



Research Article

Geometric investigation and kinematic analysis of the Tuyeh-Darvar pop-up structure (in Southern slope of Eastern Alborz)

Elahe Taheri¹, Ebrahim Gholami^{1*} , Ali Yassaghi²

1-Department of Geology, Faculty of Sciences, University of Birjand, Birjand, Iran

2-Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Tarbiat Modares University, Tehran, Iran

Received: 19 Sep 2024 Accepted: 20 Jul 2025

Extended Abstract

Introduction

Alborz Mountains range in northern Iran is an arc that extends from the end of Talesh in the west to its intersection with the Kopeh Dagh Mountains in the east (Jackson et al, 2002). (Alavi, 1996) introduced the mountains as a multi-orogen belt that has been influenced by the Cimmerian and Alpine orogenies from Late Triassic to Oligo-Miocene. Detailed structural studies in the mountains indicate it has been suffered inversion tectonics (Zanchi et al, 2006; Yassaghi and Madanipour, 2008; Gholami et al, 2016).

Materials and Methods

The geological map of the study area has been constructed based on the present geological maps of Kiasar (Akbarpour and Saeedi, 1991) and Jam (Alavi and Hamed, 1997), investigation of Landsat 8 satellite images with 15 meters spatial resolution, and detailed field mapping. Using the constructed geological map in this study, detailed field mapping, and Digital Elevation Model (DEM)¹ data, two cross-sections perpendicular to the general trend of the structures have been constructed. For fault kinematic analysis, Riedel shear fractures, fault steps, crescentic fractures, mineral fiber growth on fault surfaces, as well as stereographic analysis have been employed.

Results and Discussion

- Pop-up structure of Tuyeh Darvar Mountains:

The Tuyeh Darvar Mountains are bounded by the Mila Fault in the north and the Giv Fault in the south. These faults with opposite dip directions thrust the Lower Paleozoic and Mesozoic rocks over the younger Tertiary units. The Giv and Mila faults, with opposite dips, have uplifted the Paleozoic rocks and present a geometry similar to one introduced as inlier structure in the Taleghan Mountains (Annels et al, 1975). Structurally this geometry is known as pop-up structure, which is mostly formed by faulting during inversion tectonics (Mcclay, 1995). Since the displacement of backthrust is greater than that of the main fault in the inverted area (Conney et al, 1996), this geometry can be considered a characteristic of faulting related to inversion tectonics in the Tuyeh Darvar area. As a result of Mila's fault activity, in the eastern part, Upper Paleozoic rock units (Jeirud Formation) were thrust over Cenozoic rock units (Fajan Conglomerate) and in the western part, Mesozoic rock units (Lar Formation) were thrust over Cenozoic rock units (Eocene marls). From east to west, the strike of the fault changes from east-west to northeast-southwest. In the hanging wall of the Mila fault, the Tuyeh Fault has formed, causing the lower Paleozoic rock units to be thrust over the upper Paleozoic units in the western part, and over the Triassic rock units in the eastern part.

Citation: Taheri, E. et al, 2026. Geometric investigation and kinematic analysis of the Tuyeh-Darvar pop-up, *Res. Earth. Sci.* 16(4), (17-29) DOI: 10.48308/esrj.2021.101281

* Corresponding author E-mail address: egholami@birjand.ac.ir



The NE-striking Giv Fault with approximately 20 km in length forms the southern border of Tuyeh Darvar Mountains. As a result of the Giv fault activity, the deposits of the Shamshak Formation (Jurassic) and the Cretaceous limestone units have been thrust over the Eocene units. The dip angle of the Giv fault plane varies between 60 and 75 degrees to the north-west and has a left-lateral reverse mechanism.

The Darvar Fault in AA' section, has a dip of 75 degrees in the north-west of the Giv fault and has a left-lateral reverse mechanism. The Darvar Fault, as a hanging-wall branch of Giv fault, has caused Triassic rock units (Elika formation) to thrust over Jurassic rock units (Shamshak Formation).

- Tectonic evolution of Tuyeh Darvar Mountains:

Because of the early Paleozoic extension or Permian-Triassic peripheral bulge and formation of normal faults, the Giv Fault could have been formed during this process. Following the compressive phase in the Upper Cretaceous, reactivated the pre-existing normal faults and inverted them to reverse faults. The inversion effect of the Giv Fault is associated with the development of the Darvar Fault in its hangingwall. Consequently, the Mila Fault has formed as a backthrust to the Giv Fault and the Tuyeh Fault has also formed in the hangingwall of the Mila Fault. The inversion mechanism has been continued until Upper Eocene by considering the outcrops of the Paleocene and Eocene rocks in the footwall of the Mila and Giv faults. Continuation of convergence, since Miocene, through westward movement of the southern Caspian Block relative to central Iran causes reactivation of the left-lateral strike-slip faults.

Therefore, the Giv Fault has been formed during the early Paleozoic extensional phase or as a result of environmental uplift and the formation of normal faults in Eastern Alborz during the Permian-Triassic age. Closure of the Neo-Tethys Ocean (Upper Cretaceous), applied the compressive phase that renewed activity of the pre-existing normal faults and their inversion. Therefore, the Giv Fault could have started to invert from this time. The effect of inversion of the Giv Fault is associated with the development of the Darvar Fault in its outer wall, and with the continuation of this inversion, the Mila Fault is formed as a backthrust of the Giv Fault and the Tuyeh Fault in the outer wall of the Mila Fault. According to the Paleocene (Fajan conglomerate) and Eocene (Karaj Formation) outcrops and their location in the footwall of the Mila and Giv faults, it can be inferred that the inversion mechanism continued until the upper Eocene.

It seems that the evolution of Alborz crust at the end of the Cenozoic (Miocene), was more compressive and accompanied by generally strike-slip movement (Allen and et al, 2003). The westward movement of the South Caspian basement relative to Central Iran has caused left-lateral movement of the faults. Accordingly, the Alborz mountain range is currently under oblique left-lateral shortening, while the faults in its eastern parts has greater amount of left-lateral than its western parts (Jackson et al, 2002).

Conclusion

Tuyeh Darvar Mountains are asymmetric pop-up structure that thrust the older Paleozoic-Mesozoic rock formations over the Tertiary rock units by the Giv and Mila faults, which have opposite dip directions. The Giv Fault as the main thrust and the Mila Fault as its back thrust are southern and northern boundaries of the pop-up structure, respectively. The Giv Fault as initial normal fault has formed during the Early Paleozoic extension phase or during the Permo-Triassic uplift in the eastern Alborz. Compressive phase in Upper Cretaceous, related to Neotethys closure, reactivated the pre-existing, e.g., the Giv Fault, normal faults and invert them to reverse faults. Inversion mechanism has been continued until Upper Eocene by considering the outcrop of Paleocene (Fajan conglomerate) and Eocene rocks (Karaj Formation) in the footwall of the Mila and Giv faults. The post-Miocene to Quaternary left-lateral-shear in the eastern Alborz is proposed to be related to the southern Caspian westward movement.

Keywords: Back- thrust, Eastern Alborz, Inversion Tectonic, Pop-up Structure, Thrust Faults.

