



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۳۰

doi 10.22077/jt.2026.11910.1232

مقاله پژوهشی

نقش پهنه های برشی به عنوان کنترل کننده های ساختاری در شکل گیری طلای تیپ کوهزاد با نگاهی بر اندیس های طلا در پهنه سندنجد- سیرجان، غرب ایران

مهدی بهیاری^{۱*}، فرزاد فتح اله زاده^۲، مریم حیدری^۲

۱. دانشیار، گروه زمین شناسی، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

۲. کارشناس ارشد زمین شناسی تکتونیک، دانشگاه ارومیه، ارومیه، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۵/۲۹

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۳

توزیع مکانی کانسارهای طلای تیپ کوهزاد در بسیاری از کمربندهای کوهزایی با سامانه های گسلی و پهنه های برشی ارتباط دارد. با این حال، حضور پهنه برشی به تنهایی بیانگر کانه زایی نیست و شناسایی بخش های مؤثر آن نیازمند بررسی هم زمان هندسه، سینماتیک، تمرکز واتنش و شواهد دگرسانی و رگه زایی است. در این پژوهش، نقش پهنه های برشی و ساختارهای وابسته در کنترل مکانی کانی سازی طلای تیپ کوهزاد در شمال غرب زون سندنجد- سیرجان، غرب ایران، با تلفیق مطالعات ساختاری، تحلیل هندسی و سینماتیکی و مطالعات ریزساختاری بررسی شد. داده های ساختاری از ۳۸ ایستگاه برداشت و ارتباط فضایی اندیس های طلا با پهنه های برشی، گسل ها، شکستگی ها، رگه های کوارتزی و ساختارهای مرتبه دوم ارزیابی شد. مطالعات ریزساختاری بر مقاطع نازک در صفحه XZ و با تأکید بر فابریک های $S-C$ ، پورفیرو کلاست های چرخیده، میلونیتی شدن، تمرکز واتنش و روابط کانی های اپک با بر گوارگی انجام گرفت. نتایج نشان می دهد که دگرشکلی در منطقه ناهمگن بوده و در پهنه های برشی متمرکز شده است و مؤلفه راستگرد غالب است. بر گوارگی های نوار برشی، چین های نامتقارن Z شکل، لتهای برشی، رگه های کوارتزی چین خورده و بودین شده و ریزساختارهای برشی، تداوم دگرشکلی از مقیاس ناحیه ای تا میکروسکوپی را نشان می دهند. تحلیل Fry نیز ناهمسانگردی و تغییرات شدت واتنش را تأیید کرد و نسبت محوری فابریک در صفحه XZ را ۱۰۴۰ تا ۲۰۷۰ نشان داد. تلفیق این شواهد بیانگر کنترل ساختاری سلسله مراتبی است؛ به گونه ای که پهنه های برشی و گسل های بزرگ مقیاس مسیرهای اصلی انتقال سیالات و ساختارهای فرعی، شکستگی های مقاطع، نواحی کششی و گذار شکل پذیر-شکننده، محل های مناسب تمرکز سیالات و کانی سازی را فراهم کرده اند.

کلید واژه ها: کنترل کننده ساختاری، طلای تیپ کوهزاد، پهنه برشی، کانی زایی، سندنجد- سیرجان

* ایمیل: m.behyari@urmia.ac.ir

تلفن تماس: ۰۹۱۴۴۰۱۵۶۲۹



Research Paper

Structural Controls on Orogenic Gold Mineralization: Insights from Shear Zones and Gold Occurrences in the Sannandaj-Sirjan, Western Iran

