فصلنامه زمین‌ساخت

بهـار ۱۴۰۲، سـال هفتـم، شـماره ۲۵

10.22077/jt.2024.7563.1178

خمش ساختاری جون آباد در جنوب زاهدان، شرق ایران: جایگاه زمین ساختی خمش مذکور و نقش آن در توزیع نهشته‌های معدنی

ساسان باقری[1*]، عبدالرضا پرتابیان[1]، حبیب بیابانگرد [2]

۱- دانشیار تکتونیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

۲- دانشیار پترولوژی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران.

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۰۳
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۷/۲۸

چکیده:

بسیاری از ساختارهای قوسی شکل در مقیاس‌های کلان در رشته‌کوه‌های شرق ایران دیده می‌شوند. قوس ساختاری جون آباد با تحدبی به سمت جنوب شرق، با طول قوسی در حدود ۲۰ کیلومتر و پهنای قوسی در حدود ۱۰ کیلومتر ظاهر شده است. این قوس ناو گون شبیه یک نیم نعلبکی است که از برگه‌های متعدد راندگی، اغلب از جنس توربیدایتها، توالی‌های رسوبی پلاژیک و بازالتی و بقایایی از ملانژهای افیولیتی که همگی با درجات ضعیف دگرگونی و یا تورق رخ اسلیتی مشخص می شوند، ساخته شده است. پیمایشهای صحرایی گویای لغزشهایی از بلوکهای صلب عمدتاً ماسه‌سنگی تا متابازیتی بر روی لایه های شیلی فیلیتی شده خمیری، در یک الگوی با ظاهری واگرا از مرکز به حواشی ساختار ناو شکل می باشد. رگه‌های سیلیس با دگرشکلی خمیری شامل ریز چینهای موازی و عدسیهای کششی در محل راندگیها، ساختهای نوار برشی و دوپلکس مرتبط این مسئله را تایید می‌کنند. میزان جابه‌جایی تقریبا در اطراف و درون قوس همه جا قابل ملاحظه و به میزان چند ده متربوده و به سمت مرکز قوس کاهش نمی‌یابد، چرا که هسته قوس را یک کلیپ نابرجا از رسوبات پلاژیک قدیمی‌تر می‌سازد. گسلهای مزدوج و بودینهای گرانیتی در اطراف قوس، کشش محیطی را نشان داده و چین خوردگی‌های پارازیتی در درون قوس انقباض را حکایت می‌کند. احتمالا کمانش اروکلاینی اواخر پالئوژن در شرق ایران مسئول شکل‌گیری قوس است. این ساختار خمشی پهنه‌های سیلیس آهن‌دار، پریدوتیتهای سرپانتینیتی آغشته به کربنات‌های مس و زونهای طلا-منگنز دار را به شکل نیم حلقه ظاهر ساخته که الگوی موثری برای پی‌جوی‌های آینده می‌باشد.

کلمات کلیدی: رشته‌کوه‌های شرق ایران، اروکلاین، پهنه جوش‌خورده سیستان، قوس ساختاری، تکتونیک و کانه‌زایی.

*ایمیل: sasan.bagheri@science.usb.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۳۲۱۳۸۶۱۴

The Jun-Abad structural curvature in south Zahedan, East Iran: Role of tectonic setting in formation of the curvature, and structural geology in distribution of its ore deposits

Sasan, Bagheri[1], Abdolreza Partabian[1], Habiab Biabangard[2]

1- Associate Professor of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

2- Associate Professor of Petrology, Department of Geology, Faculty of Science, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran.

ABSTRACT

Many curved, large-scale structures can be seen in the eastern Iranian ranges. The Jun-Abad structural curvature is convex towards the southeast, characterized by an arclength about 20 km and an arc width of about 10 km in map view. This synform structure is similar to a half-saucer comprises in numerous thrust sheets of Eocene turbidites, pelagic and basaltic sedimentary sequences of Cretaceous and remnants of ophiolitic mélanges that have totally been undergone low degrees of metamorphism and slaty cleavage. Field surveys and mesoscopic studies indicate considerable displacement of rigid blocks including sandstone to metabasite on the underlying plastic phyllitic shale in an apparently divergent pattern outward of the synform structure. Silica veins with a plastic deformation including parallel folds and tensile lenses in the place of thrusts, shear band and related duplex structures confirm this issue. The amount of movement around and inside the synform was noticeable everywhere and it does not decrease towards the center, because the core of the synform is made of an allochthonous klippe of older pelagic sediments. Conjugate faults and boudins of granite blocks represent tangential longitudinal strain around the arc, while the parasitic folds mark the inner arc shrinkage. The mentioned evidence show that the curvature is probably of the orocline type. The synform has occurred simultaneously with the general buckling in the late Paleogene of the eastern Iran. This arcuate structure has developed iron-bearing silica zones, serpentinite peridotites impregnated with copper carbonates, and gold/manganese zones in a half-ring-shaped pattern which is an effective model for future explorations.