بررسی هندسی و تحلیل ساختار بالاجسته کوه‌های تویه دروار (در دامنه جنوبی البرز خاوری)

الهه طاهری^۱، ابراهیم غلامی^{۱*} , علی یساقی^۲

۱- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

۲- گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

(پژوهشی) دریافت مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۲۹ پذیرش نهایی مقاله: ۱۴۰۴/۰۴/۲۹

چکیده گسترده

مقدمه

رشته کوه البرز در شمال ایران، کمان مرتفعی است که از انتهای تالش در باختر تا تقاطع آن با کپه داغ در خاور گسترده شده است (Jackson et al, 2002). علوی (Alavi, 1996)، البرز را یک کمربند چندکوهزاد معرفی نموده است که تحت تاثیر کوهزایی سیمیرین و آلپین از تریاس پسین تا الیگومیوسن قرار گرفته است. لذا این رشته کوه و حتی ادامه آن به خاور، با توجه به الگوی ساختاری خود به خوبی می‌تواند بیانگر فرآیندهای مرتبط با زمین‌ساخت وارون باشد (Zanchi et al, 2006; Yassaghi and Madanipour, 2008; Gholami et al, 2016).

مواد و روش‌ها

نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه بر پایه نقشه زمین‌شناسی کیاسر (Akbarpour and Saeedi, 1991) و نقشه زمین‌شناسی جام (Alavi naeini and Hamed, 1997)، بررسی تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 با دقت مکانی ۱۵ متر با ترکیب‌های بانندی متفاوت و پیمایش‌های صحرایی، اصلاح و ترسیم گردیده است. با استفاده از این نقشه، داده‌های صحرایی و داده‌های ارتفاعی رقومی (DEM) (مدل رقومی ارتفاعی) برش ساختاری عمود بر منطقه مطالعه ترسیم گردیده است. برای تحلیل سازوکار گسل‌ها از شکستگی‌های برشی ریدل، پله‌های گسلی، شکستگی‌های هلالی، رشد فیبرهای کانی در سطح گسل‌ها و همچنین تصاویر استریوگرافی استفاده شده است.

نتایج و بحث

- هندسه ساختاری ساختار بالاجسته تویه دروار

کوه‌های تویه دروار توسط گسل‌های میلا در شمال و گیو در جنوب محدود می‌شود. این گسل‌ها با جهت شیب مخالف یکدیگر سبب رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین و مزوزوئیک بر روی واحدهای جوان‌تر ترشیری شده‌اند. گسل‌های میلا و گیو با جهت شیب مخالف یکدیگر، باعث راندگی و بالآمدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک در هر دو سو بر روی واحدهای جوان‌تر شده‌اند. این چنین هندسه و ساختاری که در آن سنگ‌های قدیمی‌تر توسط سنگ‌های جوان‌تر احاطه می‌شوند را در کوه‌های طالقان، به‌عنوان درون‌هسته معرفی شده است (Annels et al, 1975).

استناد: طاهری، ا. و همکاران، ۱۴۰۴. بررسی هندسی و تحلیل ساختار بالاجسته کوه‌های تویه دروار، پژوهشهای دانش زمین: ۱۶(۴)،

DOI: 10.48308/esrj.2021.101281 (۱۷-۲۹)

چنانچه این هندسه ساختاری، متأثر از گسل خوردگی باشد از آن با عنوان ساختار بالاجسته (pop-up)^۲ یاد می‌شود که بیشتر در رژیم‌های زمین‌ساختی وارون و امتدادلغز تشکیل می‌شود (MCclay, 1995). از آنجایی که میزان جابجایی در پس‌راندهای تشکیل شده در زمین‌ساخت وارون نسبت به گسل اصلی بیشتر است، این هندسه را می‌توان از ویژگی‌های گسل‌های مناطق وارون شده دانست که گسل‌های پس‌راند در آن، در فاز فشارشی شکل گرفته‌اند (Conney et al, 1996). در اثر فعالیت گسل میلا در بخش خاوری، واحدهای سنگی پالئوزوئیک فوقانی (سازند جیروود) بر روی واحدهای سنگی سنوزوئیک (کنگلومرای فجن) و در بخش باختری واحدهای سنگی مزوزوئیک (سازند لار) بر روی واحدهای سنگی سنوزوئیک (مارن‌های ائوسن) رانده شده است. در گذر از خاور به باختر، راستای گسل از خاوری - باختری به شمال‌خاور - جنوب‌باختر تغییر می‌کند. در فرادیواره گسل میلا، راندگی تویه، شکل گرفته است که در بخش باختری سبب رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین بر روی واحدهای پالئوزوئیک فوقانی و در بخش خاوری باعث رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین بر روی واحدهای سنگی تریاس شده است. گسل گیو به طول تقریبی ۲۰ کیلومتر و راستای کلی شمال‌خاور - جنوب‌باختر، مرز جنوبی کوه‌های تویه دروار را تشکیل می‌دهد. در اثر فعالیت گسل گیو نهشته‌های سازند شمشک (ژوراسیک) و واحدهای آهکی کرتاسه بر روی واحدهای ائوسن رانده شده است. شیب صفحه گسل گیو بین ۶۰ تا ۷۵ درجه به سمت شمال‌باختر متغیر است و دارای سازوکار معکوس چپگرد است. گسل دروار در برش AA' دارای شیب ۷۵ درجه در شمال باختری گسل گیو شکل گرفته و دارای سازوکار معکوس چپگرد است. گسل دروار به عنوان شاخه فرادیواره‌ای گسل گیو باعث راندگی واحدهای سنگی تریاس (سازند الیکا) بر روی واحدهای سنگی ژوراسیک (سازند شمشک) شده است.

-مدل تکاملی زمین‌ساختی کوه‌های تویه دروار

گسل گیو می‌تواند طی کشش پالئوزوئیک آغازین یا بالآمدگی محیطی پرموتریاس و تشکیل گسل‌های نرمال، ایجاد شده باشد. در کرتاسه فوقانی، فاز فشارشی ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتیتیس، باعث وارون شدگی فعالیت این گسل‌های نرمال شده است. اثر وارون شدگی گسل گیو با توسعه گسل دروار در فرادیواره آن همراه بوده لذا گسل میلا به صورت پس‌راندگی گسل گیو و گسل تویه در فرادیواره گسل میلا تشکیل شده است. با توجه به نحوه رخنمون واحدهای سنگی پالئوسن و ائوسن در فرودیواره گسل میلا و گیو می‌توان تداوم این وارونگی را تا ائوسن بالایی در نظر گرفت. تداوم همگرایی بعد از میوسن و حرکت پی‌سنگ خزر جنوبی نسبت به ایران به سمت باختر، سبب جابجایی چپگرد گسل‌ها شده است. گسل گیو می‌تواند در طی فاز کششی پالئوزوئیک آغازین و یا در اثر بالآمدگی محیطی و تشکیل گسل‌های نرمال در البرز خاوری در زمان پرموتریاس ایجاد شده باشد. در کرتاسه فوقانی همزمان با فاز فشارشی ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتیتیس، باعث تجدید فعالیت گسل‌های نرمال از قبل موجود و وارون شدگی آن‌ها شده است. بر این اساس، گسل گیو می‌توانسته از این زمان شروع به وارون شدگی نماید. اثر وارون شدگی گسل گیو با توسعه گسل دروار در فرادیواره آن همراه بوده و با ادامه این وارون شدگی، گسل میلا به صورت پس‌راندگی گسل گیو و گسل تویه در فرادیواره گسل میلا تشکیل شده است. با توجه به رخنمون واحدهای سنگی پالئوسن (کنگلومرای فجن) و ائوسن (سازند کرج) و نحوه قرارگیری آنها در فرودیواره گسل میلا و گیو می‌توان این گونه بیان نمود که مکانیسم وارونگی تا ائوسن بالایی ادامه داشته است. آلن و همکاران (Allen et al, 2003) تکامل پوسته البرز در اواخر دوران سنوزوئیک را این گونه بیان می‌کنند که در میوسن تغییر شکل بیشتر فشارشی و همراه با حرکت عموماً راستالغز بوده است. حرکت به سمت باختر پی‌سنگ خزر جنوبی نسبت به ایران مرکزی، سبب جابجایی چپ‌بر گسل‌ها شده است. بنا بر نظر جکسون و همکاران (Jackson et al, 2002) رشته‌کوه البرز در حال حاضر تحت کوتاه‌شدگی چپ‌بر مایل قرار دارد، ضمن آنکه ساختارهای نشانگر حرکت امتدادلغز چپ‌بر در البرز خاوری بیش از البرز باختری است. تأثیر حرکت چپ‌بر در فاز آخر تنش باعث ایجاد پهنه‌های برشی در مقیاس‌های مختلف شده است.