Mahdi Behyari^{1*}, Farzad Fathollahzadeh², Maryam Heydari²

1. Associate Professor, Department of Geology, University of Urmia, Urmia, Iran

2. M.Sc. in Tectonic Geology, University of Urmia, Urmia, Iran

Abstract

The spatial distribution of orogenic gold deposits in many orogenic belts is closely associated with fault systems and shear zones. However, the presence of a shear zone alone does not necessarily indicate gold mineralization, and identification of its effective segments requires simultaneous assessment of geometry, kinematics, strain localization, alteration, and veining. This study investigates the role of shear zones and associated structures in controlling the spatial distribution of orogenic gold mineralization in the northwestern Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran, through an integrated approach involving structural field observations, geometric and kinematic analyses, and microstructural studies. Structural data were collected from 38 stations, and the spatial relationships between gold occurrences and shear zones, faults, fractures, quartz veins, and second-order structures were evaluated. Microstructural analyses were conducted on thin sections oriented in the XZ plane, focusing on S-C fabrics, rotated porphyroclasts, mylonitization, strain localization, and the relationships between opaque minerals and foliation. The results indicate heterogeneous deformation characterized by strain localization within shear zones, with a dominant dextral component. Shear-related microstructures demonstrate the continuity of deformation from the regional to microscopic scales. Fry analysis further confirms strain anisotropy and spatial variations in strain intensity, with XZ fabric axial ratios ranging from 1.40 to 2.70. Integration of these results indicates a hierarchical structural control, whereby major shear zones and faults acted as principal fluid pathways, whereas subsidiary structures, cross-fractures, extensional sites, and ductile-brittle transitions provided favorable sites for localized fluid flow and mineralization.

Keywords: Structural control, Orogenic gold deposit, shear zone, Mineralization, Sanandaj-Sirjan

*Email: m.behyari@urmia.ac.ir
Tel: +989144015629

مقدمه

ایجاد فضاهای کشتی در داخل پهنه‌های برشی از مهم‌ترین سازوکارهایی هستند که منجر به رسوب طلا در این سیستم‌ها می‌شوند (Goldfarb and Pitcairn, 2023; Heidari et al., 2016; Nassif et al., 2018). به همین دلیل، بسیاری از پژوهشگران پهنه‌های برشی را مهم‌ترین کنترل‌کننده ساختاری در تشکیل کانسارهای طلای کوهزاد معرفی کرده‌اند.

کمربند زاگرس به عنوان بخشی از سامانه کوهزایی آلپ-همالیا حاصل فروانش و در نهایت برخورد صفحه عربی با صفحه اوراسیا است. این فرآیند منجر به شکل‌گیری مجموعه‌ای پیچیده از واحدهای دگرگونی، آذرین و رسوبی و همچنین توسعه سامانه‌های گسلی و پهنه‌های برشی متعدد شده است (Agard et al., 2014; Alavi, 2004; François et al., 2011). در میان زیرپهنه‌های مختلف زاگرس، زون سندج-سیرجان به دلیل سابقه طولانی دگرشکلی، دگرگونی و فعالیت‌های ماگمایی، یکی از مست‌سخت‌ترین مناطق برای تمرکز کانی‌سازی‌های فلزی به ویژه طلا محسوب می‌شود.

در بخش شمال‌غربی زون سندج-سیرجان و مناطق سقز، بانه، مریوان و سردشت، اندیس‌ها و کانسارهای متعددی از طلای تیپ کوهزاد شناسایی شده‌اند (Aliyari et al., 2012; Aliyari et al., 2007; Almasi et al., 2017; Kouhestani et al., 2014). بسیاری از این رخدادهای معدنی در مجاورت پهنه‌های برشی و سامانه‌های گسلی اصلی قرار گرفته‌اند و شواهد متعددی از ارتباط میان دگرشکلی، دگرسانی و کانی‌سازی در آنها مشاهده می‌شود. حضور رگه‌های کوارتزی، دگرسانی‌های سیلیسی، سربستی و کربناتی، توسعه فابریک‌های برشی و تمرکز سولفیدها در امتداد ساختارهای دگرشکلی از جمله ویژگی‌های مشترک این اندیس‌ها به شمار می‌روند (Aliyari et al., 2014; Behyari et al., 2020).