Keywords: Eastern Iran mountain range, Orocline, Sistan Suture zone, structural arc, Tectonics and mineralization in eastern Iran.

*Email: sasan.bagheri@science.usb.ac.ir

Tel: +989132138614

۱- مقدمه

بسیاری از ساختارهای خمیده در کوهزادهای مهم بر روی نقشه‌های زمین‌شناسی یا تصاویر ماهواره‌ای در مقیاس‌های بزرگی با ظاهری قوسی شکل دیده می‌شوند که اغلب تحدبی در راستای رشته‌کوه‌ها دارند. این خمش‌ها ممکن است با چرخش حول محور قائم یا نزدیک به آن به وقوع پیوسته باشند و یا هیچ چرخشی را متحمل نشده و از ابتدا خمیده رشد کرده باشند (Ferill and Groshong , 1993; Suss-man et al., 2003). مقایسه جهت تحدب یا تقعر این خمش‌ها با موقعیت‌های تکتونیکی عمومی منطقه می‌تواند راهگشا باشد. توسعه برجستگی ساختمانی [1] یا خمشی که به سمت پیش‌خشکی است درحالی‌که فرورفتگی ساختمانی [2] خمشی است که تحدبی به سمت پس‌خشکی دارد. حوضه‌های پیش خشکی [3] و پس خشکی [4]، جهت فرورانش در منطقه و یا راستای عمومی کمربندهای چین-راندگی منطقه و نهایتاً بررسی ارتباط ساختارها با گسل‌های منطقه ابزارها و یا معیار مناسبی جهت تحلیل منشأ و تحول این ساختارها می‌باشند.

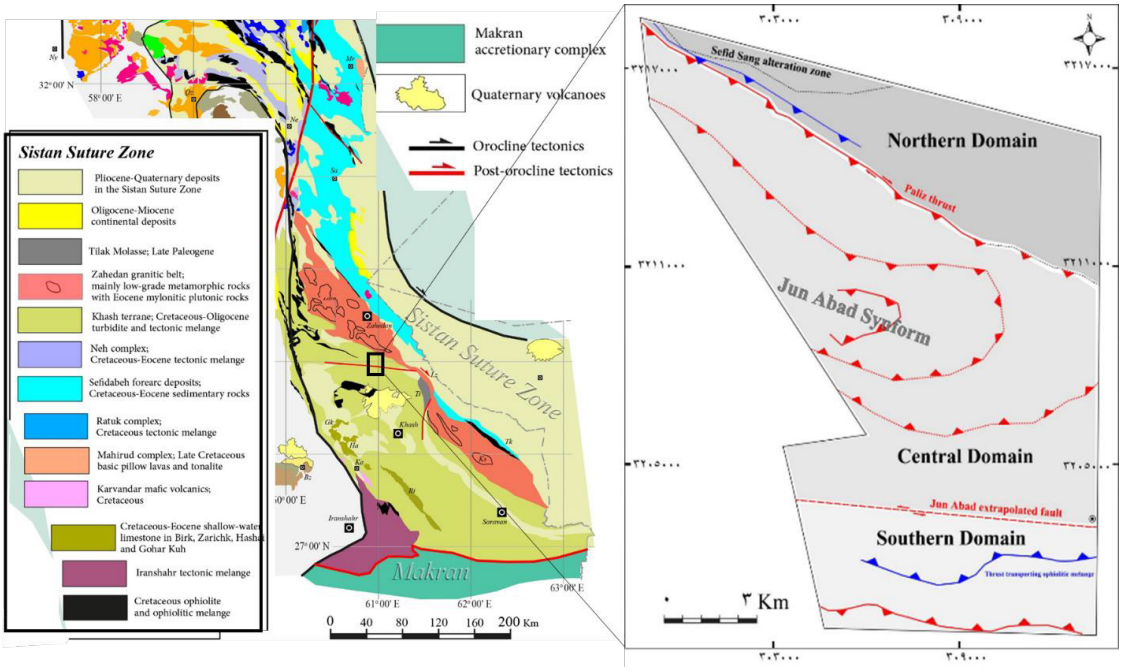
خمش‌های کلان ساختاری در چند گروه طبقه‌بندی می‌شوند، خصوصاً برجستگی‌های ساختمانی که رشدشان به‌سوی پیش خشکی در پنج عضو نهایی قابل‌تصور است (Carey 1955; Elliott, 1976; Marshak, 1988; Marshak et al. 1992; Ferill and Groshong 1993; Hindle and Burkhard,1999; Sussman et al. 2003). گروه اول که از قانون تیروکمان تبعیت می‌کنند [5] برجستگی ساختمانی را شامل می‌شود که رشدش از آغاز به‌صورت موازی اما با درجات مختلف در طول راندگی‌ها به وقوع می‌پیوندد. این اختلاف جابه‌جایی که اغلب بدون چرخش است نوعی خمش را باعث می‌شود. دسته دوم خمش‌های مرتبط با توسعه جابه‌جایی در طول راندگی‌هاست که مسیری واگرا داشته و بنام جابه‌جایی واگرا [6] خوانده می‌شوند. در اینجا چرخشی در گسل‌ها به وقوع نمی‌پیوندد؛ اما راستای جابه‌جایی در حال چرخش بوده و دو نوع کشش هم در قوس داخلی و هم خارجی بروز می‌کند. Tear fault boundaries یا مرزهای گسل‌های تراگذر یا ریلی گروه سوم برجستگی‌های ساختمانی هستند که دو گسل راستا لغز به‌موازات محور خمش با جهت جابه‌جایی مختلف آن را محدود می‌سازند. در اینجا نه گسل‌ها می‌چرخند و نه راستای جابه‌جایی، و میزان جابه‌جایی در طول جبهه راندگی یکنواخت است. دسته چهارم راندگی‌های عظیمی هستند [7] که امتداد راندگی از پیشانی تا پهلوی آن از آغاز دچار تغییر مسیر بوده و باعث می‌گردد تا راستای جابه‌جایی یکنواخت نبوده و خمش در جبهه راندگی ظاهر گردد. آخرین گروه خمش‌های عظیم ثانویه [8] هستند که در طی دوفاز دگرشکلی عمود بر هم تکوین می‌یابند. در اینجا هم گسل‌ها می‌چرخند و هم چرخش در مسیر جابه‌جایی از نوع غیرفعال رخ می‌دهد. قوس خارجی درآمیخته با کشش و درون قوس متحمل فشردگی می‌گردد.