نتیجه‌گیری

-کوه‌های تویه دروار ساختار بالاجسته نامتقارنی هستند که به وسیله گسل‌های گیو و میلا با جهت شیب مخالف یکدیگر بر روی واحدهای جوان تر رانده شده‌اند.

- گسل گیو به عنوان گسل اصلی، مرز جنوبی و گسل میلا به صورت پس‌راندگی گسل گیو، مرز شمالی ساختار بالاجسته تویه‌دروار را تشکیل می‌دهند.
- گسل گیو پتانسیل تشکیل در طی فاز کششی پالئوزوئیک آغازین و یا تشکیل در اثر برخاستگی محیطی و تشکیل گسل‌های نرمال در البرز خاوری در زمان پرموتریاس را داشته است.
- در کرتاسه فوقانی همزمان با فاز فشارشی ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتتیس، باعث تجدید فعالیت گسل نرمال اولیه گیو و وارون‌شدگی آن شده است.
- رخمون واحدهای سنگی پالئوسن (کنگلومرای فجن) و ائوسن (سازند کرج) و قرارگیری آن‌ها در فرودپواره گسل میلا و گیو، بیان‌کننده ادامه مکانیسم وارونگی تا ائوسن بالایی می‌باشد.
- ادامه حرکات فشارشی بعد از میوسن که با حرکت سمت باختر پی‌سنگ خرز جنوبی نسبت به ایران مرکزی سبب جابجایی چپگرد گسل‌ها (رژیم زمین‌ساختی ترافشارشی چپگرد) در البرز خاوری شده است.

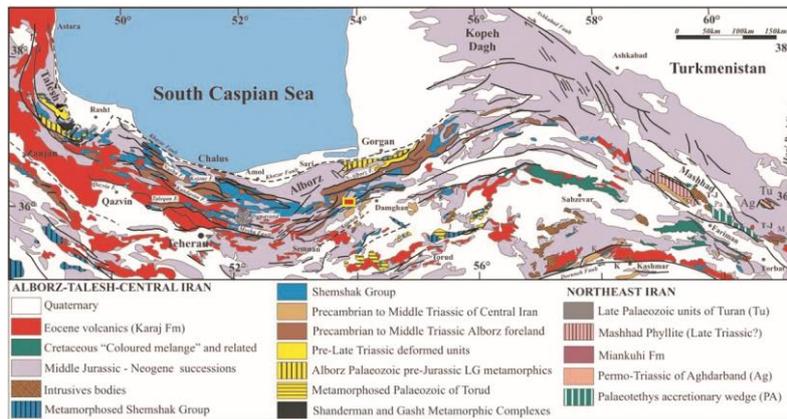
واژگان کلیدی: البرز خاوری، پس‌راندگی، ساختار بالاجسته، راندگی، زمین‌ساخت وارون.

مقدمه

خود همراه هستند را بیان‌کننده حالت وارون‌شدگی گسل‌های نرمال معرفی نمود. این پس‌راندگی‌ها سبب راندگی مجموعه‌های قدیمی‌تر به صورت ساختار بالاجسته (pop-up) شده‌اند. زمین‌ساخت وارون در البرز از کرتاسه پسین آغاز شده و تا ائوسن-الیگوسن ادامه یافته است. از اواخر میوسن تا پلیوسن، با حرکت رو به جنوب باختر حوضه خرز جنوبی به سمت فلات ایران، جهت کوتاه‌شدگی به NNE-SSW تغییر یافته است. این امر سبب فعالیت مجدد گسل‌های عرضی پی‌سنگی و توسعه گسل‌های ریدل همسو بر روی پوشش رسوبی شده است. گسل‌های عرضی در پاسخ به آخرین فاز دگرشکلی در البرز مرکزی از زمان پلیستوسن ایجاد شده‌اند (Yassaghi and Naeimi, 2011). کوه‌های تویه‌دروار، در دامنه جنوبی البرز خاوری واقع شده‌اند (شکل ۱). در این پژوهش سعی شده است تا با بررسی هندسه ساختاری کوه‌های تویه‌دروار و تحلیل هندسی و جنبشی گسل‌های میلا و گیو به عنوان کنترل‌کننده‌های اصلی ساختاری، مدل تکامل ساختاری منطقه ارائه شود که می‌تواند قابل تعمیم به دیگر بخش‌های البرز خاوری باشد.

رشته‌کوه البرز در شمال ایران، کمان مرتفعی است که از انتهای تالش در باختر تا تقاطع آن با کپه داغ در خاور گسترده شده است (Jackson et al, 2002) (شکل ۱). علوی (Alavi, 1996)، البرز را یک کمربند چندکوهزاد معرفی نموده است که تحت تاثیر کوهزایی سیمین و آلپین از تریاس پسین تا الیگومیوسن قرار گرفته است. لذا این رشته‌کوه و حتی ادامه آن به خاور، با توجه به الگوی ساختاری خود به خوبی می‌تواند بیانگر فرآیندهای مرتبط با زمین‌ساخت وارون باشد که به خصوص در البرز مرکزی توسط بسیاری از زمین‌شناسان مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است (Yassaghi, 2001; Yassaghi, 2005; Zanchi et al, 2006; Ehteshami and Yassaghi, 2007; Yassaghi and Madanipour, 2008; Gholami et al, 2016; Yassaghi and Naeimi, 2011).