با وجود انجام مطالعات متعدد در زمینه زمین‌شناسی اقتصادی، ژئوشیمی، دگرسانی و منشأ سیالات در اندیس‌ها و کانسارهای طلای زاگرس، نقش سلسله‌مراتبی ساختارها و به ویژه پهنه‌های برشی در کنترل مکانی کانی‌سازی طلا در مقیاس منطقه‌ای هنوز

کانسارهای طلای تیپ کوهزاد^۱ یکی از مهم‌ترین منابع طلای جهان به شمار می‌روند و بخش قابل توجهی از ذخایر و تولید جهانی طلا را در بر می‌گیرند (Aliyari et al., 2007; Goldfarb and Pitcairn, 2023; Wilson et al., 2020). این کانسارها در ارتباط مستقیم با فرآیندهای کوهزایی و دگرشکلی پوسته‌ای شکل گرفته و در گستره‌ای وسیع از کمربندهای زمین‌ساختی برخوردی گزارش شده‌اند. برخلاف بسیاری از سامانه‌های کانه‌زایی که ارتباط نزدیکی با فعالیت‌های ماگمایی دارند، کانسارهای طلای کوهزاد عمدتاً در نتیجه مهاجرت سیالات در طی مراحل مختلف تکامل کمربندهای کوهزایی و در ارتباط با ساختارهای فعال پوسته‌ای تشکیل می‌شوند (Goldfarb and Groves, 2015; Goldfarb and Pitcairn, 2023). از این رو، شناخت کنترل‌کننده‌های ساختاری در این نوع کانی‌سازی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.

یکی از ویژگی‌های شاخص کانسارهای طلای کوهزاد، وابستگی شدید آنها به ساختارهای دگرشکلی به‌ویژه گسل‌ها و پهنه‌های برشی است. در بسیاری از کمربندهای طلادار جهان، پهنه‌های برشی در مقیاس پوسته‌ای به عنوان مسیرهای اصلی انتقال سیالات کانه‌ساز و محل تمرکز دگرشکلی عمل می‌کنند (Groves et al., 2018; Wilson et al., 2020). این ساختارها با افزایش نفوذپذیری پوسته، ایجاد فضاهای باز موضعی و تمرکز واتنش، شرایط مناسبی برای گردش سیالات و نهشت مواد معدنی فراهم می‌آورند. در چنین محیط‌هایی، ساختارهای مرتبه دوم و سوم نظیر شاخه‌های فرعی گسل‌ها، خمیدگی‌های گسلی، ساختارهای کشتی، تقاطع شکستگی‌ها و لولاهای چین‌ها نیز می‌توانند به عنوان مکان‌های مطلوب برای تمرکز کانی‌سازی عمل کنند.

پهنه‌های برشی علاوه بر نقش انتقال‌دهنده سیالات، در فرآیند تمرکز و ته‌نشست طلا نیز نقش اساسی دارند. تغییرات موضعی فشار و دما، کاهش ناگهانی فشار سیال، واکنش میان سیال و سنگ میزبان و



