 5(18), 75-89 (In Persian).
- Rowshanravan, J., 2006. Mousaviyeh Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Samimi, S., Gholami, E., Khatib, M. M., Madanipour, S., Lisker, F., 2020. Transpression and Exhumation of Granitoid Plutons along the Northern Part of the Nehbandan Fault System in the Sistan Suture Zone, Eastern Iran. *Geotectonics*, 54(1), 130–144.
- Sengor, A.M.C., Altmer, D., Cin, A., Ustaömer, T. Hsü, K.J., 1988. Origin and assembly of the Tethyside orogenic collage at the expense of Gondwana Land. *Geological Society of London, Special Publications* 119-181.
- Stampfli, G.M., 2000. Tethyan oceans. *Geological Society of London* 173, 1–23.
- Stampfli, G.M., Borel, G.D., 2002. A plate tectonic model for the Paleozoic and Mesozoic constrained by dynamic plate boundaries and restored synthetic oceanic isochrons. *Earth and Planetary Science Letter* 196, 17–33.
- Stocklin, J., 1972. Iran Central, septentrionat et oriental, *Luxique stratigraphique International* III. Fascicule 9b, Iran, center national de la Recherche scientifique, 1-283.
- Tavani, S., Storti, F., Lacombe, O., Corradetti, A., Muñoz, J.A., Mazzoli, S., 2015. A review of deformation pattern templates in foreland basin systems and fold-and-thrust belts: Implications for the state of stress in the frontal regions of thrust wedges. *Earth-Science Reviews* 141, 82-104.
- Tirrul, R, Bell, L.R., Griffis, R. J., Camp, V. E., 1983. The Sistan Suture Zone of eastern Iran. *Geological Society of America Bulletin* 94, 134-150.
- Vahdati Daneshmand, F., Kholghi, M., 1987. Khusf Quadrangle map. Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Weil, A. B., Gutiérrez-Alonso, G., Johnston, S.T., Pastor-Galan, D., 2013. Kinematic constraints on buckling a lithospheric-scale orocline along the northern margin of Gondwana: A geologic synthesis. *Tectonophysics* 582, 25-49.

- Yaghobi, M., Bagheri, S., 2020. Proportional shortening mechanism in the Eocene Northwestern structural arc of Birjand, Eastern Iran. *Scientific Quarterly Journal*, 29, 116, 277-286 (In Persian).
- Yonkee, A., Weil, A.B., 2010. Reconstructing the kinematic evolution of curved mountain belts: Internal strain patterns in the Wyoming salient, Sevier thrust belt, U.S.A., *Geological Society of America Bulletin* 122, 24-49.
- Zarrinkoub, M. H, Pang, K.-N., Chung, S.-L., Khatib, M.M., Mohammadi, S.S., Chiu, H.-Y., Lee, H.-Y., 2012. Zircon U-Pb age and geochemical constraints on the origin of the Birjand ophiolite, Sistan suture zone, eastern Iran. *Lithos* 154, 392-405.