اولین بار یساقی (Yassaghi, 2001) به معرفی زمین‌ساخت وارون در البرز مرکزی پرداخت و راندگی‌های موجود در البرز مرکزی که اغلب با پس‌راندگی‌هایی بر روی فرادپواره



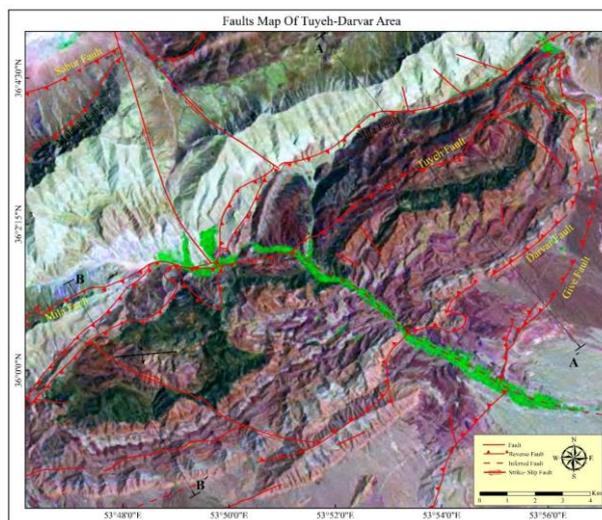
شکل ۱: منطقه مطالعاتی بر روی نقشه زمین‌شناسی البرز (کادر قرمز) برگرفته از (Zanchi et al, 2007)
 Fig. 1: Study area on Alborz geological map (red rectangle) after (Zanchi et al, 2007)

مواد و روش‌ها

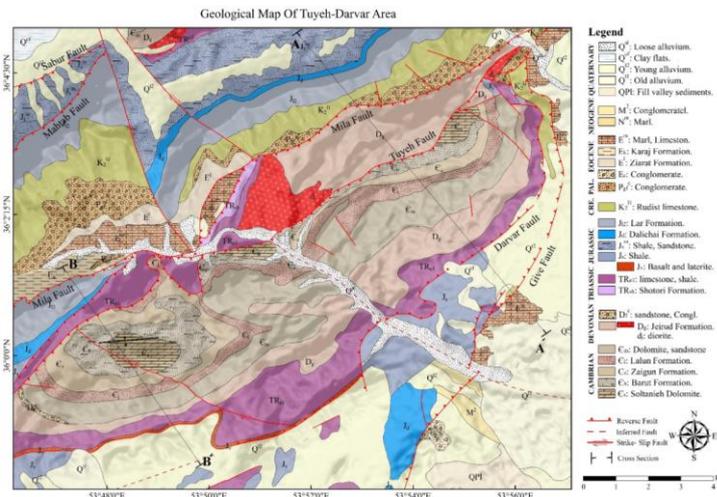
نقشه زمین‌شناسی محدوده مورد مطالعه بر پایه نقشه زمین‌شناسی کیاسر (Akbarpour and Saedi, 1991) و نقشه زمین‌شناسی جام (Alavi naeni and Hamed, 1997)، بررسی تصاویر ماهواره‌ای Landsat 8 با دقت مکانی ۱۵ متر با ترکیب‌های باندی متفاوت و پیمایش‌های صحرایی، اصلاح و ترسیم گردیده است. با استفاده از این نقشه، داده‌های صحرایی و داده‌های ارتفاعی رقومی (DEM) برش ساختاری عمود بر منطقه مطالعه ترسیم گردیده است. برای تحلیل سازوکار گسل‌ها از شکستگی‌های برشی ریدل، پله‌های گسلی، شکستگی‌های هلالی، رشد فیبرهای کانی در سطح گسل‌ها و همچنین تصاویر استریوگرافی استفاده شده است.

نتایج

هندسه ساختاری بالاجسته کوه‌های تویه‌دروار: کوه‌های تویه‌دروار توسط گسل‌های میلا در شمال و گیو در جنوب محدود می‌شود (شکل ۲). این گسل‌ها با جهت شیب مخالف یکدیگر سبب رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین (سازندهای سلطانیه، باروت، زاگون، لالون و جیروود) و مزوزوئیک (سازندهای الیکا، شمشک، لار و دلچای) بر روی واحدهای جوان‌تر ترشیری شده‌اند (شکل ۳). اگرچه این دو گسل ساختارهای اصلی کنترل‌کننده منطقه می‌باشند، اما علاوه بر آن‌ها، راندگی‌ها و پس‌راندگی‌های کوچکتری در منطقه وجود دارند که با برداشت‌های میدانی و نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه، تحلیل و در برش‌های ترسیم شده بررسی شده‌اند (شکل ۴).

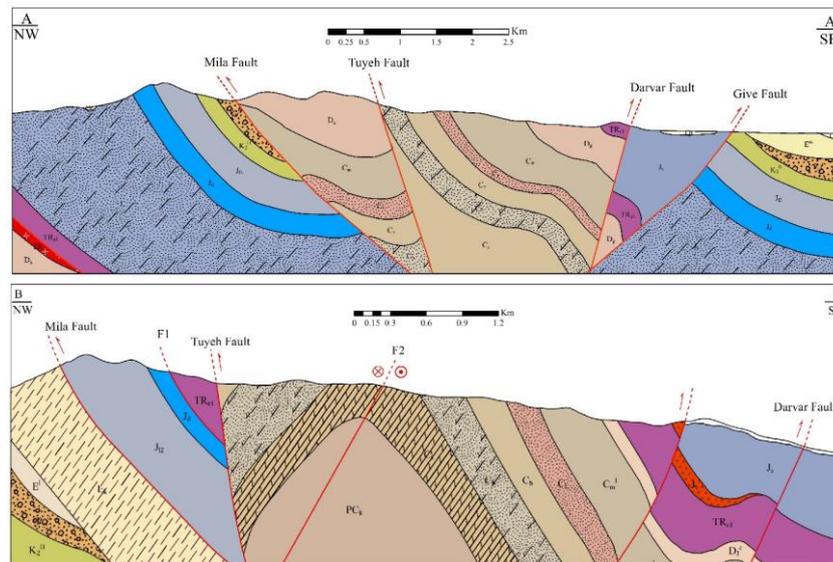


شکل ۲: تصویر ماهواره‌ای با نمایش گسل‌ها
 Fig. 2: Satellite image with Faults



شکل ۳: نقشه زمین‌شناسی منطقه تویه‌دروار براساس نقشه‌های زمین‌شناسی کیاسر (Akbarpour and Saedi, 1991) و جام (Alavi naeini and Hamedi, 1997)

Fig. 3: Geological map of Tuyeh-darvar base on geological map of Kiasar (Akbarpour and Saedi, 1991) and Jam (Alavi naeini and Hamedi, 1997).



شکل ۴: برش‌های ساختاری در منطقه مطالعه. راهنمای واحدها در شکل ۳.

Fig. 4: Structural sections across the study area. For legend of rock units refer to Fig. 3.