قاره ای شکل گرفته است. بر این اساس، پهنه های زمین شناسی غرب ایران و نواحی مجاور معمولاً به واحدهای اصلی شامل پهنه رسوبی چین خورده-رانده، پهنه دگرشکل شده سنندج-سیرجان و کمر بند ماگمایی ارومیه-دختر تفکیک می شوند (Mohajjel et al., 2003; Alavi, 1994) (شکل ۱). این تقسیم بندی بیانگر مراحل مختلف دگرگونی، ماگماتیسم و دگرشکلی مرتبط با تکامل و بسته شدن نئوتتیس در غرب ایران است (Mohajjel and Fergusson, 2000; Mohajjel et al., 2003; Agard et al., 2005, 2011; Hassanzadeh and Wer-nicke, 2016; Shafai Moghadam et al., 2018). بخش شمال غربی زون سنندج-سیرجان، به ویژه در محدوده سقر، سردشت، مریوان و بانه، به عنوان یک پهنه متالورژی مهم غنی از کانسارهای طلای اوروژنیک شناخته می شود. پهنه سنندج-سیرجان بخش داخلی دگرگونی-ماگمایی زاگرس را تشکیل می دهد و در واقع بازمانده حاشیه فعال قاره ایران در زمان فرو رانش نئوتتیس محسوب می شود. این پهنه از نظر سنگ شناسی شامل مجموعه متنوعی از سنگ های آتشفشانی-رسوبی دگرگون شده، توالی های کلاستیک-کربناته پالئوزوئیک تا مزوزوئیک و مجموعه های آذرین با سن های مختلف است. شواهد سنسنجی نشان می دهد که تاریخچه سنگ شناسی و تکتونیکی پهنه سنندج-سیرجان چند مرحله ای بوده است. در محدوده جنوب سقر، مطالعات ژئوکرونولوژیک نشان داده اند که بخشی از واحدهایی که پیش تر به عنوان سنگ های پی سنگ پر کامبرین-پالئوزوئیک در نظر گرفته می شدند، در واقع دارای سن تبلور کرتاسه پیشین، در حدود ۱۱۵-۱۰۷ میلیون سال، هستند (Gholi-pour et al., 2021). بنابراین، سن و منشأ سنگ های این پهنه یکنواخت نبوده و تکامل آن حاصل چندین مرحله رسوب گذاری، ماگماتیسم، دگرشکلی و دگرگونی بوده است.

شدت دگرشکلی در این پهنه منجر به تشکیل پهنه های برشی شکل پذیر تا شکننده-شکل پذیر، شیب ها و سنگ های دگرگون شده با درجه آمفیبولیت و پهنه های گسترده میلوئیتی شده است، که محیط مناسبی برای تمرکز و حرکت سیالات کانه دار فراهم کرده اند (Heydari and Behyari, 2024). این پهنه از

به صورت جامع مورد بررسی قرار نگرفته است. بخش عمده پژوهش های پیشین بر ویژگی های کانی شناسی و ژئوشیمیایی تمرکز داشته اند، در حالی که تحلیل یکپارچه ارتباط میان پهنه های برشی، ساختارهای فرعی وابسته و تمرکز کانی سازی می تواند درک بهتری از فرآیندهای کنترل کننده تشکیل طلا و همچنین ارائه معیارهای مؤثر اکتشافی فراهم کند (Behyari and Fathollahzadeh, 2023).

هدف اصلی این پژوهش، بررسی نقش پهنه های برشی و ساختارهای وابسته در کنترل کانه زایی طلای تیپ کوهزاد در محدوده مورد مطالعه است. در این راستا، ارتباط مکانی کانه زایی با پهنه های برشی، گسل ها، شکستگی ها و سایر ساختارهای اصلی، هندسه پهنه های برشی و نقش ساختارهای اصلی و فرعی در کنترل مسیر و تمرکز سیالات کانه زا بررسی می شود. همچنین، تغییرات و تمرکز واتنش در مقیاس های رخنمون تا میکروسکوپی و ارتباط آن با توسعه فابریک های برشی، رگه های کوارتزی، دگرسانی و کانی های سولفیدی ارزیابی می شود. در نهایت، با تلفیق شواهد ساختاری ریزساختاری و کانه زایی، الگوی کنترل ساختاری تبیین و یک مدل ساختاری چندمقیاسی برای شناسایی معیارهای مؤثر در هدف گذاری اکتشافی ارائه می شود.