فرض بر این است که اغلب کلان ساختارهای خمیده در رشته‌کوه‌های شرق ایران در طی حادثه کمانش [9] عمومی اواخر پالئوژن و اوایل نئوژن شکل‌گرفته‌اند (Bagheri and Damani Gol, 2020). کمانش قوس جون آباد (شکل ۱) در کدامیک از گروههای خمشی برجستگی ساختمانی بالا جای می‌گیرد و آیا می‌توان این خمش را محصول حادثه کوهزاد شرق ایران تصور نمود؟

نهشته‌های معدنی در منطقه جون آباد را می‌توان در سه گروه جای داد. بخش افیولیت ملانژی در پهنه جنوبی که در بخش‌هایی آغشته به سیالات و رگچه‌هایی از کربنات‌ها و سولفیدهای مس می‌باشد. گروه دوم رگه‌های سیلیسی آغشته به اکسیدها و کربنات‌های آهن می‌باشند که عمدتاً در بخش میانی محدوده ظاهر شده‌اند. دسته سوم سنگ‌ها فلسیک گرانیتی در بخش شمالی محدوده هستند که حاوی آنومالی‌های طلا و پاره‌ای عناصر فلزی پایه می‌باشند. رخنمون گروه دوم به شکل ایده‌آلی از قوس ساختاری تبعیت می‌کند و دو گروه دیگر بیشتر تابع سنگ‌شناسی میزبان است.

این خمش چه نقشی در شکل‌گیری و پراکندگی اندیس‌های معدنی منطقه داشته است؟ سؤال‌های اساسی این‌چنینی در این تحقیق به بحث گذاشته شده‌اند.

1. salient
2. Recess
3. foreland
4. Hinterland
5. Bow-and-arrow rule
6. Divergent transport
7. Lateral and oblique ramp boundaries
8. Orocline
9. Buckling



شکل ۱: موقعیت زمین‌شناسی قوس جون آباد. الف- نقشه زمین‌شناسی شرق ایران (Bagheri and Damani Gol, 2020). ب- سه پهنه مهم ساختاری قوس جون آباد؛ محدوده شمالی عمدتاً شامل سنگ‌های دگرگونی و آلتره و نفوذی‌های گرانیتی کمربند سفید سنگ، محدوده مرکزی شامل ناو شکل جون آباد