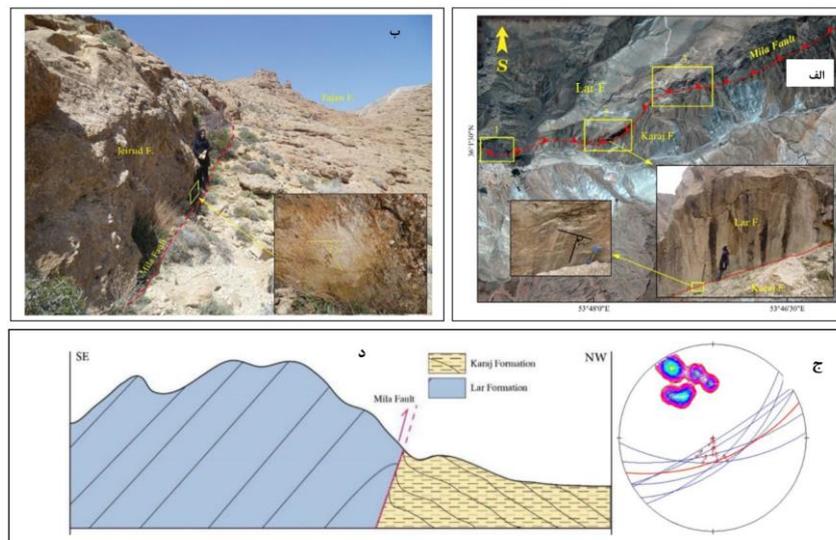
گذر از خاور به باختر، راستای گسل از خاوری - باختری به شمال خاور- جنوب باختر تغییر می‌کند. در فرادواره گسل میلا، راندگی تویه، شکل گرفته است که در بخش باختری سبب رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین بر روی واحدهای پالئوزوئیک فوقانی و در بخش خاوری باعث رانده شدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک زیرین بر روی واحدهای سنگی تریاس شده است (شکل ۳). ویژگی‌های هندسی و ساختاری گسل میلا در ۲ برش ساختاری (شکل ۴) مورد بررسی قرار گرفته است. در برش AA' گسل میلا دارای روند شمال خاور- جنوب باختر بوده که در اثر

گسل میلا

گسل میلا به طول تقریبی ۳۶ کیلومتر دارای روند عمومی شمال خاوری- جنوب باختری می‌باشد که ۲۰ کیلومتر از درازای آن در محدوده مطالعاتی قرار گرفته است. گسل میلا مرز شمالی کوه‌های تویه‌دروار را تشکیل می‌دهد. در اثر فعالیت این گسل در بخش خاوری واحدهای سنگی پالئوزوئیک فوقانی (سازند جیرود) بر روی واحدهای سنگی سنوزوئیک (کنگلومرای فجن) و در بخش باختری واحدهای سنگی مزوزوئیک (سازند لار) بر روی واحدهای سنگی سنوزوئیک (مارن‌های ائوسن) رانده شده است (شکل ۵). در

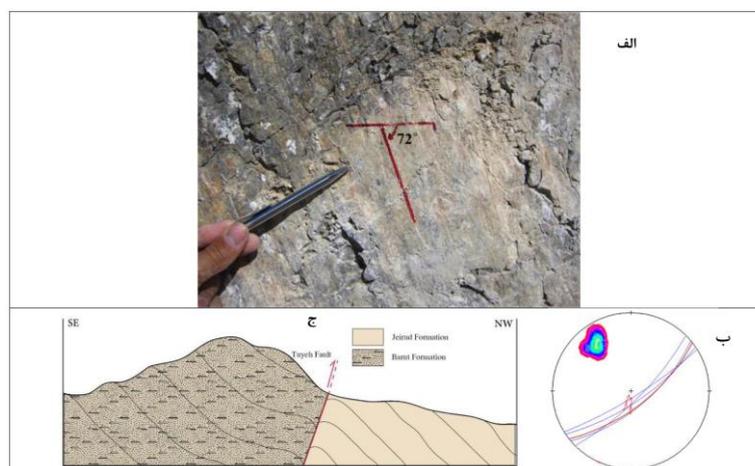
روند تقریبی خاوری- باختری است که باعث رانده شدن واحدهای صخره‌ساز سازند لار بر روی مارن‌های سازند کرج (اٹوسن) شده است. موقعیت هندسی میانگین گسل میلا $۶۲^{\circ}/۱۵۸^{\circ}$ بوده و خراش‌های گسلی برداشت شده دارای ریک ۷۰ تا ۸۷ درجه ساعتگرد بر روی فرادیواره گسل (سازند لار) تأیید کننده سازوکار گسل به صورت معکوس همراه با مؤلفه کوچک راستالغز چپگرد (Taheri, 2013) می‌باشد (شکل ۵).

عملکرد آن سازند جیروود (دونین) بر روی سازند فجن (پالئوسن) رانده شده است (شکل ۳). بررسی صحرایی در راستای این گسل حاکی از سازوکار غالب معکوس همراه با مؤلفه کوچک امتدادلغز چپگرد می‌باشد. (شکل ۵). در راستای حرکت به سمت جنوب خاوری در فرادیواره گسل میلا، گسل تویه با سازوکار غالب معکوس چپگرد باعث جابجایی هر چه بیشتر واحدهای قدیمی‌تر شده است. موقعیت هندسی میانگین برای گسل تویه $۷۳^{\circ}/۱۴۲^{\circ}$ برآورد شده است (شکل ۶). در برش BB' گسل میلا دارای



شکل ۵: الف: نقاط برداشت ۱ تا ۳ در باختر گسل میلا (نگاه به جنوب) و رانده شدن سازند لار بر روی سازند کرج (ایستگاه ۲) در برش BB'، ب: خطواره گسلی در فرادیواره گسل میلا، ج: سیکلوگرافیک گسل میلا (قرمز)، د: برش شماتیک از گسل میلا

Fig. 5: A: The measurement points 1 to 3 in the western part of the Mila Fault (looking south), which thrust the Lar Formation over the Eocene Karaj Formation (station 2) on the BB' section. B: Slip vector on the hanging wall of the Mila Fault. C: Stereographic of the Mila Fault (red). D: Schematic section across the Mila Fault.



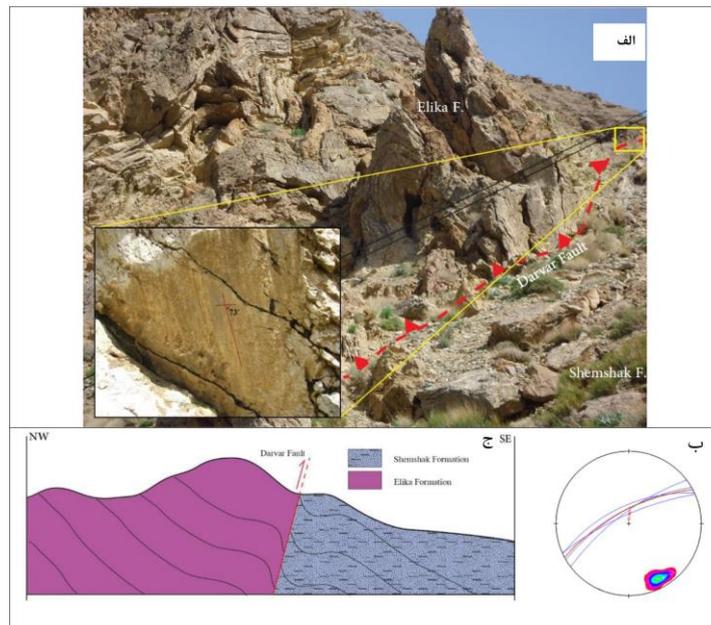
شکل ۶: الف: خطواره گسلی در فرادیواره گسل تویه (نگاه به جنوب) در برش AA'، ب: سیکلوگرافیک گسل تویه (قرمز)، ج: برش شماتیک از گسل تویه

Fig. 6: A: Slip vector on the hanging wall of the Tuyeh Fault on the AA' section. B: Stereographic of the Tuyeh Fault (red). C: Schematic section across the Tuyeh Fault.

