



Nature and movement of thrusts in the Paleogene orogen of eastern Iran: curved northern border of the Lut and Sistan terrains, Sechengi area

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: 15 December 2022

Accepted: 07 February 2023

Keywords:

Thrust, Tectonic vergence, Orocline Buckling, Sechengi, Eastern Iranian ranges.



Abstract

The eastern Iranian ranges appearing with a NS-trending strike on the satellite images, were already known as the Sistan suture zone, but have recently been identified as the eastern Iranian orogen. The N40E first-generation folds and thrusts with slaty cleavage (parallel folds) have appeared parallel to the NE edge of the Lut block. The structural analysis shows that most of the thrusts dip to the northwest, so that the Permo-Triassic and Jurassic microdiorite units in Lut have been thrusting on the younger rocks. The structural studies show that the tectonic vergence in this deformation event is northwest to the southeast and from the outside (hinterland) to the inside (foreland) of this orogen in the Sechengi area. Younger thrusts of the second deformation event were either directly formed due to the second deformation event, or they were older thrusts that reactivated and folded, so that often two sets or more slickenlines can be recognized on the thrust plane. The recent N44W thrusts have been redistributed in perpendicular to the edge of the Lut block and parallel to the axial plane of the northwest second-generation large-scale folds (radial folds). Both the northwest folds' axial plane and penetrative shear cleavage, have dips to the northeast and southwest. These structures are parallel to the axial planes of the second-generation folds and younger thrusts. Such consecutive deformation events perpendicular to each other are inconsistent with the models of simple linear orogens presented for eastern Iran (i.e., rifting of eastern Iran continental crust and subsequent linear collision) and seem more consistent with the buckling orogens (Orocline).

Introduction

Kinematic analysis of structures is an important tool to understand the history of deformation at local and regional scales. The study of fold-thrust belts is simply not possible due to their different geological and structural characteristics, because several factors affect each type of these belts (Poblet and Lisel, 2014).

The eastern Iranian ranges (EIR) with an average 900 km length and 200 km width and north-south strike are part of the Alpine-Himalayan belt. The Paleogene orogen of eastern Iran which is affected by the Indo-Eurasian collision, is mainly composed of Cenozoic rocks and is located between the Afghan block in the east and the Lut block in

DOI <https://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.104161>

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

How to cite this article: Keshtgar, S., Heyhat, M.R., Bagheri, S., Gholami, E., Raiisosadat, N., 2023. Nature and movement of thrusts in the Paleogene orogen of eastern Iran: curved northern border of the Lut and Sistan terrains, Sechengi area. Kharazmi Journal of Earth Sciences 8(2), 212-235. <https://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.104161>



the west. In fact, these blocks are derived from the Cimmerian block (Stöcklin, 1972).

The tectonics of EIR has many complexities and it is considered to be affected by the presence of the Neotethys oceanic branch between the Afghan and Lut continental blocks (McCall, 1997), which rifted in the Early Cretaceous (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983).

The EIR contains Cretaceous-Eocene turbidite sequences consisting of "Ratuk" high-pressure metamorphic mélangé (in the northern part) and "Neh" Ophiolite complex which are considered as the foreland. The Hinterland is situated in the curved northern border between the Lut and EIR (Bagheri and Damani Gol, 2020).

These microcontinents were added to the Eurasian continent during the closure of the Paleotethys Ocean in the Late Triassic. There is no consensus on the timing of the ocean closure in eastern Iran and the Lut-Afghan continental block collision, ranging from the Middle Eocene (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) to the Late Cretaceous (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013, Bonet et al., 2018, Jentzer et al., 2017). Bagheri and Damani Gol (2020) have introduced the Paleogene orocline of EIR as a secondary orocline. According to Rashidi et al. (2023), flexural slip played a crucial role in the formation of the multi-plunging anticline and syncline in the Khouf (north west of Birjand city) splay.

The most important questions that are the goal of this research are: 1) Are the directions of tectonic transport and the characteristics of thrusts compatible with the orientation of similar structures in the linear Lut and Afghan collision zone? 2) What is the direction of the general tectonic transport and direction in the Sechengi area? How many deformation phases

occurred in Sechengi area and what is the time relationship between these tectonic phases?

Materials and Methods

In this research, based on field studies and processing of satellite images, an attempt has been made to understand kinematic-geometric tectonic analysis of thrust faulting, the deformation patterns, and the time of the deformation phases in this region. Due to the lack of consistent structural studies in the Sechengi area, the geological map of this area has been corrected and the structural map and cross-sectional profiles have been drawn more precisely. By using the stratigraphic relationships of the lithological units and structural analysis of thrust sheets, the direction of the general tectonic transport (vergence) has been identified and introduced for the first time.

Results and Discussion

In the Sechengi area, many thrust sheets and Klippes crop out, but these structures are not identified on the geological maps including the Sechengi (Azimi and Saidy, 1975), South Sechengi (Bolourian and Vahedi, 2004) and Sarchah-Shur (Vahdati and Kholghi, 1987) sheets.

The Th.1 thrust sheet with an asymmetrical shape is N50E/55NW, so that the Triassic limestones were thrust onto the Jurassic microdiorites. Sometimes numerous tectonic klippes can be seen on the Triassic microdiorites and shales. At the boundary between these two units, there is a brittle shear zone. The direction of tectonic transport in this part of the Sechengi area is SE vergence.

The N15E/68NW Th.2 thrust sheet, exposed in the Abgar-me-Lut area, is a thrust of Triassic limestones on Triassic sheared limestones. In the margin of this thrust, a vertical fault plane can be observed, whose slickenslides are almost horizontal and it

seems to be a lateral thrust. Triassic limestones are also thrusting on the Triassic metamorphosed shales (N70W/66NE to E-W/55). In the lateral and frontal part of this thrust sheet, there are two sets of slickensides, which indicate the occurrence of two stages of fault movement in lateral and frontal ramps.

The deformation history of the Sechengi area consists of two groups of thrusts generated in three deformation phases:

The first group are older thrust sheets orientated parallel to the edge of the Lut block. These thrusts have NE strike and NW dip of the fault plane. The Permo-Triassic units within the Lut block moved onto the Jurassic-Cretaceous units by overthrust nappe and thrusting. Also, the Permian limestones (in Ghore-Sefid Mountain) thrust on the Triassic limestones (N35E/46NW). In the Sechengi area, the Triassic limestones thrust (N42E/60NW) on the Jurassic microdiorites.

The second group are new thrusts that have been folded or reactivated as a result of second deformation event. These thrust sheets have two sets of slickenlines and orientated perpendicular to the edge of the Lut block and parallel to the NW axial plane of the superimposed folds.

In the Sechengi area, the axial plane of the second-generation folds is orientated in N30W and the shear cleavage is orientated in N42W, and the cleavage planes of both structures have NE and SW dips. According to new structural data in the Sechengi area, tectonic transport (vergence) was obtained from NW to SE direction.

Conclusions

Tectonic history of the Sechengi area in eastern Iranian ranges (EIR) consists of three deformation phases:

The first phase led to the formation of compact and tight folds and associated axial surface cleavages (S1) that are bent. These folds tend to the SSE (vergence) along with the thrusts that show bending towards the north. The occurrence of thrusts during the Middle Eocene is widespread in the Sistan region, and the narrow parallel folds of the Middle-Upper Eocene in the red and green volcanosedimentary sequences are well distributed in the northern part of the Lut-Sistan border, such as the Qaen allochthonous belt.

The second phase of deformation that occurred at the end of the Paleogene in an east-west direction led to the bending of the previous structures, including the axial surface of the first-generation folds (which had an east-west axial plane alignment) and found a new northwest direction (F2). The ramp of the first phase thrusts (with east-west extension) was also reactivated and found a new NNW orientation, which shows the SSE tectonic vergence. The sinusoidal folds and large-scale tectonic ridges (Ridge) in the north of the Sistan-Lut boundary (north of Birjand and Musavie area) with N-S conical folds formed the second phase of deformation along with widespread cleavage in the core of the folds.

The third phase led to the formation of right-slip extensional faults and the folding of Neogene continental deposits in eastern Iran. These include the NNE trend with right-slip movement and the WNW trend conjugate faults, which are left-slip extensions that cut the axis of the folds and created penetrating shear cracks, and sometimes they are accompanied by volcanism (such as the East and West Neh Fault and the Kahurak Fault).

Therefore, it seems that the fold-thrust structures in the curved northern border of the Lut and Sistan terrains are expected structures

in the classical fold-thrust belts. These structures do not resemble the expected structures that are common in the linear collision zones but are similar to large-scale buckling orogens (oroclines).

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 mélange (Eastern Iran). *Lithos* 156(159), 139–158.
- Azimi, M.A., Saidy, A., 1975. Sechangi Quadrangle map, Scale: 1/100000, sheet 7655, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bagheri, S. Damani Gol, S.H., 2020. The eastern Iranian Orocline. *Earth Science Reviews* 210, 1–43.
- 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

CRedit authorship contribution statement

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

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.
- 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.
- Poblet, J., and Lisle, R.J., 2014. Kinematic evolution and structural styles of fold-and-thrust belts. *Geological Society of London, Special Publications*, 349, 1–24.
- 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.
- Stocklin, J., 1972. Iran Central, septentrional et orientale, *Luxique stratigraphique International III. Fascicule 9b, Iran, center national de la Recherche scientifique*, 1–283.
- 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.
- Vahdati Daneshmand, F., Kholghi, M., 1987. Khusf Quadrangle map, Scale: 1/100000. Geological Survey of Iran, Tehran.
- 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.



ماهیت و جنبش راندگی‌ها در کوهزاد پالتوژن شرق ایران: مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت و سیستان، منطقه سه‌چنگی

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

۱. دانشجوی دکتری تکتونیک، 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

اطلاعات مقاله	چکیده
تاریخچه مقاله	رشته کوه‌های شرق ایران با، با روند عمومی شمالی-جنوبی از گذشته به نام پهنه جوش خورده سیستان و اخیراً به عنوان کوهزاد پالتوژن شرق ایران معرفی شده است. منطقه سه‌چنگی در مرز خمیده شمال غربی پهنه جوش خورده سیستان با پهنه لوت قرار دارد. چین‌ها و راندگی‌های نسل اول همراه با تورق رخ اسلیتی (چین‌های موازی) به موازات لبه شمال غربی لوت و با راستای N40E ظاهر شده‌اند و شیب اغلب تراست‌ها به سمت شمال غرب است به طوری که واحدهای پرمو-تریاس درون لوت بر روی سنگ‌های جوان‌تر و از جمله میکرودیوریت‌های ژوراسیک قرار گرفته‌اند. راندگی‌های نسل دوم در اثر حادثه دوم دگرشکلی یا به طور مستقیم شکل گرفته و یا راندگی‌های قدیمی‌تری بوده‌اند که مجدداً فعال شده و چین خورده‌اند. به طوری که اغلب دو یا چند دسته خشلغز در سطح این راندگی‌ها قابل تشخیص است. این نسل راندگی‌ها در راستای عمود بر لبه شمالی لوت و به موازات سطح محوری نسل دوم چین‌های بزرگ مقیاس (چین‌های شعاعی) و موازی با تورق‌های برشی منطقه با راستای N44W، مجدداً توزیع شده‌اند. بنابراین جهت انتقال زمین‌ساختی در مرز شمالی لوت و سیستان از شمال غرب به جنوب شرق و از قوس خارج کوهزاد (هینترلند) به سمت داخل قوس (فورلند) است. چنین حوادث دگرشکلی پیاپی و عمود بر یکدیگر، با مدل‌های کوهزادهای برخوردی خطی ارائه شده برای شرق ایران (مدل شکستن و بازشدن پوسته قاره‌ای شرق ایران و برخورد خطی) همخوانی ندارد و بیشتر منطبق بر مدل خمش کوهزادی (اوروکلاین) است.
واژه‌های کلیدی	
راندگی، انتقال زمین‌ساختی، خمش کوهزاد، سه‌چنگی، کوه‌های شرق ایران.	
	