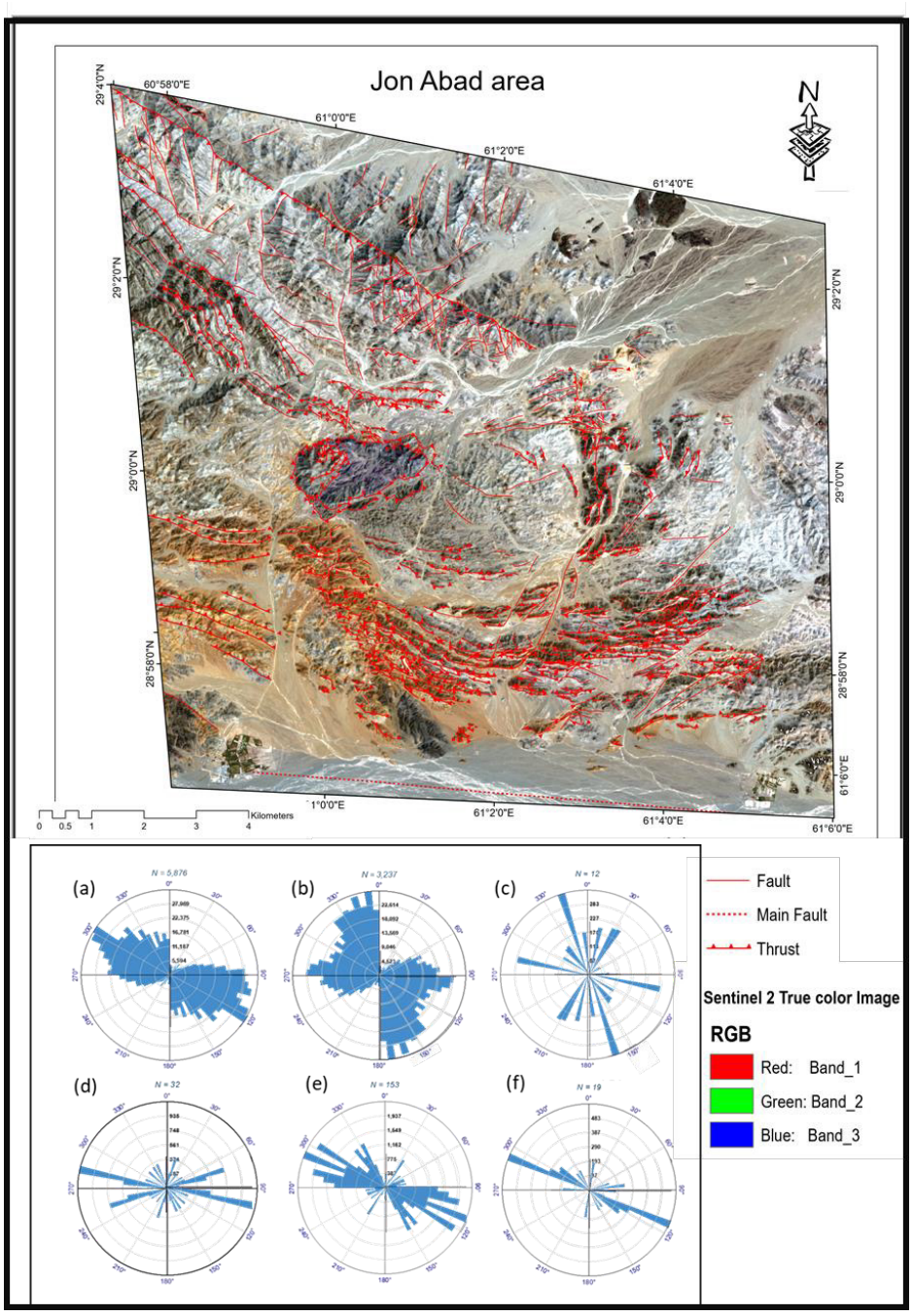
۲- ساختار ناو گون جون آباد و تکوین آن در طی حوادث دگرشکلی