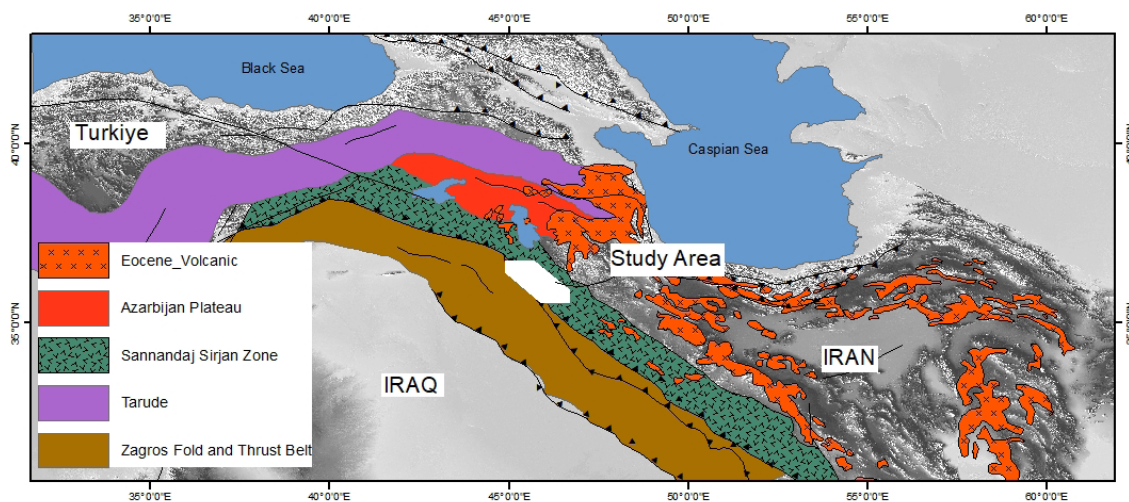
زمین ساخت منطقه مورد مطالعه

کمر بند چین خورده-رورانده زاگرس بخشی میانی سیستم کوهزایی آلپ-همالیا به شمار می رود که در نتیجه همگرایی طولانی مدت صفحه عربی و صفحه اوراسیا از مزوزوئیک میانی تاکنون شکل گرفته است (Agard et al., 2011; Behyari and Shahbazi, 2019; Berberian and King, 1981).

فرو رانش لیتوسفر اقیانوسی نئوتتیس و به دنبال آن، برخورد و همگرایی صفحات، نقش مهمی در شکل گیری ساختارهای تکتونیکی، پهنه های دگرشکلی و فعالیت های ماگمایی در غرب ایران داشته است. اگرچه درباره زمان بندی و سازوکار دقیق فرایندهای فرو رانش و برخورد قاره ای دیدگاه های متفاوتی وجود دارد، چارچوب کلی تکامل تکتونیکی منطقه بر پایه فرایندهای فرو رانش نئوتتیس و برخورد

نظیر گسل سقز-سردشت و گسل مریوان-بانیه به عنوان کانال‌های اصلی حرکت سیالات عمقی عملکرده‌اند. در درون این ساختارهای اصلی، عناصر مرتبه دوم همچون خمیدگی‌ها، شکستگی‌های فرعی متقاطع، شاخه‌های فرعی و مناطق کششی محلی موجب ایجاد فضاهای مناسب برای نهشت رگه‌های کوارتز-کربناته شده‌اند. پهنه‌های برشی تحت رژیم‌های ترافشارشی تا تراکشی، با افزایش موضعی تخلخل و نفوذپذیری، مسیرهای مناسبی برای انتقال و تمرکز سیالات کانه‌زا

دیدگاه متالورژی میزبان اندیس‌ها و کانسارهای متعدد طلای اوروژنیک نظیر قلقله، کسنزان، کرویان و باریکا، گندمان، قبعلوجه، حمزه قرنین است که همگی گویای کنترل ساختاری مؤثر در شکل‌گیری کانه‌زایی طلا هستند. زمین‌ساخت و به‌ویژه ساختارهای گسلی و پهنه‌های برشی نقش کلیدی در افزایش تراوایی پوسته زمین و چرخش سیالات کانه‌زا و کانه‌زایی طلا در زاگرس غربی ایفا می‌کنند (Aliyari et al., 2012; Aliyari et al., 2007). گسل‌های اصلی منطقه‌ای