مقدمه

زیرا عوامل متعددی در هر نوع از این کمربندها تاثیرگذار است (Poblet and Lisel, 2014). این عوامل عبارتند از: محیط تکتونیکی از نظر نوع نازک‌پوسته یا ستبرپوسته که کمربندهای چین‌خورده-رانده در آن تکامل یافته‌اند؛ نقش آفرینی

تحلیل جنبشی ساختارها ابزار مهمی برای پی بردن به تاریخچه دگرشکلی در مقیاس محلی و ناحیه‌ای است. مطالعه کمربندهای چین‌خورده-رانده به دلیل وجود خصوصیات زمین‌شناسی و ساختاری متفاوت آنها به سادگی امکان‌پذیر نیست

DOI <http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.104161>

*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. (۱۴۰۱) ماهیت و جنبش راندگی‌ها در کوهزاد پالتوژن شرق ایران: مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت و سیستان، منطقه سه‌چنگی. مجله علوم زمین خوارزمی. جلد ۸، شماره ۲، صفحه ۲۱۲ تا ۲۳۵.

<http://doi.org/10.22034/KJES.2023.8.2.104161>



Angibboust et al., 2013; Jentzer et al., 2022; Rashidi et al., 2023) برای شرق ایران توجیه پذیر نیستند (رخداد شکستگی پوسته قاره‌ای با محور ریفت شمالی-جنوبی در زمان کرتاسه). رخنمون‌های ناحیه‌ای از چین‌های تداخلی که مشابه چین‌های برهم‌نهاد تپ I و II رمزی است، در منطقه ماهیرود (Keshtgar, et al., 2018; Keshtgar et al., 2021) و نیز در فلیش‌های کرتاسه منطقه بندان و منطقه بلوچستان نظیر کمپلکس خاش مطالعه شده‌اند. در حاشیه شرقی پهنه لوت، در محل تماس با کوه‌های شرق ایران، برش‌های تکتونیکی از پهنه سیستان به شکل قوس‌های ساختاری با تحدب به سمت شمال تا شمال غرب وارد پهنه لوت شده و به صورت متناوب باهم قرار گرفته‌اند (مانند مناطق قاین-موسویه-سه چنگی). در حاشیه شرقی بخش شمالی پهنه لوت، در مناطقی که با سنگ‌های دگرشکل شده شدید پهنه سیستان در تماس است، سنگ‌های پلاتفرم کربناته لوت در منطقه سه‌چنگی جابجایی‌های محسوسی را به نمایش می‌گذارند. مطالعه مکانیزم و مسیر حرکت این توده‌های سنگی جزء مباحث اصلی این نوشتار است. به طور کلی مهم‌ترین اهداف این پژوهش عبارتند از: ارائه شواهد جنبشی از بخش‌هایی که نشان‌دهنده نحوه شکل‌گیری قوس خمیده شمالی لوت-سیستان باشد، تعیین مشخصات راندگی‌ها و جهت‌یابی ساختارها و مقایسه با مدل‌های برخورد خطی پهنه‌های لوت و افغان، بررسی جهت انتقال عمومی ناحیه‌ای و جهت حرکت سفره‌های روراند در منطقه سه‌چنگی، تفکیک انواع حوادث دگرریختی

چینه‌شناسی مکانیکی؛ حضور، گسترش و ضخامت واحد نمک/شیل در پهنه جدایش؛ وجود فرسایش و نهشته‌شدن و تدفین رسوبات همزمان با کوهزایی؛ عمق پهنه جدایش ضخامت الاستیک موثر سنگ‌کره (Royden, 1993)؛ ساختارهای پی‌سنگی قبلی؛ مدت زمان تاثیر و نرخ دگرشکلی (Fitz diaz et al., 2011) و نهایتاً میزان تاثیرپذیری از حوادث دگرشکلی بعدی. کمربندهای چین‌خورده-رانده ایده‌آل اغلب متأثر از نیروهای تکتونیکی فشارشی هستند و در محیط‌های همگرایی ورقه‌های تکتونیکی از جمله مرزهای برخوردی ورقه‌ها (مانند هیمالایا، آپنینز)، مرزهای فرورانش (مانند آند) و محیط‌های درون ورقه‌ای (مانند کمربند اورودس غربی در چین) ایجاد می‌شوند. در فلات ایران و حواشی آن مثال‌هایی از سیستم‌های کمربند چین‌خورده-تراستی دوران سنوزوئیک دیده می‌شود که پهنه زاگرس نمونه‌ای از این نوع کمربندهاست.

چین‌های برهم‌نهاد یکی 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 تنش فشارشی شمالی-جنوبی قبل از ائوسن میانی بوجود آمده‌اند، ابهام برانگیز دانسته‌اند. جهت‌یابی سطح محوری چین‌های برهم‌نهاد، با مدل‌های تکتونیکی ارائه شده (Tirrul et al., 1983; Pang et al., 2013;) (Zarrinkoub et al., 2012; McCall, 1997;

(Ma ۵۰۰-۶۰۰)، پالئوتتیس (Ma ۲۳۰-۴۵۰)،
 نئوتتیس (Ma ۲۰-۳۰) و ایندو-استرالیا (Ma ۱۵۰).
 اقیانوس نئوتتیس در زمان اواخر کربونیفر- اوایل
 پرمین همزمان با اشتقاق ابرقاره پانگه‌آ باز شده است.
 منطقه شمال عربستان که پیشتر حاشیه فعال گندوانا
 بوده است، در زمان دونین تبدیل به حاشیه غیرفعال
 شده و تا اواخر سنوزوئیک به همین شکل باقی مانده
 است. باز شدن نئوتتیس و جدایش از پهنه سیمیرین
 در زمان پرمین منجر به افزایش نیروهای کشش
 صفحه در پالئوتتیس شده که نتیجه آن، فرورانش
 پشته‌های میان اقیانوسی به زیر حاشیه اوراسیا بوده
 است (Stampfli, 2000). خط زمین‌درز Indus-
 tsangpo در اثر بسته شدن نئوتتیس بین قاره هند و
 پهنه هلمند-لاهما ایجاد شد. چندین پهنه از ایران
 نظیر البرز، لوت و خزر به حاشیه اوراسیا افزوده شدند.
 یکی از مهم‌ترین مطالعاتی که بر روی کمان
 آتشفشانی چاگای-راسکوه پاکستان انجام شده است
 حاکی از تکامل پوسته‌ای این کمان طی محدوده
 زمانی اواخر ژوراسیک تا پلیوسن است (Siddiqui,
 2012). در اواخر کرتاسه، اقیانوس هند از گندوانا جدا
 شد و در امتداد یک گسل ترانسفرم به سمت شمال
 حرکت کرد (Gibbons et al., 2013). اولین برخورد
 و اتصال ورقه هند به اوراسیا در حدود ۴۸ میلیون
 سال پیش رخ داد (Coward et al., 1986). هم‌زمان
 با این برخورد، پهنه‌های ایران از جمله پهنه‌های لوت
 و افغان ضمن جابجایی توأم با چرخش، موقعیت
 کنونی خود را به دست آوردند (Mattei et al., 2015;
 Bagheri et al., 2020).

موثر و ارتباط زمانی و در نهایت اثرات آنها در مرز
 شمالی پهنه‌های لوت با سیستان.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر اساس روش آنالیز تکتونیک انجام
 شده است. بدین منظور با استفاده از مطالعه صحرایی،
 روابط چینه‌شناسی و ساختاری بین واحدهای
 زمین‌ساختی منطقه، تحلیل جنبشی راندگی‌ها،
 چین‌های مرتبط و سایر عناصر دگرشکلی نظیر تورق
 و برش‌ها، جهت انتقال عمومی زمین‌ساختی منطقه
 شناسایی و معرفی شده است. کلیه عناصر ساختاری
 مذکور طی ۲۵ روز عملیات صحرایی در سه منطقه
 آهنگران، موسویه و سه‌چنگی واقع در مرز شمالی
 پهنه‌های لوت و سیستان برداشت شدند. با توجه به
 اینکه در منطقه سه‌چنگی مطالعات ساختاری با
 اهداف یادشده انجام نشده است، در این پژوهش
 تلاش گردید تا ضمن اصلاح نقشه زمین‌شناسی
 منطقه، نقشه ساختاری و نیمرخ‌های عرضی مرتبط
 نیز ترسیم شوند. برای تحلیل داده‌های صحرایی از
 نرم‌افزارهای Google earth، Stereonet و GIS بهره
 برده شده است.

موقعیت زمین‌شناسی و تکتونیک

ایران و نواحی مجاور آن در اثر برهم‌افزایش
 متوالی و مداوم پهنه‌های قاره‌ای جدا شده از گندوانا
 (سرزمین‌های سیمیرین) تشکیل شده‌اند. این پهنه‌ها
 در نهایت به جنوب اوراسیا ملحق شده‌اند. در طی
 تکامل اقیانوس تتیس، چهار محدوده اقیانوسی
 مشخص شده است (Stampfli, 2013): پروتوتتیس

لوت و سیستان وجود دارد. مطالعات ساختاری دیگری نیز در این پهنه انجام شده است (Jentzer et al., 2017, 2022; Rashidi et al., 2023; Ezati et al., 2010) که در نگاهی متفاوت این مرز را به عنوان مرز فرارانش افیولیتی در زمان کرتاسه پسین فرض کرده‌اند و طبق آنها، لبه لیتوسفر اقیانوسی سیستان بر روی حاشیه لوت فرارنده شده است (Jentzer et al., 2023).