گسل گیو

گسل گیو به طول تقریبی ۲۰ کیلومتر و راستای کلی شمال خاور - جنوب‌باختر، مرز جنوبی کوه‌های تویه دروار را تشکیل می‌دهد. در اثر فعالیت گسل گیو نهشته‌های سازند شمشک (ژوراسیک) و واحدهای آهکی کرتاسه بر روی واحدهای ائوسن رانده شده است (شکل ۳). شیب صفحه گسل گیو بین ۶۰ تا ۷۵ درجه به سمت شمال‌باختر متغیر است. حاجیان‌نژاد (Hadjiannejad, 2005) سازوکار این گسل را معکوس، همراه با مؤلفه راستالغز چپگرد معرفی

نموده است. در برش AA' گسل دروار با شیب ۷۵ درجه در شمال باختری گسل گیو شکل گرفته که دارای موقعیت هندسی میانگین $75^{\circ}/330^{\circ}$ می‌باشد. خراش‌های گسلی با ریک ۶۵-۷۵ درجه بر روی سطح این گسل، نشان از سازوکار معکوس با مؤلفه راستالغز چپگرد می‌باشد (شکل ۷). گسل دروار به عنوان شاخه فرادیواره‌ای گسل گیو باعث راندگی و جابجایی هر چه بیشتر واحدهای سنگی تریاس (الیکا) بر روی واحدهای سنگی ژوراسیک (سازند شمشک) شده است.



شکل ۷: الف: راندگی سازند شمشک بر روی سازند الیکا همراه با خطواره گسلی در فرادیواره گسل دروار، ب: سیکلوگرافیک گسل دروار (قرمز)، ج: برش شماتیک از گسل دروار

Fig. 7: A: Thrusting of Shemshak Formation over the Elika Formation with slip vector on the hangingwall of Darvar Fault. B: Sterographic projection of the Darvar Fault (red). C: Schematic section of the Darvar Fault.

بحث

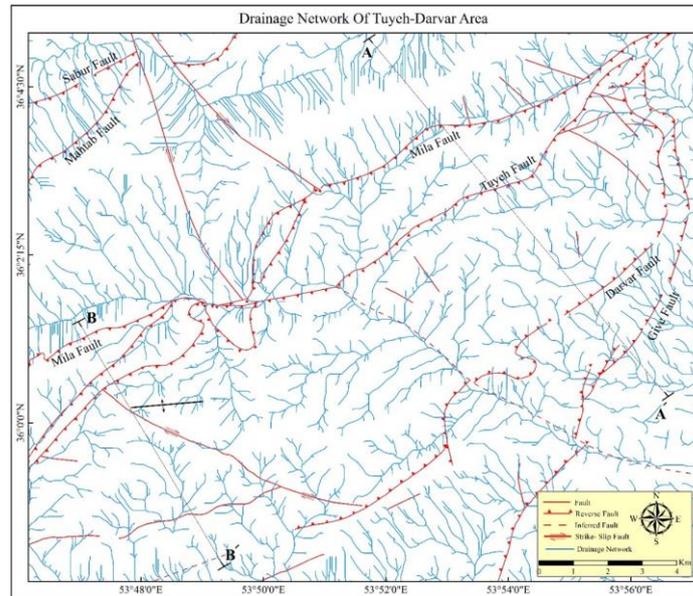
ساختار بالاجسته تویه دروار

براساس نقشه‌های ساختاری- زمین‌شناسی (شکل ۳) و برش‌های ساختاری (شکل ۴)، گسل‌های میلا و گیو با جهت شیب مخالف یکدیگر، باعث راندگی و بالآمدن واحدهای سنگی پالئوزوئیک در هر دو سو بر روی واحدهای جوان‌تر شده‌اند. آنلز و همکاران (Annels et al, 1975) برای اولین بار چنین هندسه و ساختاری که در آن سنگ‌های قدیمی‌تر توسط سنگ‌های جوان‌تر احاطه می‌شوند را در کوه‌های طالقان، به‌عنوان دروننهشته معرفی کرد. چنانچه این هندسه ساختاری، متأثر از گسل خوردگی باشد از آن با

عنوان ساختار بالاجسته (pop-up) یاد می‌شود که بیشتر در رژیم‌های زمین‌ساختی وارون و امتدادلغز تشکیل می‌شود (McCly, 1995). از آنجایی که میزان جابجایی در پس راندگی‌های تشکیل شده در زمین‌ساخت وارون نسبت به گسل اصلی بیشتر است، این هندسه را می‌توان از ویژگی‌های گسل‌های مناطق وارون شده دانست که گسل‌های پس‌راند در آن، در فاز فشارشی شکل گرفته‌اند (Conney et al, 1996). گسل گیو به عنوان مرز جنوبی ساختار بالاجسته تویه دروار به دلیل اختلاف سنی کمتر واحدهای سنگی دو طرف گسل در مقایسه با گسل میلا عمیق‌تر بوده و نقش راندگی اصلی (گسل وارون) را ایفا نموده است و

شمال کوه‌های تویه‌دروار می‌باشد. طول آبراه‌های تشکیل شده بر روی دامنه شمالی در فرودپواره پس‌راندگی میلا کوتاه‌تر و مستقیم‌تر از دامنه جنوبی در فرادپواره گسل اصلی وارون‌شده گیو (در جنوب) می‌باشد که این خود نتیجه جابجایی بیشتر پس‌راندگی میلا است (شکل ۸).

گسل میلا به صورت پس‌راندگی گسل گیو تشکیل شده است. بر اساس مدل دلکیلو (Delcaillau et al, 2006) طول آبراه‌های تشکیل شده بر روی دامنه مرتبط با پس‌راندگی به نسبت راندگی اصلی کوتاه‌تر و مستقیم‌تر هستند. گسل میلا از نظر ارتفاعی، شکل‌دهنده اصلی توپوگرافی کنونی



شکل ۸: الگوی آبراه‌ها در کوه‌های تویه‌دروار

Fig. 8: Drainage pattern in the Tuye-Darvar Mountains.

پالئوتیتیس بوده است که موجب فرورانش، راندگی شدید، دگرگونی، نفوذ محلی گرانیتوئیدها و بالآمدگی های شدید گشته است (Alavi, 1996). اثر این کوهزاد را می‌توان با برآمدگی پیرامون به صورت گسل‌های نرمال و یا ادامه حرکت گسل‌های نرمال از قبل موجود در البرز مشاهده نمود (Zanchi et al, 2006).