ساختار ناو گون جون آباد با طول قوسی در حدود ۲۰ کیلومتر و پهنای قوسی با تقریب ۱۰ کیلومتر بر روی عکسهای ماهواره‌ای با تحدبی به سمت جنوب شرق در ۵۰ کیلومتری جنوب زاهدان مشخص می شود. دو گسل بزرگ، یکی از شمال بنام پالیز که با دو مولفه راندگی و راستالغزی راستبر و امتداد شمال غربی مشخص می شود، و دیگری از جنوب، گسل راستالغز چپبر جون‌آباد به طول بیش از یکصد کیلومتر با راستای غرب-شمال غرب، قوس جون آباد را محدود می سازند. در عین حال، هر دو گسل دیواره های قوس را بریده‌اند. ساختار اصلی قوس، شکل یک نیم نعلبکی داشته که لبه های پرشیبی در حدود ۶۰ تا ۷۰ درجه داشته (شکل ۱)، در حالیکه مرکز آن با راندگی‌ها و لایه‌های کم شیبتری تا میزان ۱۰ درجه به سمت غرب تا شمال غرب مشخص می شود. ساختار از برگه های متعدد رانده با ضخامتهای چند ده‌سانتیمتر تا چند صدمترساخته شده که امتداد آنها لبه شرقی قوس را دور میزنند(شکل ۲). سنگ‌شناسی این برگه‌ها در جنوب گسل جون‌آباد، در پایین ترین واحد ساختاری، عمدتاً از بخش‌هایی از ملانژ رسوبی-تکتونیکی دگرگون شده با ترکیب رسوبات پلاژیک(رسهای صورتی-ارغوانی و چرتهای نواری سبز روشن)، متابازیت (دیابازهای سبز و پیلولاوای بنفش رنگ) و آهکهای ائوسن در یک ماتریکس توربیدایتی تشکیل شده است.

در پیمایشی به‌سوی واحدهای ساختاری بالاتر و به سمت هسته ناو گون، توربیدایتها و بادبزن‌های زیردریایی دگرگون شده به شکل توالی‌های پسامیت و فیلیت ظاهر شده‌اند. در هسته ناو گون مجدداً سنگ‌های پلاژیک و متابازیت ظاهر می‌شوند و نهایتاً در قله مرکزی ناو گون سنگ‌های سیلیسی-کلاستیکی دگرگونی شامل متاسنداستون، اسلیت، فیلیت و متاکنگلومرا رخنمون می‌یابند.

این وضعیت ساختاری از واحدهای سنگی-چینه‌ای بیان می‌دارد که احتمالاً پیش از شکل گیری قوس، برگه‌های راندگی با حرکت عمومی از سمت شمال به جنوب در موقعیت گوه‌های افزایشی حاشیه بلوکهای لوت و افغان دگرگون گشته بر روی یکدیگر همراه با توسعه چین‌های مرتبط با راندگی‌های شکستی[1] رانده شده‌اند (شکل 3A). تورق‌های رخ اسلیتی مطابق

1. folding associated with break thrusts



شکل ۲: تصویر ماهواره‌ای با رنگهای طبیعی از ماهواره سنتینل و نمایش گسلهای رانده و راستا لغز بر روی آن از محدوده قوس ساختاری جون آباد در جنوب زاهدان. محور قوس روند عمومی و پلانج رو به شمال غرب را نشان میدهد. پاره ای ساختارهای اندازه‌گیری شده در نمودارهای استریوگرافیک آورده شده است::(aگسلهای راندگی :(b) گسلهای امتداد لغز :(c) محور چین خوردگی :(d) لایه بندی:(e) :برگ وارگی دگرگونی :(f) دایک

با دگرگونی بخش ضعیف‌تر رخساره شیست سبز در منطقه معرف حادثه اول دگرشکلی یا D1 می‌باشند. کمانش ساختار جون آباد احتمالاً از زمان ائوسن بالایی آغاز و در الیگوسن و اوایل نئوژن تکوین‌یافته است، چرا که بلوک‌های کربناته ائوسن زیرین-میانی از این زمان به بعد دچار چین‌خوردگی مجدد و یا لغزش برشی در حاشیه‌های خود شده‌اند. بخش عمده ساختار جون آباد شامل برگه‌های راندگی دچار فعالیت مجدد گشته‌اند. هر برگه راندگی در نگاه کلی و در پیکره میانی قوس از یک فرادیواره پسامیتی صلب ساخته شده