پهنه ساختاری لوت اغلب توسط سنگ‌های آتشفشانی سنوزوئیک و رسوبات قاره‌ای پوشیده شده است (شکل ۱-ب). در کنار آن می‌توان رخنمون‌هایی پراکنده از واحدهای پالئوزوئیک و مزوزوئیک و یک هسته از سنگ‌های دگرگون شده را نام برد (Stocklin, 1972). مهم‌ترین خصوصیات زمین‌شناسی لوت عبارتند از: ۱- پی‌سنگ کادومین (Guillou et al., 1981; Rowshanravan, 2006)، ۲- رسوبات پالئوزوئیک (Stocklin et al., 1972); ۳- نفوذی‌های ژوراسیک (Berthiaux et al., 1991)، ۴- پلاتفرم کربناته کرتاسه-پالئوسن (Ohanian and Tatevosian, 1978)، ۵- پلاتفرم تخریبی ائوسن (Azimi and Saidy, 1975) به همراه محصولات ولکانوکلاستیک مرتبط و ۶- محصولات قاره‌ای و دریاچه‌ای نئوژن و کواترنر. لوت بخشی از خشکی ابرسرزمین سیمین بوده است که در تریاس پایانی در حین بسته شدن اقیانوس پالئوتتیس به قاره اوراسیا افزوده شده است (Stampfli and Borel, 2002). در مورد زمان بسته‌شدن اقیانوس سیستان

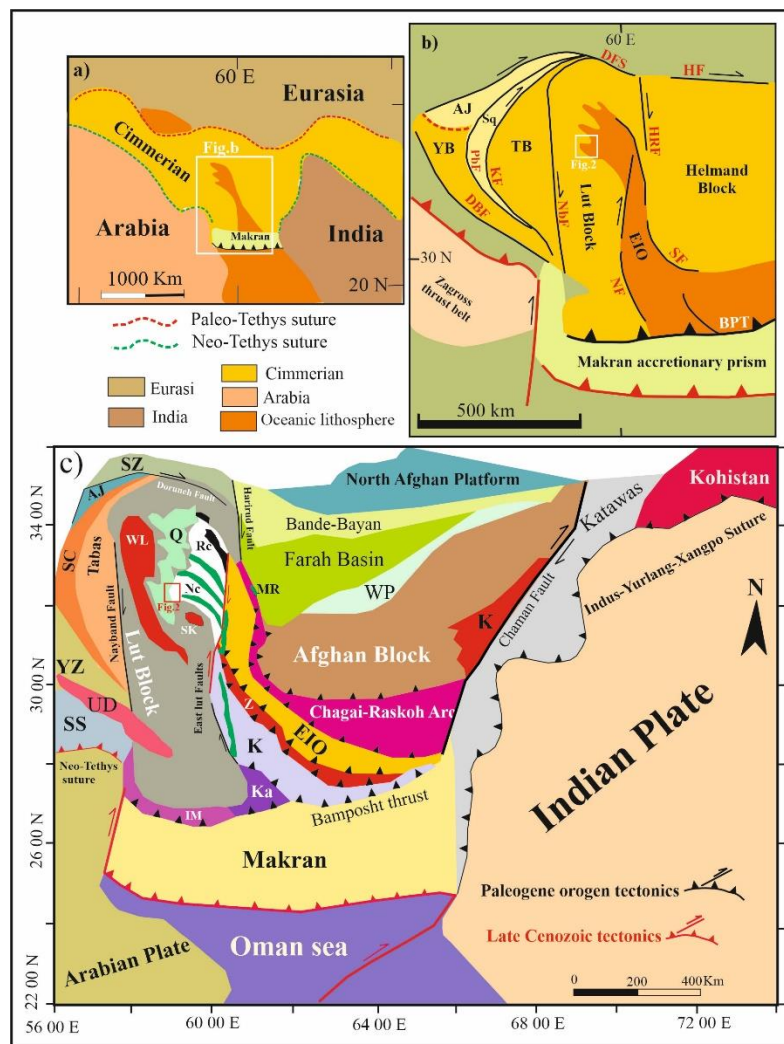
رشته کوه‌های شرق ایران با میانگین طول ۹۰۰ کیلومتر و عرض ۲۰۰ کیلومتر، دارای روند شمالی-جنوبی هستند و بخشی از کمربند کوهزاد آلپ-همیالایا هستند. کوهزاد پالئوژن شرق ایران که متأثر از حادثه برخوردی هند-اوراسیا است (Bagheri and Damani Gol, 2020)، بین پهنه افغان در سمت شرق و پهنه لوت در سمت غرب قرار گرفته است (شکل ۱). این بلوک‌ها نیز جزئی از سرزمین‌های سیمین هستند (Stöcklin, 1972). تکتونیک شرق ایران پیچیدگی‌های زیادی دارد که طی تحول شاخه فرعی اقیانوس منشعب از اقیانوس نئوتتیس بین خردقاره‌های لوت و افغان ایجاد شده است (McCall, 1997). این شاخه فرعی در اوایل کرتاسه گسترش یافته است (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983; Jentzer et al., 2017, 2022) تقسیم‌بندی‌های متفاوتی برای واحدهای ساختاری ایران توسط محققین مختلف ارائه شده است اما برای محدوده مورد مطالعه دو پهنه ساختاری سیستان و لوت عمومیت یافته است (شکل ۱).

پهنه سیستان (رشته کوه‌های شرق ایران) مشتمل بر کمپلکس‌های "رتوک" و "نه" و دربرگیرنده توالی‌های توربیدیتی کرتاسه-ائوسن، رخنمون‌های افیولیتی کرتاسه و دگرگونی‌های فشار بالا در بخش شمالی است (شکل ۱-ب). مجموعه فوق در مطالعات جدید (Bagheri and Damani Gol, 2020) به عنوان سرزمین پیش بوم (Foreland) اروکلاین در نظر گرفته شده است. طبق این مطالعه، منطقه پس‌بوم (Hinterland) در شمال مرز دندان‌ای و خمیده بین

مقطع پرمین و مزوزوئیک در جنوب شرقی منطقه رخنمون دارند. قدیمی‌ترین برونزدها آهک‌های تیره رنگ اوولیتی‌اند که در کوه غوره سفید رخنمون دارند و معادل آهک جمال در طبرستان در نظر گرفته شده‌اند (Azimi and Saidy, 1975). در واقع این منطقه دربردارنده یک برش نازک و ناکامل رسوبات مزوزوئیک، توالی سنوزوئیک و محصولات گسترده‌اندزیتی-داسیتی ترشیر است. آهک‌های تریاس جنوب شرق مجاور گسل شمال شرق کوه غوره سفید، دماغه یک چین تاقدیسی با پلانژ SW را می-سازند که با گسل‌های متعدد با روندهای شمال غربی و شمال شرقی قطع شده‌اند. در فاصله‌ای دورتر به سمت شمال شرق نقشه کوه‌سرخ، سنگ‌های پرمین-تریاس پهنه لوت به شدت برش خورده و تا حدی دگرگون شده‌اند و با مرز گسلی در مجاورت کمربند فلیش-ملانژ شرق ایران قرار گرفته‌اند. یک کنگلومرای قاعده‌ای با ناپیوستگی زاویه‌دار شیل و سیلتستون‌های تریاس را پوشانده است. این واحد کنگلومرای قاعده یک مجموعه آتشفشانی ضخیم با سن چینه‌شناسی پالئوژن می‌باشد که به طور وسیع بخش‌های مرکزی و شمالی لوت را پوشانده است (شکل ۱-۱c).

هنوز اتفاق نظر وجود ندارد. به طوری که برخی زمان برخورد لوت و افغان را ائوسن میانی (Camp and Griffis, 1982; Tirrul et al., 1983) و برخی دیگر به اواخر کرتاسه (Zarrinkoub et al., 2012; Angiboust et al., 2013, Bonet et al., 2018) اشاره کرده‌اند. این در حالیست که باقری و دامنی گل (Bagheri and Damani Gol, 2020) کوهزاد پالئوژن شرق ایران را به عنوان یک اروکلاین ثانویه معرفی کرده‌اند. در این مدل، بسته‌شدن بخش گوه‌ای نئوتتیس حاصل نزدیکی و تماس دو یال در حال خمش لوت و افغان در نظر گرفته شده و نه نوعی برخورد دو قاره که در کوهزادهای برخوردی خطی رایج است.

منطقه سه‌چنگی در غرب بیرجند و جنوب خوسف قرار دارد. در نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ سه‌چنگی (Azimi and Saidy, 1975) این محدوده شامل رخنمون‌هایی از واحدهای سنگ‌چینه‌ای پرمین تا عهد حاضر است که همراه با نبوده‌های چینه‌شناسی متعددی است (شکل ۲). واحدهای آتشفشانی ترشیر و نهشته‌های آواری قاره‌ای کواترنر بخش وسیعی از منطقه را پوشانده است. تنها رخنمون محدودی از



شکل ۱- a) موقعیت جغرافیایی رشته کوه‌های شرق ایران (EIO) نسبت به خردقاره‌های مجاور و سرزمین سیمیرین. b) موقعیت منطقه سه‌چنگی نسبت به پهنه‌های ساختاری ایران. YB: بلوک یزد، AJ: سرزمین انارک-جندق، TB: بلوک طبس، Sq: کمپلکس ساغند، BPT: راندگی بامپوشت، DFS: سیستم گسل درونه، DBF: گسل دهشیر-بافت، HF: گسل هرات، HRF: گسل هریرود، KF: گسل کلمرد، Nb: گسل نایبند، NF: گسل نه‌بندان-نصرت‌آباد، PbF: گسل پشت‌بادام، SF: گسل سیاهان. c) پهنه‌های زمین‌ساختی بخش مرکزی-شرقی ایران، افغانستان و بخش غربی هند (با تغییرات از Bagheri and Damani Gol, 2020). کادر سفیدرنگ منطقه سه‌چنگی است که در شکل ۲ بزرگنمایی شده است. علائم روی نقشه: EIO: کوهزاد شرق ایران، SZ: پهنه سبزواری، SC: کمپلکس ساغند، Q: کمر بند نابرجای قائن، SK: گرانیت ژوراسیک شاهکوه، SS: پهنه سنندج-سیرجان، MR: جزیره قوسی ماهیرود،

Nc: کمپلکس نه‌بندان، Rc: کمپلکس راتوک، YZ: پهنه یزد، AJ: سرزمین انارک-جندق، UD: کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر، K: کمپلکس خاش، Kd: پهنه کپه داغ، Ka: آتشفشانی‌های کارواندر، Z: کمر بند گرانیتی زاهدان، WL: کمر بند آتشفشانی-نفوذی غرب لوت، WP: کمر بند افیولیت-فلیش وارس-پنجاو، IM: مکران داخلی، EIO: کوهزاد شرق ایران.

Fig.1. a) Geographical position of the Eastern Iranian Orogen (EIO) in relation to the nearby lands and the Cimmerian terrains. b) The position of the Sechengi region (white box) in relation to the tectonic zones of Iran. 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: Harirrud Fault, KF: Kalmard Fault, Nb: Nayband Fault, NF: Nosrat-Abad Fault, PbF: Posht-badam Fault, SF: Syahan Fault. c) Schematic map of Central-East Iran, Afghanistan, and the western part of the Indian plate (Bagheri and Damani Gol, 2020). Abbreviations are as follows: Aj, Anarak-Jandaq terrane; IM, Inner Makran zone; Ir, Iranshahr mélangé; K, Khash Complex; Ka, Karvandar volcanics; Kn, Kandahar volcanic arc; Ks, Kaskin basin; Mr, Mahi-Rud Complex; Q, Qaen allochthonous belt; Rc, Ratuk Complex; Nc, Neh Complex; S, Sefidabeh basin; Sc, Saghand Complex; Sk, Shah Kuh pluton; SS, Sanandaj-Sirjan zone; Sz, Sabzevar zone; UD, Urumieh-Dokhtar magmatic belt; WL, West Lut volcano-plutonic belt; WP, Waras-Penjaw ophiolite-flysch belt; Yz, Yazd block; Z, Zahedan granitic belt. The abbreviations in the inset are as follows: EIO: Eastern Iranian Orogen; Lu, Lut block; Mk, Makran zone; SSZ, Sistan suture zone; UDB, Urumieh-Dokhtar magmatic belt; Yz, Yazd block; EIO: Eastern Iranian Orogen.