با این وجود، گسل گیو می‌تواند در طی فاز کششی پالئوزوئیک آغازین و یا در اثر بالا آمدگی محیطی و تشکیل گسل‌های نرمال در البرز خاوری در زمان پرموتریاس ایجاد شده باشد (شکل ۱۰ الف). در کرتاسه فوقانی همزمان با فاز فشارشی ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتیتیس، باعث تجدید فعالیت گسل‌های نرمال از قبل موجود و وارون‌شدگی آن‌ها شده است (شکل ۱۰ ب). بر این اساس، گسل گیو می‌توانسته از این زمان شروع به وارون‌شدگی نماید. اثر وارون‌شدگی گسل گیو با توسعه گسل دروار در فرادپواره آن همراه بوده و با ادامه این وارون‌شدگی، گسل میلا به‌صورت پس‌راندگی گسل گیو و گسل تویه در فرادپواره گسل میلا تشکیل شده است. با توجه به رخنمون واحدهای

مدل تکاملی زمین‌ساختی کوه‌های تویه دروار

منطقه تویه‌دروار در تقسیم‌بندی چینه‌نگاری-ساختاری البرز، بخشی از دامنه جنوبی البرز خاوری است که توالی چینه‌شناسی از کامبرین تا کواترنری را در خود جای داده است (شکل ۹). اولین فعالیت ثبت شده در البرز، کافت زایی پالئوزوئیک آغازین می‌باشد. رخنمون پراکنده توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی (واحد di) که در مطالعات (Khanalizadeh, 2004) جزء گرانیتوئیدهای غیر کوهزاد (A) و مرتبط با ریف‌ت قاره‌ای یا درون‌قاره‌ای دسته‌بندی شده‌اند و همچنین با در نظر گرفتن محیط تشکیل سازندهای پالئوزوئیک زیرین البرز، می‌تواند شاهدهی بر کششی بودن و ریف‌ت‌زایی اردوئیسین-سیلورین در این منطقه باشد. این شرایط تا دونین میانی تداوم داشته است. در ادامه توالی نسبتاً پیوسته (شرایط فلات قاره‌ای) از دونین فوقانی تا تریاس تشکیل شده است. برخورد حاشیه قاره‌ای فعال صفحه توران (اوراسیا) با حاشیه قاره‌ای غیر فعال البرز و ایران مرکزی (مقارن با کوهزاد سیمیرین) که از لحاظ زمین‌ساختی مرتبط با بسته شدن حوضه اقیانوسی

۲- گسل گیو به عنوان گسل اصلی، مرز جنوبی و گسل میلا به صورت پس‌راندگی گسل گیو، مرز شمالی ساختار بالاجسته تویه دروار را تشکیل می‌دهند.

۳- گسل گیو پتانسیل تشکیل در طی فاز کششی پالئوزوئیک آغازین و یا تشکیل در اثر برخاستگی محیطی و تشکیل گسل‌های نرمال در البرز خاوری در زمان پرموتریاس را داشته است.

۴- در کرتاسه فوقانی فاز فشارشی ناشی از بسته شدن اقیانوس نئوتتیس باعث وارون‌شدگی گسل نرمال اولیه گیو شده است. شیب زیاد گسل، توسعه راندگی‌ها و پس‌راندگی‌های فرادیواره‌ای، قرارگیری سازند شمشک در فرادیواره گسل گیو و ایجاد ساختار بالاجسته، وارون‌شدگی ساختاری گسل گیو را نشان می‌دهد.

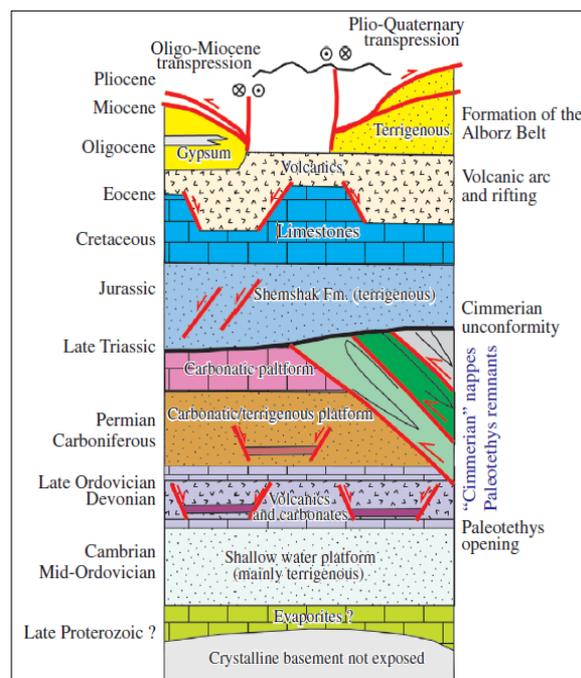
۵- رخنمون واحدهای سنگی پالئوسن (کنگلومرای فجن) و ائوسن (سازند کرج) و نحوه قرارگیری آن‌ها در فرودیواره گسل میلا و گیو، بیان‌کننده ادامه مکانیسم وارونگی تا ائوسن بالایی می‌باشد.

۶- حرکت به سمت باختر پی‌سنگ خرز جنوبی نسبت به ایران مرکزی بعد از میوسن که تاکنون نیز ادامه دارد سبب جابجایی چپگرد گسل‌ها (رژیم زمین‌ساختی ترافشارشی چپگرد) در البرز خاوری شده است.

سنگی پالئوسن (کنگلومرای فجن) و ائوسن (سازند کرج) و نحوه قرارگیری آن‌ها در فرودیواره گسل میلا و گیو می‌تواند این گونه بیان نمود که مکانیسم وارونگی تا ائوسن بالایی ادامه داشته است (شکل ۱۰ ب). آلن و همکاران (Allen et al, 2003) تکامل پوسته البرز در اواخر دوران سنوزوئیک را این گونه بیان می‌کنند که در میوسن تغییر شکل بیشتر فشارشی و همراه با حرکت عموماً راست‌الغز بوده است. حرکت به سمت باختر پی‌سنگ خرز جنوبی نسبت به ایران مرکزی، سبب جابجایی چپ‌گرد گسل‌ها شده است. بنا بر نظر جکسون و همکاران (Jackson et al, 2002) رشته‌کوه البرز در حال حاضر تحت کوتاه‌شدگی چپ‌گرد مایل قرار دارد، ضمن آنکه ساختارهای نشانگر حرکت امتداد‌الغز چپ‌گرد در البرز خاوری بیش از البرز باختری است. تأثیر حرکت چپ‌گرد در فاز آخر تنش باعث ایجاد پهنه‌های برشی در مقیاس‌های مختلف شده است.