شکل ۱- نقشه زمین‌شناسی ناحیه‌ای منطقه مورد مطالعه به همراه پهنه‌های ساختاری

صحرائی و شواهد ریزساختاری به‌صورت تلفیقی بررسی شدند. با توجه به تمرکز پژوهش بر هندسه سامانه‌های برشی و چگونگی توزیع واتنش در آن‌ها، داده‌ها در دو مقیاس صحرائی و میکروسکوپی گردآوری و تحلیل شدند. در این مطالعه، مفهوم توزیع واتنش (strain partitioning) برای تفسیر نحوه توزیع فضایی مؤلفه‌های مختلف تغییرشکل و سهم نسبی آن‌ها در بخش‌های مختلف سامانه برشی به کار گرفته شد. بر این اساس، شواهد حاصل از ساختارهای صحرائی و ریزساختاری در کنار نتایج تحلیل واتنش، به‌منظور تفسیر الگوی توزیع واتنش و ارتباط آن با کنترل ساختاری کانه‌زایی مورد استفاده قرار گرفتند.

مطالعات صحرائی در سه سامانه برشی اصلی واقع در محدوده اندیس‌های طلادار شمال‌غرب پهنه سندانج-سیرجان انجام شد. در مجموع، ۳۸ ایستگاه ساختاری به‌گونه‌ای انتخاب شدند که تغییرات ساختاری در

فراهم کرده‌اند. این سیالات در سامانه‌های طلای کوهزاد عمدتاً از نوع H_2O-CO_2 و مرتبط با فرایندهای دگرگونی هستند (Goldfarb and Groves, 2015). در مقیاس کانسار، وجود رگه‌ها و رگچه‌های کوارتزی، بافت‌های میلونیتی، برش‌های کاتاکلاستیک و هاله‌های دگرسانی (سیلیسی، کربناته، سریسیتی و سولفیدی) از شاخص‌ترین ویژگی‌های کنترل ساختاری طلای اوروژنیک به شمار می‌آیند. در شمال پهنه سندانج-سیرجان، مطالعات انجام‌شده بر نقش مهم پهنه‌های برشی و ساختارهای ترافشارشی در کنترل و تمرکز کانی‌سازی طلا تأکید کرده‌اند (Aliyari et al., 2012; Gholipour et al., 2021; Haji et al., 2020).

روش کار

به‌منظور بررسی نقش پهنه‌های برشی در کنترل ساختاری کانه‌زایی طلای تیپ کوهزاد، داده‌های