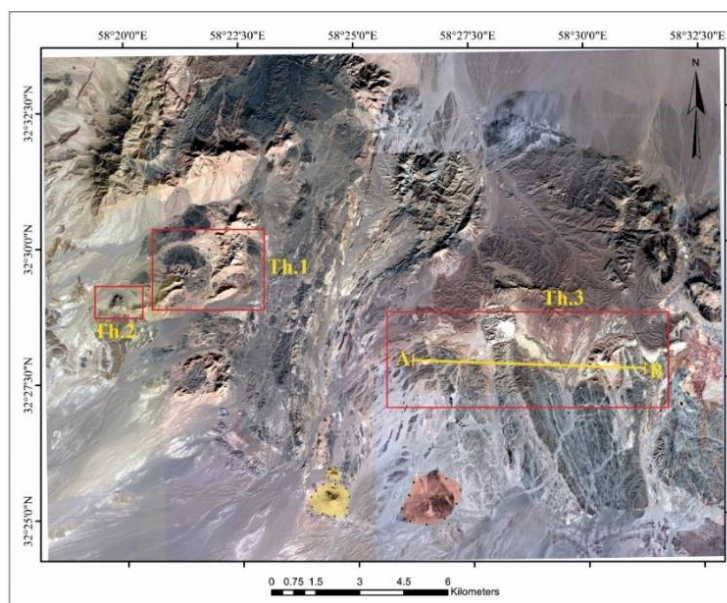
تحلیل جنبشی راندگی‌ها

ساختارهای اصلی در منطقه مورد مطالعه شامل صفحات راندگی، سفره‌های رورانده، بازمانده‌های تکتونیکی، چین‌خوردگی‌های مجدد، تورق‌های برشی نافذ و گسلش امتدادلغز مزدوج می‌باشد. این ساختارها عمدتاً در شیل و آهک‌های تریاس و در توربیدایت‌ها به وضوح رخنمون دارند. رخنمون‌هایی از سنگ‌های دگرگونی ناحیه‌ای درجه پایین که مربوط به پی سنگ لوت است نیز دارای کلیواژ و ریزچین هستند. به منظور مطالعه ساختارهای راندگی، محدوده‌های مطالعاتی انتخاب شده بر روی

تصویر ماهواره‌ای منطقه سه‌چنگی با علائم Th.1 تا Th.3 در شکل ۲ نشان داده شده است.

راندگی‌های بخش غربی منطقه دارای روند کلی N50E و شیب میانگین ۵۵ درجه به سمت شمال غرب هستند به طوری که آهک‌های تریاس بر روی میکرودیوریت‌های تکتونیزه ژوراسیک رانده شده‌اند. در مرز بین این دو واحد، یک پهنه برشی شکننده وجود دارد و برش گسلی تشکیل شده است (شکل ۳). در این منطقه، پهنه‌های بازمانده تکتونیکی متعددی بر روی گرانیتوئیدها قابل مشاهده است (شکل‌های ۳- a تا e). گرانیتوئیدهای این محدوده بر روی نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ جنوب سه‌چنگی

مشخص نشده و به اشتباه به عنوان واحدهای شیل-ماسه‌سنگ تریاس معرفی شده‌اند. بر اساس مطالعه مقاطع نازک میکروسکوپی کانی‌های اصلی سازنده این سنگ‌های آذرین شامل پلاژیوکلاز، آلکالی فلدسپار و کوارتز به همراه کانی مافیک آمفیبول است. همچنین این سنگ‌ها بافت میکروگرانولار دارند بنابراین نام میکرودیوریت برای آن انتخاب شده است (شکل ۳- f).



شکل ۲- تصویر ماهواره ای Landsat 8 (ترکیب باندی ۱-۴-۷) منطقه سه‌چنگی و محدوده‌های انتخاب شده برای مطالعه پهنه‌های راندگی (Th). خط AB راستای پیمایش صحرایی در محدوده Th.4 را نشان می‌دهد.

Fig. 2. Landsat 8 (1-4-7) satellite image of the Sechengi area and selected regions for the study of thrust sheets. Th.: thrust. AB: Profile for structural study in Th.4 area.

تریاس با یک پهنه چند ده‌متری از آهک‌های خرد، برشی و دولومیتی شده از فرودپواره شیلی خود جدا

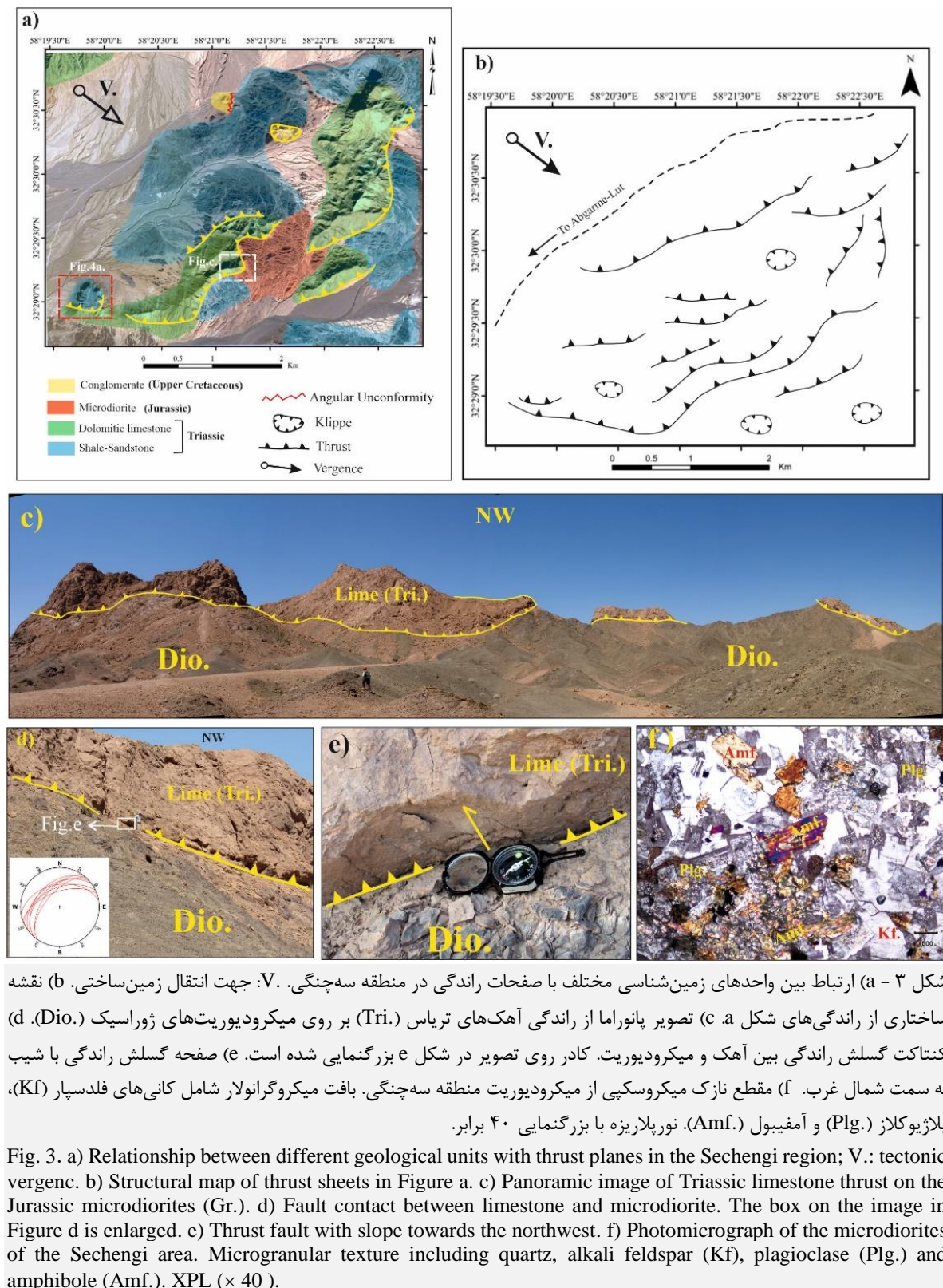
در محدوده غربی که در منطقه آبگرم لوت رخنمون دارد (علامت در Th.2 در شکل ۲) آهک‌های

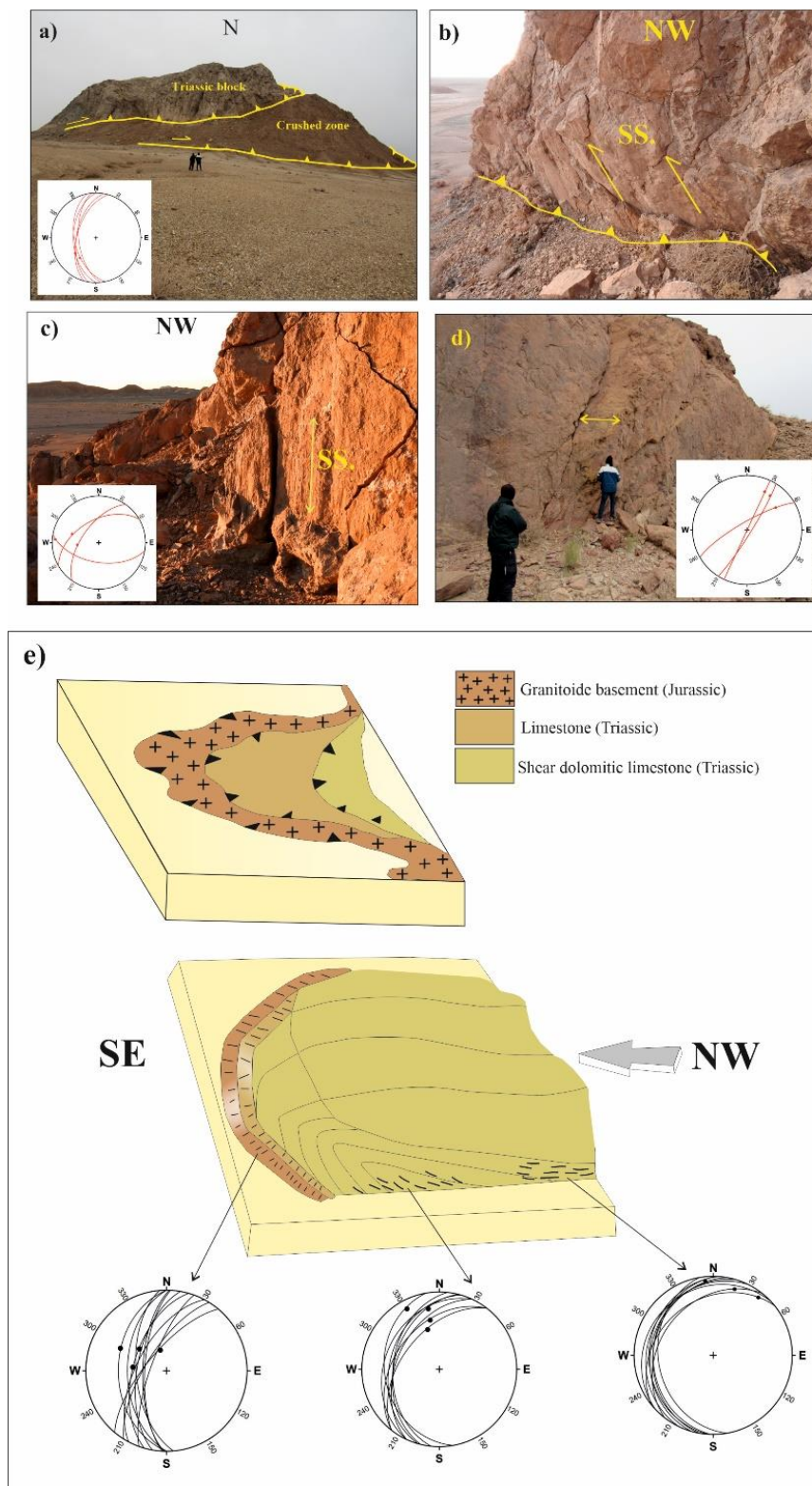
شده است (شکل ۴-ا). امتداد باقیمانده رخنمون این راندگی شمالی- جنوبی و شیب آن به سمت غرب می‌باشد. در حاشیه این راندگی گسل قائم مشاهده می‌شود که خش‌لغزهای آن تقریباً افقی تا نیمه افقی است و به نظر می‌رسد گسل‌های تراگذر راندگی (Tear fault) و یا بخش جانبی راندگی (Lateral thrust) باشد (شکل ۴-ب و ۴-د). در بخش پیشانی جببه راندگی خش‌لغزها حالت قائم دارند (شکل ۴-ج). در شکل ۴-ع تصویر شماتیک از وضعیت هندسی ساختارهای این برکه راندگی ترسیم شده است.