که بر روی یک فرودیواره خمیره فیلیتی لغزیده است. این فرودیواره رگه‌های سیلیسی فراوان آغشته به آهن را در خود توسعه داده؛ این رگه‌ها اغلب حاوی چین‌ها هم‌شیب و عدسی‌های کششی[1] (شکل 3B)، تورق‌های نوار برشی S-C' و گاهی ساختارهای دوپلکس مرتبط با راندگی می‌باشند (شکل 3C) که بیانگر جابه‌جایی قابل‌ملاحظه از اعماق به سطح و در مسافت قابل‌ملاحظه هستند. تورق هم‌زمان با دگرگونی در طی حادثه بعدی دچار کشیدگی طولی گشته و رگه‌های موازی سیلیسی کششی، تورق و رگه‌های قبلی را بریده‌اند (شکل 3D). چنین کششی در طول، به‌خوبی در قوس خارجی ظاهر شده است و به نظر در طی حادثه دوم دگرشکلی D2 یا کمانش قوس بروز کرده است. در یال شمال شرقی قوس عدسی‌های عظیم تا میان‌مقیاس گرانیتی که دچار کشش شده‌اند به‌خوبی رخنمون دارند (شکل 3E). همچنین گسل‌های پلکانی با جابه‌جایی دومینووار به طور عرضی در این گرانیت‌ها توسعه‌یافته‌اند (شکل درون تصویر 3E). علاوه بر شواهد ذکر شده، گسل‌های مزدوج در قوس خارجی‌شکل گرفته و به درون قوس داخلی هم گسترش‌یافته‌اند (شکل ۲). در یال جنوبی قوس، گسل‌هایی با راستای شمال شرقی با جابه‌جایی راستا لغز چپ بر قابل‌ملاحظه ظاهر شده‌اند درحالی‌که گسل‌های شمال غربی جابه‌جایی راست‌بر محدودی دارند. این جابه‌جایی حکایت از کشش در بخش جنوبی قوس داشته و قابل‌مقایسه با دیواره شمالی است. در مقابل در درون قوس چین‌های عظیم پارازیتی سندی بر تراکم بخش داخلی هستند. همچنین بالاآمدگی برگه‌های راندگی در مرکز قوس ممکن است به سبب این فشردگی باشد. علاوه بر شواهد فوق، ساختارهای چین‌خوردگی مجدد نیز به شکل محلی قابل‌تشخیص می‌باشند (شکل 3F).

۳- تحلیل جنبشی در قوس جون آباد

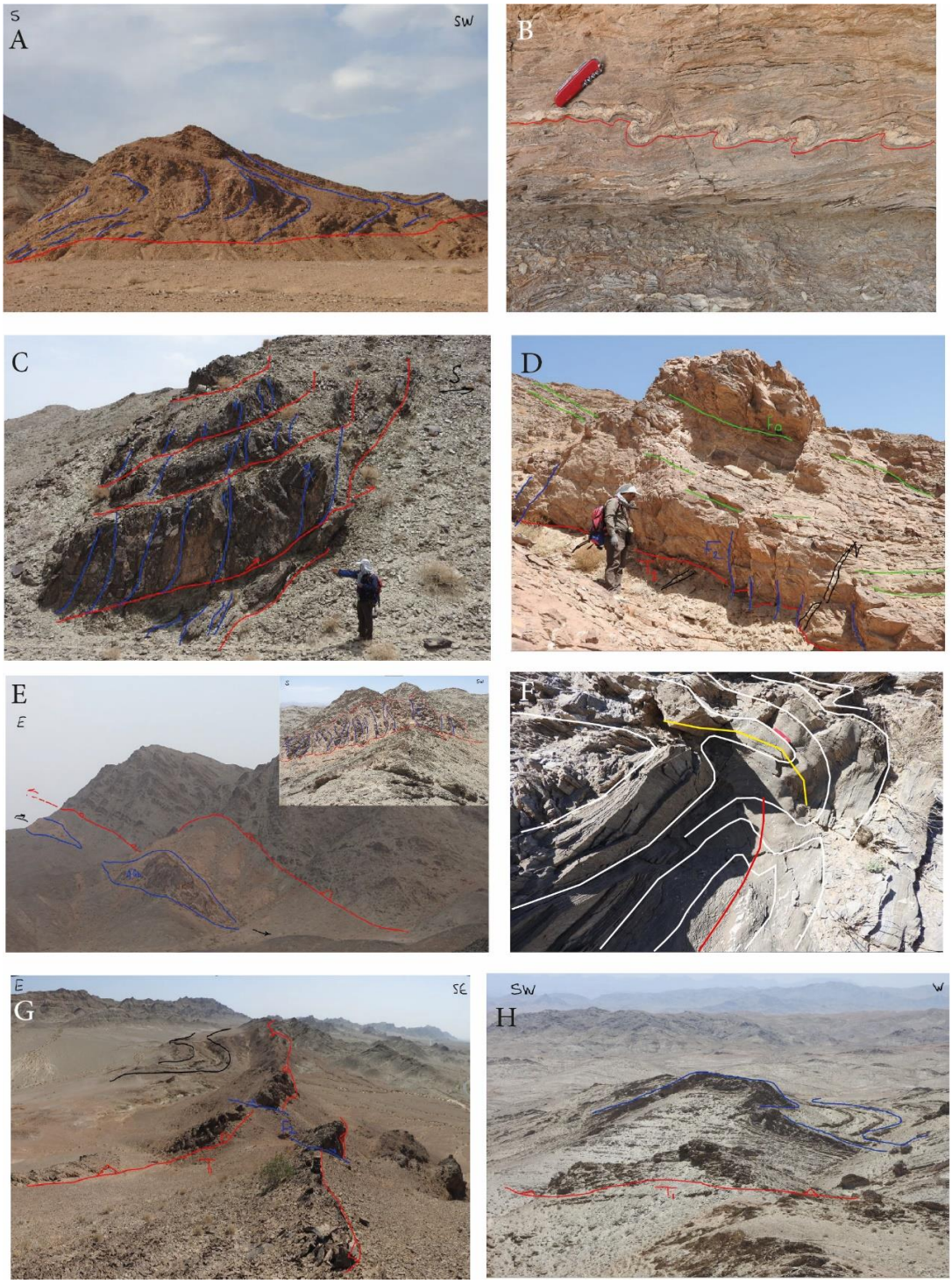
مطالعه گسل‌های رانده در سرتاسر قوس جون آباد، هم در خارج و هم در داخل آن بیان می‌دارد که نوعی حرکت ظاهراً واگرایانه از داخل به خارج قوس به وقوع پیوسته است. لولا و دیواره جنوب و جنوب غربی ساختار مملو از برگه‌های رانده رو به جنوب است؛ اما شمال آن تنها به گسل راندگی-راستا بر پالیز ختم می‌شود. این مسئله بازگو می‌کند که گسل پالیز پس از توسعه دیگر راندگی‌ها ساختار را از شمال بریده و محدود کرده است. در همه پروفیل‌های عمود بر دیواره قوس، شامل امتداد لایه‌ها و گسل‌های مربوطه، مشخص شده که جابه‌جایی قابل‌ملاحظه بوده است. رگه‌های سیلیسی خمیری با چین‌های هم شیب و بررسی برش‌های عرضی راندگی‌ها که بخش رمپ‌های جانبی و مایل را می‌توان با رمپ‌های پیشانی راندگی مقایسه نمود، شواهدی هستند که امکان قضاوت در مورد میزان جابه‌جایی نسبی و جهت جابه‌جایی را فراهم ساخته است. این شواهد تأکید می‌کنند که مقدار جابه‌جایی تقریباً در همه‌جا قابل‌ملاحظه بوده و تنها به بخش پیکان قوس محدود نمی‌گردد. اما راندگی‌های چین خورد مهم‌ترین سندی هستند که بیان می‌دارند این خمش عمومی و ناحیه‌ای بوده که راندگی‌های قبلی رو چرخانده و در واقع هیچ حرکت واگرای فعالی رخ نداده است (شکل 3G).