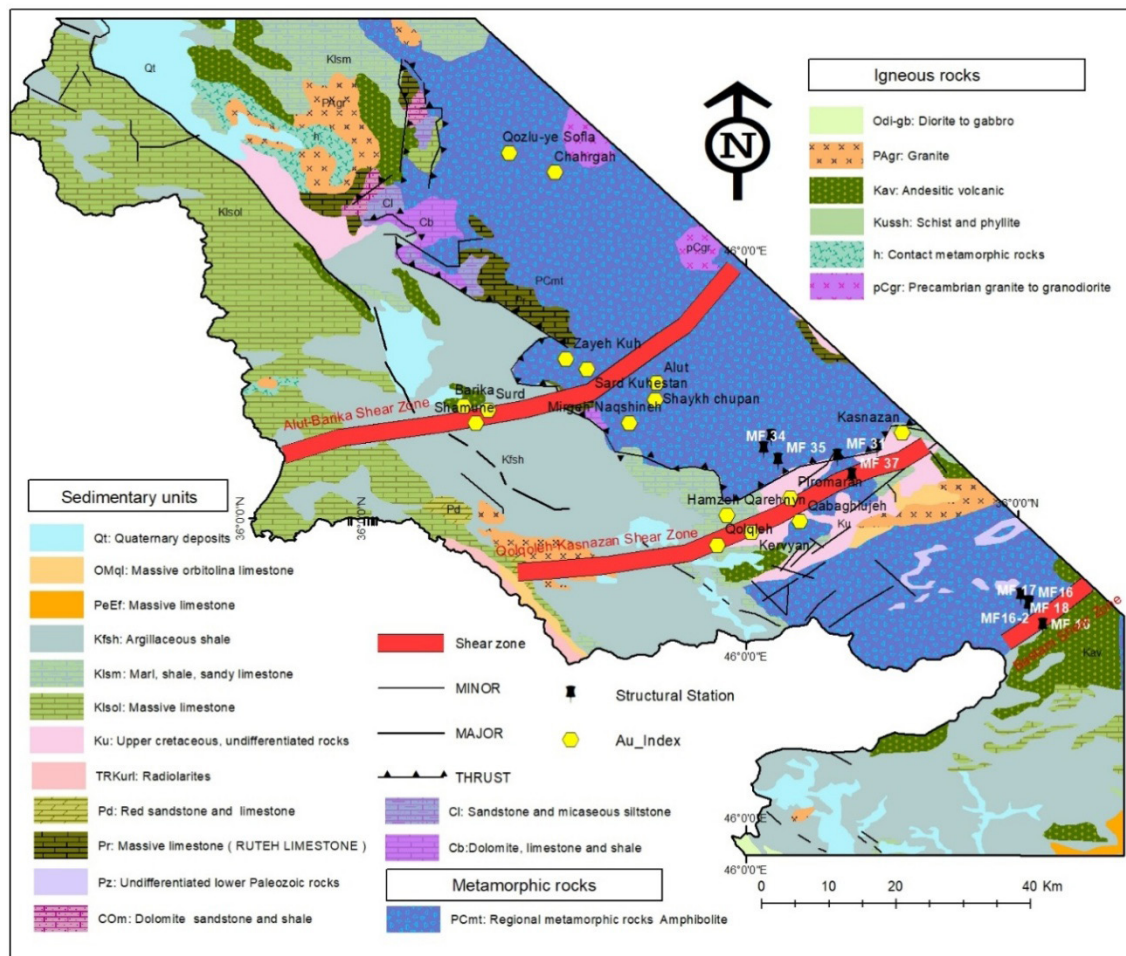
برشی، موقعیت فضایی اندیس های طلا نسبت به هسته پهنه های برشی، ساختارهای مرتبه دوم، تغییرات هندسی سامانه های برشی و شواهد تمرکز و تنش حاصل از مطالعات صحرایی و ریزساختاری به صورت تطبیقی بررسی شد. بر این اساس، نقش هر یک از عناصر ساختاری در هدایت سیالات و ایجاد محل های مناسب برای نهشت طلا مورد تفسیر قرار گرفت (شکل-۲).

به منظور بررسی شواهد تغییر شکل در مقیاس میکروسکوپی، از نمونه های برداشت شده از پهنه های برشی و سنگ های میزبان، مقاطع نازک تهیه شد. تمامی مقاطع در صفحه XZ، موازی با خطوارگی کششی و عمود بر برگوارگی، تهیه شدند تا شاخص های سینماتیکی و ریزساختارهای مرتبط با برش با بیشترین وضوح قابل مشاهده باشند.

در مطالعات ریزساختاری ویژگی هایی مانند

امتداد و عرض پهنه های برشی و همچنین نواحی دارای شواهد کانی سازی را پوشش دهند. در هر ایستگاه، عناصر ساختاری شامل برگوارگی، خطوارگی، گسل ها، پهنه های برشی، رگه های کوارتزی و سایر ساختارهای وابسته برداشت و ثبت شدند.

عمده اندازه گیری های صحرایی مربوط به برگوارگی بود که به عنوان مهم ترین عنصر ساختاری منطقه، مبنای تحلیل هندسه دگرشکلی قرار گرفت. علاوه بر آن، امتداد و شیب گسل ها، امتداد و میل خطوارگی های کششی و روابط هندسی میان عناصر ساختاری شامل تغییرات راستا، شاخه های فرعی، خمیدگی ها و ساختارهای برشی وابسته نیز مورد بررسی قرار گرفت. این اطلاعات برای تحلیل نحوه توزیع و تنش، تعیین الگوی تغییر شکل و بررسی ارتباط میان سامانه های برشی و اندیس های طلای منطقه به کار گرفته شد. همچنین برای ارزیابی نقش کنترل کننده پهنه های