در بخش شرقی منطقه مورد مطالعه واحدهای زمین‌شناسی متعلق به دو واحد زمین‌ساختی شرق ایران هستند: الف- توربیدایت‌ها و ملائزهای کرتاسه فوقانی مربوط به پهنه فلیش شرق ایران. ب- واحدهای متعلق به پهنه لوت. در این بخش از منطقه سه‌چنگی ساختارهایی با اشکال کشیده و کانال‌مانند و با جهت‌یابی شمالی-جنوبی با مرزهای گسلی دندان‌ای و خمیده کنار هم قرار گرفته‌اند (شکل ۵). وجود سفره‌های رورانده، چین‌های برگشته و خوابیده، تورق‌های برشی مرتبط به گسلش رانده، و ساختارهای شکل‌پذیر نظیر کلیواژ دگرگونی و ریزچین‌ها از مهم‌ترین ساختارهای موجود در این بخش از منطقه سه‌چنگی است. در شکل ۵ ارتباط این ساختارهای اصلی نشان داده شده است. به نظر

می‌رسد واحدهای توربیدایتی و دگرگونی این محدوده در اثر تحمل دگرریختی خمیده شده‌اند. بر روی تصویر ماهواره‌ای نیز مرز دندان‌ای آنها با واحدهای ائوسن شمال محدوده قابل مشاهده است (شکل ۵). دگرشکلی شکل‌پذیر در توربیدایت‌های کرتاسه فوقانی این محدوده شامل چین‌های خوابیده و سفره‌های رورانده است و این دگرریختی‌ها متأثر از برکه‌های راندگی‌ها ایجاد شده‌اند (شکل ۶).

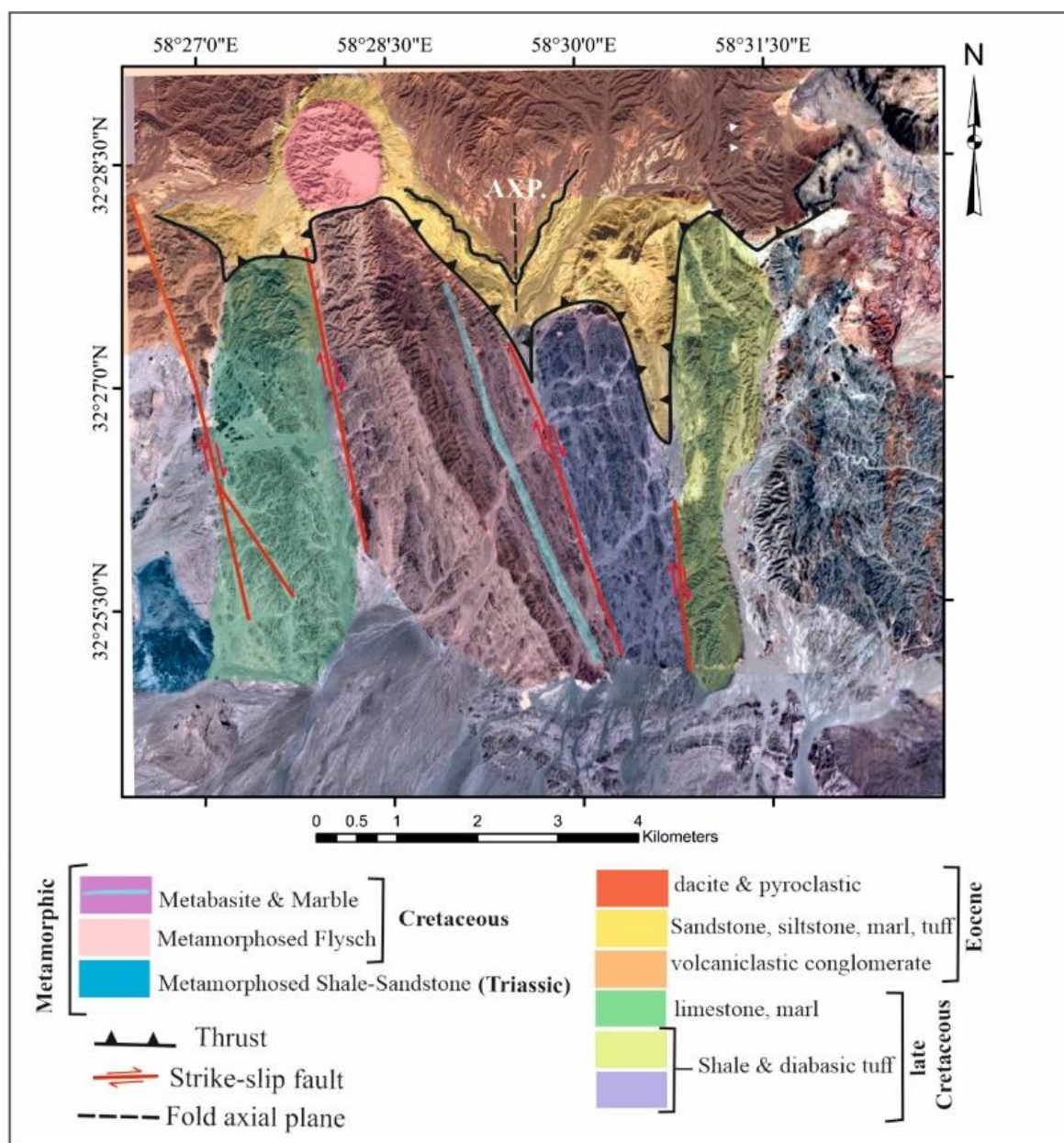
بر اساس مشاهدات صحرائی، سفره‌های رورانده متعددی در این بخش از منطقه وجود دارند به طوری که جهت تمایل و برگشتگی چین‌ها هم به سمت غرب (شکل ۶-ا و ب) و هم به سمت شرق است (شکل ۶-ج و د). در واقع چین‌های خوابیده و سفره‌های رورانده در این محدوده در اثر یک نوع فشارش و خمش، به هر دو سمت شرق و غرب دچار راندگی و پس‌راندگی شده‌اند. چنین ساختارهایی همان ساختارهای Frontal thrust و Back thrust می‌باشند (شکل ۶-د). همچنین گسلش راندگی سبب شده است که سنگ آهک‌های کرتاسه بر روی متابازیت‌های دگرگونی نیز رانده شوند (شکل ۶-ه). از مشخصات بارز این راندگی‌ها وجود دو دسته خش‌لغز است که حاکی از دو مرحله جنبش گسلی و فعال شدن مجدد راندگی‌ها طی حوادث دگرشکلی بعدی می‌باشد (شکل ۶-ف).





شکل ۴-ا) راندگی آهک تریاس (Tri.) و پهنه خرد شده گسلی در منطقه سه‌چنگی (محدوده Th.2 در شکل ۲). ب) راندگی جانبی با خش‌لغزهای مایل و شیب صفحه گسل به سمت شمال غرب. ج) نمای از جبهه راندگی با خش‌لغزهای قائم و استریوگرام آن. د) خش‌لغزهای نیمه افقی در بخش جانبی راندگی. ه) تصویر شماتیک از پهنه راندگی و وضعیت خش‌لغزهای موجود در بخش پیشانی (جبهه) و جانبی برکه‌های راندگی به همراه استریوگرام‌های مربوطه. علامت پیکان: جهت انتقال زمین‌ساختی در منطقه.

Fig. 4.a) Thrusting of Triassic limestone and crushed zone in the Sechengi (Th.2 in Fig.2). b) Inclined slickenline in lateral thrust. c) Vertical slickenline in thrust toe. d) Sub-horizontal slickenline in lateral thrust. e) Schematic figure of thrust sheet and slickenlines in frontal and lateral thrust and recumbent fold. arrow: regional tectonic transport (vergence).