در طی فرایند دوم دگرشکلی و خمش قوس، راندگی‌های موازی قدیمی در طی چرخش غیرفعال تغییر مسیر داده‌اند. این راندگی‌ها تا حدودی شواهد خردشدگی و یا جابه‌جایی ثانوی را در خود حفظ کرده‌اند، هر چند مقدار آن زیاد نیست. بسیاری از رگه‌های سیلیسی عمود بر تورق و لایه‌بندی در طی این کشش ظاهر شده‌اند؛ اما مجدداً در طی فعالیت مجدد راندگی‌ها بریده شده‌اند. کشش در خارج قوس و فشارش و چروک‌خوردگی در درون (شکل 3H) همراه با گسل‌های مزدوج حاشیه خود نیز سندهایی مبنی بر عملکرد دو حادثه دگرشکلی پیاپی با زاویه تندی نسبت به یکدیگر هستند.

۴- نتیجه‌گیری، مدل تکوین قوس جون آباد و توزیع نهشته‌های معدنی

بر اساس شواهد ارائه شده به نظر مدل خمش اروکلاینی برای قوس جون آباد محتمل می‌باشد هر چند خمش‌های منفرد و فرعی در رمپ راندگی‌های محلی قابل‌استناد است. در نگاهی کلی، کوتاه شدگی با راستای شمال شرق-جنوب غرب هم‌زمان با کمانش عظیم در شرق ایران در اواخر پالئوژن با شکل‌گیری قوس‌های متعددی همراه بوده است. زوج ابر تاق‌شکل

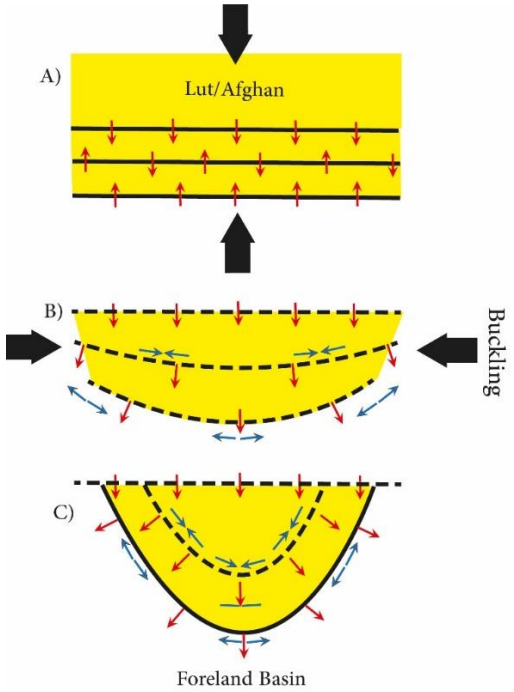
1. isoclinal folds and extensional lenses