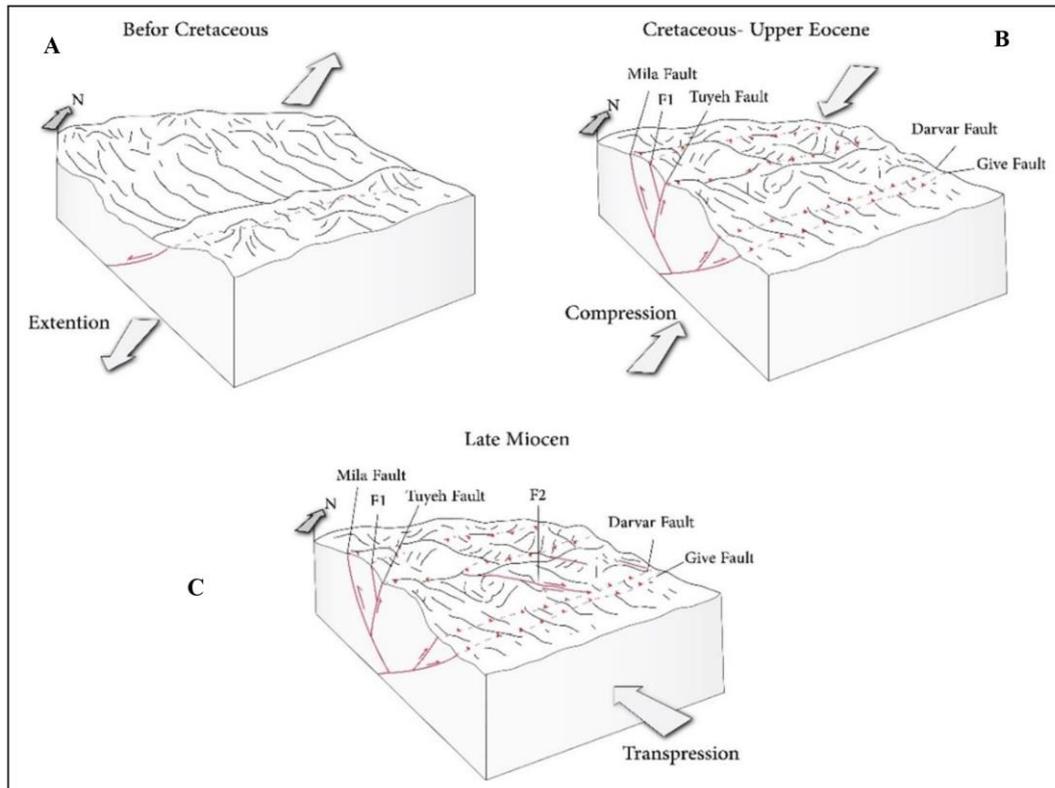
نتیجه‌گیری

۱- کوه‌های تویه دروار ساختار بالاجسته نامتقارنی هستند که به وسیله گسل‌های گیو و میلا با جهت شیب مخالف یکدیگر تشکیل شده و در این ساختار بالاجسته سنگ‌های پالئوزوئیک-مزوزوئیک بر روی واحدهای جوانتر ترشیری رانده شده‌اند.



شکل ۹: ستون زمین‌ساخت-چینه‌ای البرز (اقتباس از Alimohammadian et al, 2013)

Fig. 9: Tectono- stratigraphic column of Alborz (after Alimohammadian et al, 2013)



شکل ۱۰: سیر تکامل ساختاری کوه‌های تویه دروآر
 Fig. 10: Structural evolution of the Tuyeh-Darvar Mountains.

دریافت نکرده است.

سپاسگزاری

نویسنده این مقاله از هیچ سازمان یا ارگانی کمک مالی

پانوشت

1-Digital Elaevation Model

2-Pop-up structure

References

Akbarpour, M.R. and Saeedi, A., 1991. Geological map of Kiasar, (scale: 1/100000), Geol. Survey of Iran.

Alavi, M., 1996. Tectonostratigraphic synthesis and structural style of the Alborz mountain system in northern Iran. *Journal of Geodynamics*, v. 21, p. 1-33. [https://doi.org/10.1016/0264-3707\(95\)00009-7](https://doi.org/10.1016/0264-3707(95)00009-7)

Alavi naeini, M.R. and Hamed, A.R., 1997. Geological map of Jaam, (scale: 1/100000), Geol. Survey of Iran.

Allen, M.B., Ghassemi, M.R. Shahrabi, M. and Qorashi, M., 2003. Accommodation of late Cenozoic oblique shortening in the Alborz range, northern Iran. *J. Struct. Geol.*, v. 25, p. 659-672. [https://doi.org/10.1016/S0191-8141\(02\)00064-0](https://doi.org/10.1016/S0191-8141(02)00064-0)

Alimohammadian, H., Hamidi, Z., Aslani, A., Shahidi, A., Cifelli, F. and Mattei, M., 2013. A tectonic origin of magnetic fabric in the Shemshak Group from Alborz Mts. (northern

Iran), *J Asian Earth Sciences*, v. 73, p. 419-428. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.05.014>

Anells, R.N., Arthurton, R.S., Bazley, R.A. and Davies, R.G., 1975. Explanatory text of the Qazvin and Rash quadrangles map: Tehran, Geological Survey of Iran, 94 p.

Coney, P.J., Munoz, J.A., Mcclay, K.R. and Evenchick, C.A., 1996. Syntectonic burial and post-tectonic exhumation of the southern Pyrenees foreland fold thrust belt, *Journal of Geological society*, v. 153, p. 9-16. <https://www.researchgate.net/publication/249546917>

Delcaillau, B., Carozza, J. and Laville, E., 2006. Recent fold growth and drainage development: The Janauri and Chandiagrah anticline in the Siwalik foothills, Northwest India. *Geomorphology*, v. 74, p. 241-256. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.11.005>

Ehteshami Moinabadi, M. and Yassaghi, A., 2007. Geometry and kinematics of the Mosha Fault,

- south central Alborz Range, Iran: An example of basement involved thrusting. *J. Asian Earth science*, Article in press. v. 29, p. 928-938. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2006.07.002>
- Gholami, E., Shoraka, S. and Yassaghi, A., 2016. Structural evolution of Ashkhaneh fault zone in northwestern Kopeh-Dagh (NE Iran). *Geosciences*, published. http://www.gsjournal.ir/article_50255_en.html
- Hadjiannejad, M., 2005. Structural analysis of tuyedarvar area (west of Damghan), MSc thesis (tectonic), University of Shahid beheshti, Tehran, Iran (unpublished).
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M. and Berberian, M., 2002. Active tectonics of the South Caspian Basin: *Geophysical Journal International*, v. 148, p. 214-245. <https://doi.org/10.1046/j.1365-246X.2002.01005.x>
- Khanalizadeh, A., 2004. Petrogenesis and Geochemistry of Quartz-monzonite mass of tuye darvar, MSc thesis (petrology), Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (unpublished).
- McClay, K.R., 1995. The geometries and kinematics of inverted fault systems, a review of analogue model studies (Ed.), Basin inversion. *Geological Society, London, Special publications*, v. 88, p. 97-118. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1995.088.01.07>
- Taheri, E., 2013. Analysis of structural curvatures and kinematic model of fault mechanism in Dasht-e-boo area (northwest of Damghan), MSc thesis (tectonic), Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran (unpublished).
- Yassaghi, A. and Naeimi, A., 2011. Structural analysis of the Gachsar sub-zone in central Alborz range; constrain for inversion tectonics followed by the range transverse faulting. *Int J Earth Sci (Geol Rundsch)*, v. 100, p. 1237-1249. <https://www.researchgate.net/publication/225327200>
- Yassaghi, A., 2001. Inversion tectonics in central Alborz Range. *European Union of Geosciences (EUG XI)*, Abstract. Symposium LS05, 335 p.
- Yassaghi, A., 2005. The effect of deep-seated transverse basement fault on structural evolution of west-central Alborz Mountains. *EGU 2005 Conference*.
- Yassaghi, A. and Madanipour, S., 2008. Influence of a transverse basement fault on along-strike variations in the geometry of an inverted normal fault: Case study of the Mosha Fault, Central Alborz Range, Iran. *Journal of Structural Geology*, v. 30(12), p. 1507-1519. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2008.08.006>
- Zanchi, A., Berra, F., Zanchetta, S., Villa, I., Mattei, M., Ghassemi, M.R. and Sabouri, J., 2007. The Eo-Cimmerian orogeny in North Iran, *The Geological Society, London, Special Publications*, v. 312, p. 31-50. <https://www.researchgate.net/publication/235937606>
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M.R. and Sabouri, J., 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *J. Structural Geology*, Article in press. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2006.06.020>