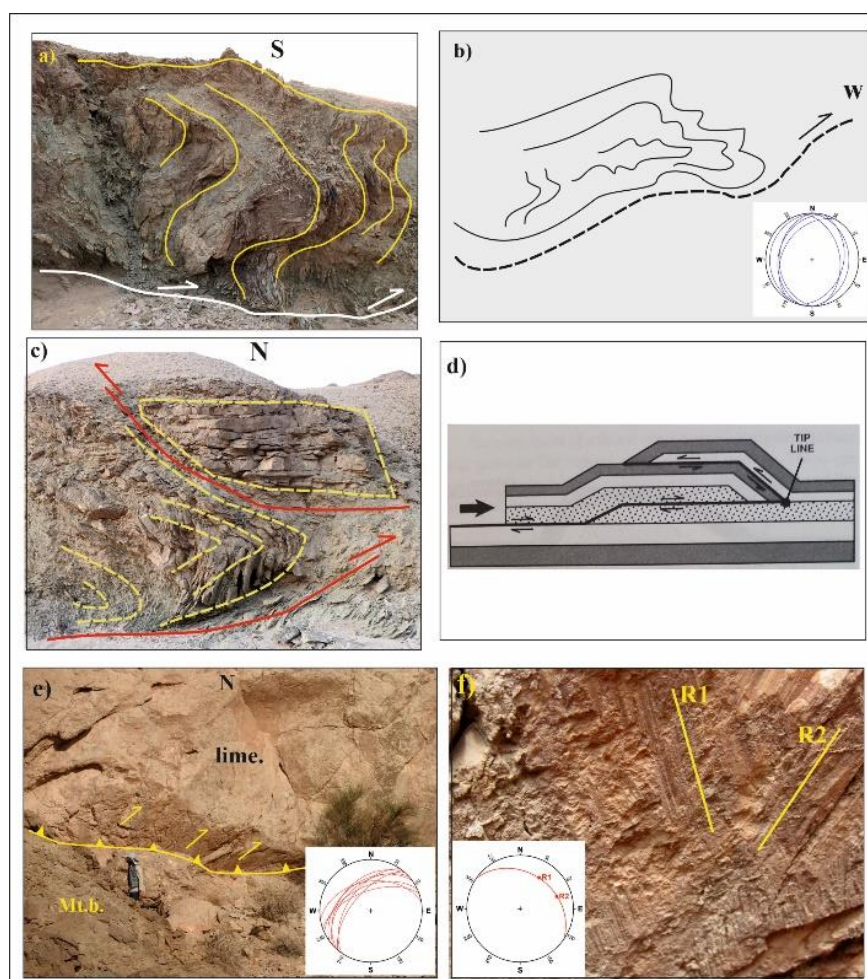


شکل ۵- تصویر ماهواره‌ای از ساختارهای موجود در توربیدایت‌ها و دگرگونی‌های منطقه سه‌چنگی (Th.4 در شکل ۳).

Fig. 5. Satellite image of structures in turbidites and metamorphic rocks in the Sechengi area (Th.3 in Fig.2).

هستند اما سطح محوری نسل دوم راستای شمال غرب دارند و امتداد راندگی‌ها را قطع می‌نمایند (شکل ۷).

در منطقه سه‌چنگی دو نسل چین‌خوردگی وجود دارد به طوری که سطح محوری نسل اول راستای شمال شرق دارند و موازی امتداد راندگی‌های جوان‌تر



شکل ۶- a و b) سفره رورانده و چین‌های برگشته در توربیدایت‌های دگرگونی کرتاسه با تمایل به سمت غرب و تصویر شماتیک و استریوگرام سطح محوری چین‌های آن. c) راندگی و پس‌راندگی در رسوبات فلیشی شیل و ماسه‌سنگ. d) تصویر شماتیک از شکل c. ساختار گوه راندگی (McClay, 1992). e) راندگی سنگ آهک‌های کرتاسه (Lim.) بر روی متابازیت‌های (Mt.b.) منطقه سه‌چنگی. f) تصویر دو دسته خش‌لغز در صفحه راندگی و استریوگرام صفحه گسلش و موقعیت خش‌لغزها بر روی آن (R).

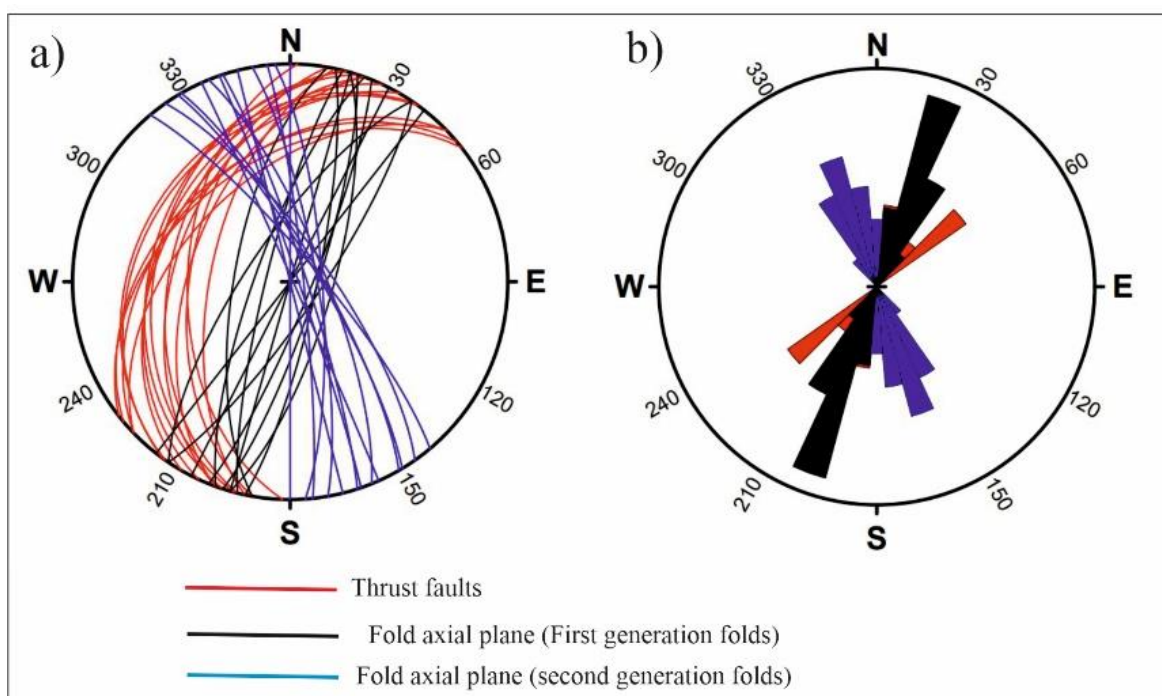
Fig. 6. a, b) The nappes and overturned folds in the Cretaceous metamorphic turbidites with schematic image and fold axial plane stereogram. c) Thrust and backthrust in flysch-type shale and sandstone sediments. d) Schematic model for Figure c (from McClay, 1992). e) Thrusting of Eocene limestones (Lim.) on the metabasites (Mt.b.) in the Sechengi area. f) Two sets of slickenlines on the thrust fault plane.

خردشدگی و گردشدگی آلکالی فلدسپارها (شکل ۸- a و b) است. وجود ساخت روبانی (Anastomosing)، میکافیش بیوتیت و ساختارهای صفحات برشی S-C از دیگر خصوصیات این میلونیت‌ها می‌باشد (شکل ۸- c). طبق مطالعات میکروسکوپی به نظر می‌رسد سنگ اولیه یک گرانیتوئید بوده که حداقل رخداد سه فاز دگرشکلی نیمه‌شکل‌پذیر تا شکننده را از عمق تا سطح متحمل شده است. فاز اول که داخل

طبق مشاهدات صحرایی و نقشه زمین‌شناسی، سنگ‌های دگرگونی این محدوده شامل متابازیت و معادل دما بالاتر آن، گرانیت میلونیتی، فلیش‌های کمی دگرگون شده کرتاسه، شیل و ماسه‌سنگ تریاس با درجه پایین دگرگونی می‌باشند. ریزساختارهای سنگ‌های میلونیتی در مقاطع نازک (شکل ۸) حاصل جهت‌یابی کانی‌های کوارتز- فلدسپاری، تجدید تبلور کوارتز، ماکل‌های دگرشکلی در پلاژیوکلازها،

راستای فاز اول (S1) قرار گرفته است (شکل ۸-ا و b). فاز سوم دگرشکلی (S3) شکستگی‌های کششی-برشی هستند که تمام درشت بلورها و بافت سنگ را تحت تأثیر قرار داده و راستای فاز S2 را نیز قطع نموده است (شکل ۸- c و d).

پورفیروکلاست‌های خرد و گرد شده وجود دارد حاصل جهت‌یابی ادخال‌های اولیه درون این درشت بلورها است که همان S1 تلقی می‌شود (شکل ۸- a). فاز دوم (S2) که حاصل جهت‌یابی کانی‌های کوارتز-فلدسپاری خرد شده است در راستای تقریباً عمود بر



شکل ۷- a) استریوگرام صفحات گسل راندگی و سطح محوری چین‌های نسل اول و دوم در منطقه سه‌چنگی. b) رزداگرام نشان دهنده جهت‌یابی راندگی‌ها و دو نسل چین‌خوردگی محدوده مورد مطالعه.

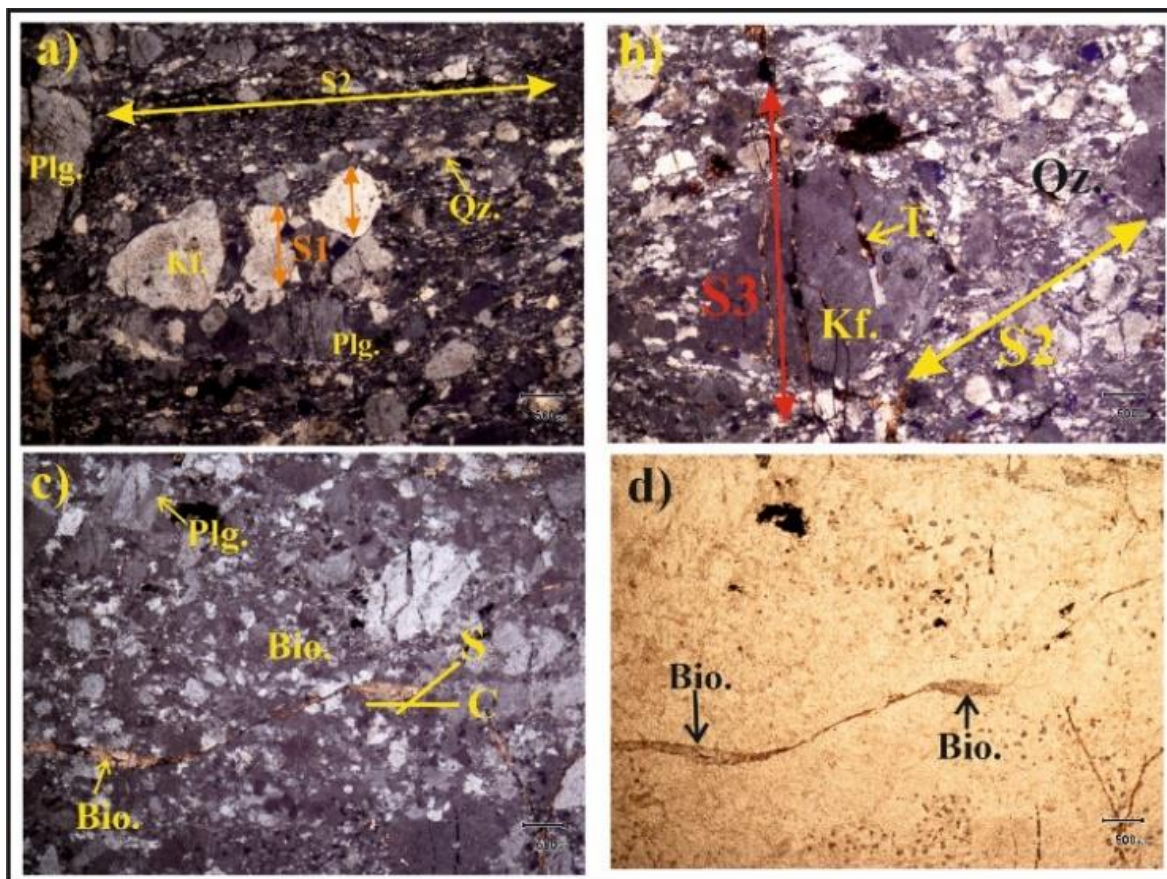
Fig. 7. a) Stereogram of thrust fault plane with first- and second-fold axial plane in the Sechengi area. b) Rose diagram of thrusts and folds axial plane in study area.