شکل ۳: تصاویر صحرایی از ساختارهای مختلف قوس جون آباد؛ A) گسل رانده و چین خوابیده رو به جنوب در فرادیواره راندگی شکستی؛ B) ریز چینهای موازی در رگه‌های سیلیسی فرودیواره گسل رانده؛ C) ساختار دوپلکس راندگی در دیواره جنوب شرقی قوس؛ D) گسل رانده و گسلهای عرضی مرتبط با حادثه خمش که راندگی را بریده‌اند؛ همچنین رگه‌های کششی سیلیس نیز بریده شده‌اند؛ E) عدسی های کششی در دیواره شمال شرقی قوس جون آباد؛ تصویر داخلی بخشی از عدسی گرانیتی حاوی گسلهای عرضی پلکانی را نشان میدهد؛ F) ساختار تداخلی چین های همپوشان از تیپ سه؛ G) گسل راندگی و فرادیواره چین خورده در دیواره جنوب شرقی قوس؛ H) چین خوردگی پارازیتی در بخش درونی قوس.

شورو در غرب و ناو شکل جون‌آباد در شرق آن محصول کمانش فضای بین حوضه سفیدابه در شرق و بلوک لوت در غرب می‌باشد.

چنین کمانشی توزیع نهشته‌های معدنی خصوصاً سیلیس‌های حامل اکسیدهای آهن را به‌خوبی کنترل کرده است. زون‌های آهنی به‌خوبی روی این نیم حلقه‌ها پراکنده شده‌اند. همچنین ملانژهای افیولیتی در شمال و جنوب قوس که گاهی در برگیرنده کربنات‌های مس و یا اکسیدهای منگنز هستند روی همین قوس واقع شده‌اند. طلا توسط رگه‌ها و سیل‌های آلکالی فلدسپات گرانیت در دیواره شمالی قوس کنترل گشته است.



Primary uniform parallel transport;
Passive vertical-axis rotation of transport during bending;
Vertical-axis rotation of fault (i.e. folding of fault);
Extensional strain on the outer side of salient;
Contractional strain on the inner side of salient.
Carey (1955); Marshak (1988); Marshak et al. (1992);
Ferill and Groshong (1993); Hindle and Burkhard (1999);
Sussman et al. (2003).

شکل ۴: مدل تحول کمربند چین-رانده حاشیه لوت/افغان و خمش آن در اواخر پالئوژن. پاره‌ای از ویژگی های خمش‌های اروکلاینی شرح داده شده است.

۵- تقدیر و تشکر

نویسندگان از حمایت‌های مالی شرکت توسعه معادن و صنایع معدنی فاتح تحت قراردادی به شماره FM-IE-Co-A9 کمال تشکر و قدردانی را دارند.

منابع

Bagheri, S. and Daman-Gol, S.H., 2020. The eastern Iranian Orocline. Earth –Science Review, 210,1-43. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103322.

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

Elliott, D., 1976. The motion of thrust sheets: Journal of Geophysical Research. 81, 949–963.

Ferrill, D.A., and Groshong, R.H.J., 19. Kinematic model for the curvature of the northern Subalpine Chain, France: Journal of Structural Geology, v. 15,523–541, doi: 10.1016/0191-8141(93)90146-2.

Hindle, D., and Burkhard, M., 1999. Strain, displacement and rotation associated with the formation of curvature in fold belts; the example of the Jura arc: Journal of Structural Geology, v. 21,1089–1101, doi: 10.1016/S0191-8141(99)00021-8.

Marshak, S., 1988. Kinematics of orocline and arc formation in thin-skinned orogens: Tectonics. 7, 73–86.

Marshak, S., and Wilkerson, M.S., 1992. Effect of overburden thickness on thrust belt geometry and development: Tectonics, v. 11, p. 560–566.

Sussman, A.J., Butler, R.B., Dinares-Turell, J., and Verges, J., 2004. Vertical axis rotation of a foreland fold and implication for orogenic curvature: An example from the southern Pyrenees, Spain: Earth and Planetary Science Letters, 218, 435–449.