فشرده و تنگ 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 خم‌شدگی نشان می‌دهند (به عنوان مثال در اطراف گرانیات

تکامل زمین‌ساختی

بطور ساده تاریخچه دگرشکلی شرق ایران را می‌توان حاصل رخداد سه حادثه دگرشکلی اصلی دانست که در شکل ۹ بصورت خلاصه نشان داده شده است (Keshtgar, et al., 2018; Keshtgar et al., 2021; Bagheri and Damani Gol, 2020). حادثه دگرشکلی اول که منجر به تشکیل چین‌های هم شیب

زاهدان، سنگ‌های دگرگونی بشدت دگرشکل شده بر روی توالی‌های غیر دگرگونی رانده شده‌اند).



شکل ۸- مقاطع نازک میکروسکوپی میلونیت‌های منطقه سه‌چنگی. (a) بافت میلونیتی حاصل خردشدگی کانی‌های کوارتز-فلدسپاری، پورفیروکلاست‌های آلکالی فلدسپار (Kf) و پلاژیوکلاز (Plg.)، فازهای اول (S1) و دوم (S2) دگرشکلی نیز نشان داده شده‌اند. (b) کوارتزهای تجدید تبلور یافته (Qz) که در راستای S2 جهت‌یابی یافته‌اند. شکستگی‌های کششی-برشی در پورفیروکلاست آلکالی فلدسپار (Kf.) و در بافت سنگ که متأثر از فاز سوم دگرشکلی (S3) ایجاد شده است. (c و d) ساختارهای برشی نوع S-C به همراه میکافیش بیوتیت (Bio.) با ساخت روبانی. تصاویر a و b و c: نورپلاریزه با بزرگنمایی ۴۰ برابر.

Fig. 8. Thin sections of mylonites in Sechengi area. a) Mylonitic texture resulting from the sheared quartz-feldspar minerals, alkali feldspar porphyroclasts (Kf) and plagioclase (Plg.). The first (S1) and second (S2) deformation phases are also shown. b) Recrystallized quartz (Qz) oriented along S2. Tensile-shear fractures in feldspar porphyroclast (Kf.) and in the texture were affected by the third metamorphic phase (S3). c) S-C shear bands, biotite mica fish (Bio.) and anastomosing texture; Images a, b and c: XPL ($\times 40$).

اٲوسن میانی در پهنه سیستان فراگیر است و چین‌های هم شیب تنگ اٲوسن میانی-بالایی در توالی‌های آتشفشانی-رسوبی قرمز و سبز رنگ بخش

فرورانش رو به شمال نئوتتیس به زیر بلوک‌های لوت-افغان عامل اصلی کوتاه شدگی در راستای شمالی-جنوبی بوده است. رخداد راندگی‌ها در زمان

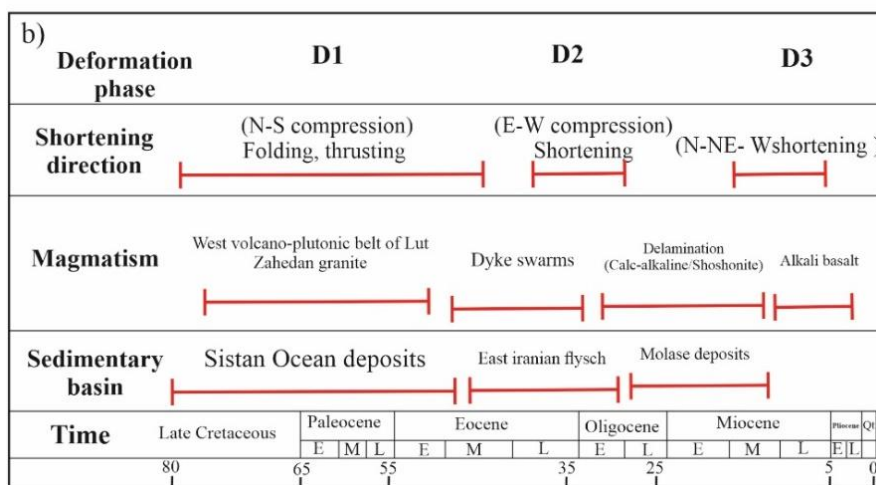
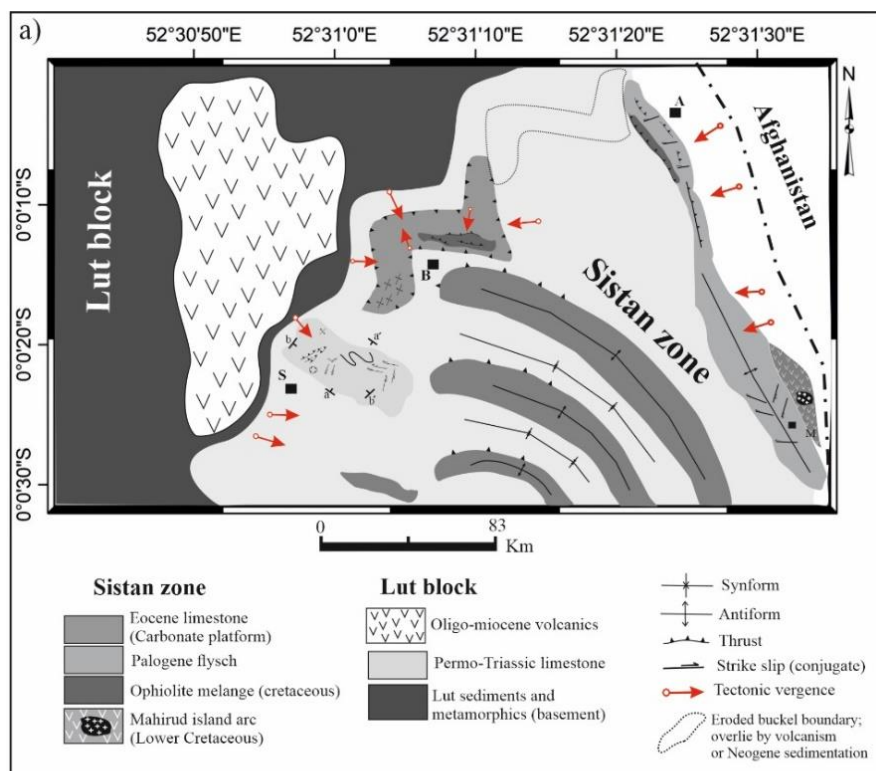
است. رخنمون‌های ناحیه‌ای از چین‌های تداخلی که مشابه چین‌های برهم‌نهاده تیپ I و II رمزی است، در منطقه ماهیرو (Keshtgar et al., 2015) و نیز در فلش‌های کرتاسه در مناطق بندان و کمپلکس خاش در بلوچستان مطالعه شده‌اند (Bagheri and Damani Gol, 2020).

حادثه دگرشکلی سوم منجر به تشکیل گسل‌های امتدادلغز راستگرد و چین‌خوردگی نهشته‌های قاره‌ای نئوژن شرق ایران شده است. این گسل‌های مزدوج شامل روند NNE با حرکت امتدادلغز راستگرد 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 گاهی همراه با ولکانیسم هستند (نظیر گسل نه شرقی و غربی، گسل نایبند، گسل نصرت آباد و گسل کهورک).

با استفاده از داده‌های صحرایی برداشت شده، دو نیمرخ عرضی در راستای جنوب غرب-شمال شرق و در راستای شمال غرب-جنوب شرق از منطقه سه‌چنگی ترسیم گردید (شکل ۱۰-a و ۱۰-b). با تلفیق داده‌های بدست آمده، مدل تکامل تکتونیکی مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت-سیستان در محدوده سه‌چنگی در شکل ۱۰-c تا ۱۰-f ارائه شده است.

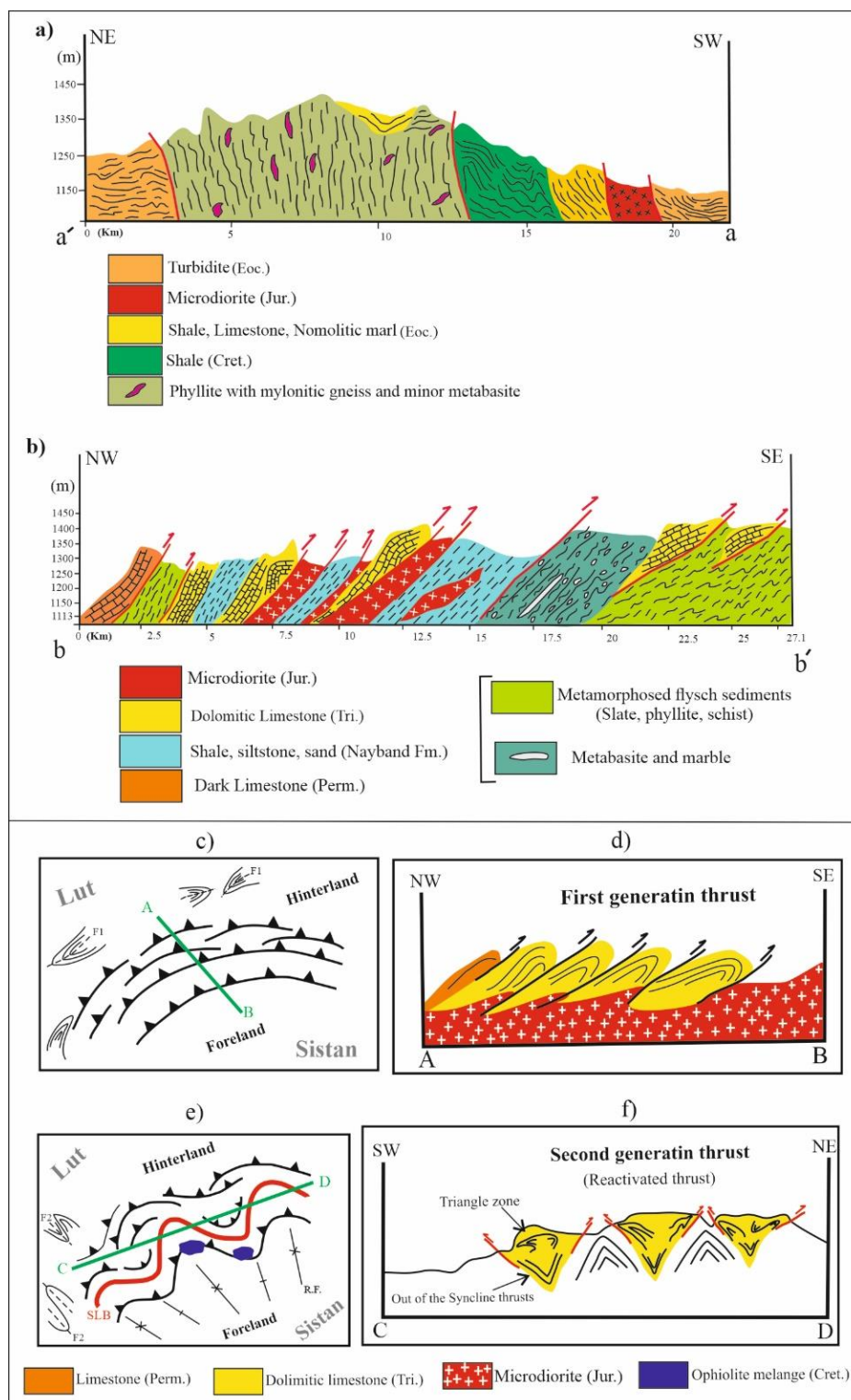
شمالی مرز لوت و سیستان نظیر کمربند نابرجای قائن به خوبی گسترش یافته‌اند.

حادثه دگرشکلی دوم که اواخر پالئوژن در جهت شرقی-غربی رخ داده است، ناشی از برخورد قاره هند با اوراسیا بوده که منجر به چرخش و انتقال بلوک‌های افغان و لوت شده است. نتیجه این رخداد، خمیده شدن ساختارهای قبلی از جمله سطح محوری چین‌های نسل اول (که راستای سطح محوری شرقی-غربی داشته‌اند) است که 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 نموده‌اند که جهت انتقال تکتونیکی به سمت SSE را نشان می‌دهند. الگوهای چین‌های سینوسی (کمربند نابرجای قائن) و پشته‌های تکتونیکی (Ridge) بزرگ مقیاسی در شمال پهنه سیستان (بیرجند) وجود دارد که همراه با کلیواژ فراگیر در هسته چین‌ها بوده و در حادثه دوم دگرشکلی ایجاد شده‌اند. تشکیل چین‌های 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 پوخته شرق ایران در اواخر ائوسن-اوایل الیگوسن منجر به تشکیل الگوهای تداخلی چین‌های برهم‌نهاده از نوع گنبد و حوضه شده که در توربیدایت‌های شرق ایران به وضوح قابل مشاهده



شکل ۹- a) نقشه ساختاری مرز خمیده شمالی پهنه‌های لوت و سیستان و محدوده سه‌چنگی، که ساختارهای بزرگ مقیاس ناحیه‌ای شامل چین‌های برهم‌نهاد و راندگی‌های نسل دوم را نشان می‌دهد. راستای نیمرخ‌های عرضی ساختاری ترسیم شده در شکل ۱۱ نیز بر روی شکل نشان داده شده است. علایم: B: بیرجند، A: آهانگران، S: سه‌چنگی. 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 دامنی گل (Bagheri and Damani Gol, 2020).

Fig. 9. a) Structural map of the Sechengi area which includes large-scale regional structures with refolds and second-generation thrusts. See Figure 11 for structural profiles. B: Birjand; A: Ahangaran; S: Sechengi b) Time chart for the temporal relation between successive deformation, shortening direction, the age of various magmatic pulses, and the age of sedimentary basins during the Eastern Iranian orogeny. Modified from Bagheri and Damani Gol (2020).



شکل ۱۰ - (a و b) نیمرخ‌های عرضی ترسیم شده از منطقه سه‌چنگی. موقعیت نیمرخ‌ها در شکل ۱۰ نشان داده شده است. c تا f) مدل تکامل تکتونیکی منطقه سه‌چنگی در مرز خمیده شمالی پهنه‌های ساختاری لوت-سیستان که عبارتند از: c) هندسه راندگی‌ها و چین‌های موازی نسل اول از حادثه دگرشکلی اول در زمان پالئوژن میانی. d) مقطع عرضی از شکل c که خصوصیات برگه‌های راندگی نسل اول

و جهت انتقال زمین‌ساختی نشان داده شده است. e) هندسه ساختارها پس از رخداد حادثه دوم دگرشکلی در زمان ائوسن میانی که در اثر خمش ناحیه‌ای منجر به تشکیل چین‌های شعاعی، فعال شدن و چین خوردگی مجدد راندگی قبلی شده است. f) مقطع عرضی از شکل e که نوع و جهت‌یابی نسل دوم دگرشکلی را نشان می‌دهد (رخنمون ساختارهای Triangle zone در مرز دندان‌های شکل ۶ قرار دارد).

Fig. 10. a, b) Sechengi Cross-sections. See Figure 10 for aa' and bb' profiles. c, d, e, f) Sechengi tectonic model in the northern curved border of the Lut-Sistan zones: c) Geometry of first-generation thrusts and parallel folds in the Lut-Sistan border resulting from the occurrence of first deformation event in the middle Paleocene. d) Cross-section from Figure c showing the properties of thrust sheets and the direction of tectonic vergence. e) Geometry of the structures after the occurrence of second deformation event in the Middle Eocene, which resulted in the formation of radial folds, reactivation and refolding of the previous thrust due to regional buckling. f) Cross-section of Figure e showing the type and orientation structures caused by the second deformation phase (see sigmoidal boundary in Figure 6 for Triangle zone position).

بزرگ‌مقیاس مخروطی (چین‌های شعاعی) منطقه با

نتیجه‌گیری

راستای شمال غربی دوباره توزیع شده‌اند. برخی از تراست‌های جوان از سیستم فرار از ناودیس تبعیت می‌کنند. تورق‌های سطح محوری و تورق‌های برشی نافذ با راستای شمال غرب که هر دو به ترتیب به سمت شمال شرق و جنوب غرب شیب دارند به موازات سطح محوری چین‌های نسل دوم و امتداد راندگی‌های جوان‌تر ظاهر شده‌اند. مطالعات ساختاری خاطر نشان می‌سازند که جهت انتقال زمین‌ساختی از شمال غرب به جنوب شرق و از خارج کوهزاد به سمت داخل آن به وقوع پیوسته است و در مرز شمالی پهنه‌های لوت و سیستان حالت همگرا دارد. چنین حوادث دگرشکلی پیاپی عمود بر یکدیگر با مدل‌های کوهزادهای ساده خطی ارائه شده برای شرق ایران (مدل شکستن و بازشدگی پوسته قاره‌ای شرق ایران و برخورد خطی) همخوانی ندارد و بیشتر منطبق بر مدل خمیدگی کوهزاد (اوروکلاین) می‌باشد.

قدردانی

این پژوهش بخشی از دستاوردهای رساله دکتری نویسنده اول مقاله در دانشکده علوم دانشگاه بیرجند

در منطقه سه‌چنگی توالی‌های رسوبی تخریبی و کربناته تریاس (معادل سازندهای ناینند و شتری) همراه با رخنمون‌های پراکنده‌ای از آهک‌های پرمین (معادل آهک جمال) و سنگ‌های دگرگونی در حد رخساره شیبست سبز متعلق به پی‌سنگ لوت وجود دارد که مرزهای رانده با سنگ‌های جوان‌تر دارند. چین‌ها و راندگی‌های نسل اول همراه با تورق اسلیتی (چین‌های موازی) به موازات لبه لوت با راستای عمومی شمال شرقی ظاهر شده‌اند. شیب اغلب تراست‌ها به سمت شمال غرب بوده به طوری که واحدهای پرمو-تریاس درون لوت بر روی سنگ‌های جوان‌تر از جمله گرانیتوئیدهای ژوراسیک قرار گرفته‌اند. راندگی‌های جوان‌تر نسل دوم در اثر حادثه دگرشکلی دوم یا به طور مستقیم شکل گرفته و یا راندگی‌های قدیمی‌تری بوده‌اند که دوباره فعال شده و چین خورده‌اند؛ به طوری که اغلب دو یا چند دسته خش‌لغز در سطح این راندگی‌ها قابل تشخیص است. راندگی‌های اخیر در راستای عمود بر لبه لوت و به موازات سطح محوری نسل دوم چین‌های

به شماره طرح ۷۹۱۲ است و از دانشگاه بیرجند بابت حمایت از این رساله قدردانی می‌شود.

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 mélange (Eastern Iran). *Lithos* 156(159), 139–158.
- Azimi, M.A., Saidy, A., 1975. Shechangi Quadrangle map, Scale: 1/100000, sheet 7655, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Bagheri, S. Damani Gol, S.H., 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.
- Coward, M.P., Rex, D.C., Asif Khan, M., Windley, B.F., Broughton, R.D., Luff, I.W., Petterson, M.G., Pudsey, C.J., 1986. Collision tectonics in the NW Himalayas. *Geological Society of London, Special Public* 19, 203–219.
- Ezati, M., Gholami, E., Mousavi, M., 2020. Paleostress regime reconstruction based on brittle structure analysis in the Shekarab Mountain, Eastern Iran. *Arabian Journal of Geosciences* 13(23), 1-18.
- 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.
- Fossen, H., 2010. *Structural Geology*. Cambridge University Press.
- Gibbons, A.D., Whittaker, J.M., Dietmar Müller, R., 2013. The breakup of East Gondwana: assimilating constraints from Cretaceous ocean basins around India into a best-fit tectonic model. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 118 (3), 808–822.
- 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., 2018. Kinematic study of the fold-thrust belt on the curved northern border of the Sistan Suture zone with the Lut block; Ph.D. thesis, University of Birjand.
- 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.
- Keshtgar, SH., Bagheri, S., Boomeri, M., 2015. Tectonic history of the Mahi Rud (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 Mahi Rud Volcano-plutonic Complex: Different insight into the geodynamic history of Eastern Iran. *Scientific*

- Quarterly Journal of Geosciences 29(113), 131-144. In Persian.
- 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.
- McClay, K.R., 1992. Thrust tectonics, Chapman & Hall, London.
- Mousavi, M., Alavi, A., Khatib, 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.
- 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.
- 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.
- Royden, L.H., 1993. The tectonic expression slab pull at continental convergent boundaries. *Tectonics* 12 (2), 303-325.
- Rowshanravan, J., 2006. Mousaviyeh Quadrangle map, Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- Siddiqui, R.H., Qasim Jan, M., Asif Khan, M., 2012. Petrogenesis of Late Cretaceous lava flows from a Neo-Tethyan island arc: The Raskoh arc, Balochistan. Pakistan. *Journal of Asian Earth Science* 59, 24–38.
- Siehl, A., 2015. Structural setting and evolution of the Afghan orogenic segment – a review. *Geological Society of London*. 427, 57–88.
- 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.
- Stampfli, G.M., Hochard, C., Vérard, C., Wilhem, C., von Raumer, J., 2013. The formation of Pangea. *Tectonophysics* 593, 1–19.
- Stocklin, J., 1972. Iran Central, septentrional et oriental, *Luxique stratigraphique International III. Fascicule 9b, Iran, center national de la Recherche scientifique*, 1-283.
- 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.
- Vahdati Daneshmand, F., Kholghi, M., 1987. Khusf Quadrangle map. Scale: 1/100000, Geological Survey of Iran, Tehran.
- 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.