شکل ۲- نقشه زمین شناسی محدوده مورد مطالعه به همراه موقعیت اندیس های طلا و ایستگاه های ساختاری برداشت شده

توده سنگ، در جابه‌جایی و تمرکز سیالات گرمایی نقش داشته باشند و از این طریق، شرایط مناسبی را برای استقرار کانی‌سازی طلای تیپ کوهزاد فراهم کنند. با این حال، بر گوارگی‌های موجود در منطقه از نظر سازوکار تشکیل، هندسه و پراکندگی یکسان نیستند و بازتاب‌دهنده مراحل و رژیم‌های متفاوت دگرشکلی هستند. در منطقه مورد مطالعه، دو گروه اصلی بر گوارگی شامل بر گوارگی‌های تراکمی^۱ (ccc) و بر گوارگی نوارهای برشی^۲ (sbc) قابل تشخیص است. بر گوارگی‌های تراکمی در ارتباط با فشردگی و کوتاه‌شدگی ایجاد شده و هم‌راستا با بر گوارگی ناحیه‌ای غالب در زون سندج-سیرجان، دارای روند عمومی شمال‌غرب-جنوب‌شرق (NW-SE) هستند. در مقابل، بر گوارگی نوار برشی در ارتباط مستقیم با پهنه‌های برشی و در نتیجه واتنش برشی توسعه یافته و عمدتاً در محدوده این پهنه‌ها متمرکز است. این ساختارها روند شمال‌شرق-جنوب‌غرب (NE-SW) داشته و بر گوارگی تراکمی قدیمی‌تر را قطع می‌کنند. از این‌رو، رابطه قطع‌شدگی میان این دو نسل بر گوارگی، همراه با تفاوت در پراکندگی و شدت دگرشکلی، شواهدی از تکامل مرحله‌ای و چندمرحله‌ای ساختارهای دگرشکلی در منطقه فراهم می‌کند. بر گوارگی تراکمی در گستره وسیعی از منطقه توسعه یافته و بیانگر یکی از مراحل اصلی دگرشکلی ناحیه‌ای است (شکل ۳-ا)، در حالی که بر گوارگی نوارهای برشی پراکندگی محدودتر و ناهمگنی دارد و عمدتاً در داخل و حاشیه پهنه‌های برشی مشاهده می‌شود. این تفاوت در پراکندگی نشان می‌دهد که دگرشکلی برشی به‌صورت موضعی در امتداد ساختارهای مشخص متمرکز شده است. در داخل پهنه‌های برشی، افزایش شدت دگرشکلی با توسعه فابریک‌های S-C، لنزهای برشی، سطوح (shear-band cleavages) (C') و چین‌های نامتقارن همراه است (شکل ۳-ب)، در حالی که در خارج از این پهنه‌ها، ساختارهای برشی به‌مراتب کمتر توسعه یافته و شکستگی‌ها و درزه‌های با جهت‌گیری‌های متفاوت، ساختارهای غالب را تشکیل می‌دهند. در واحدهای متاشیستی (Mtsch) نیز چین‌های نامتقارن Z شکل و

فابریک‌های S-C، پورفیروکلاست‌ها، ساختارهای میلونیتی، چین‌های میکروسکوپی، نوارهای شکنجی (Kink bands)، ریزترک‌های پر شده، جهت‌یافتگی کانی‌ها، شواهد تبلور مجدد و سایر ریزساختارهای مرتبط با تغییر شکل بررسی شدند. همچنین این شواهد برای تعیین جهت برش، شناسایی سبک و سازوکارهای دگرشکلی و بررسی نقش پهنه‌های برشی در ایجاد و کنترل مسیرهای بالقوه جریان سیالات کانه‌زا مورد استفاده قرار گرفتند.

در مرحله نهایی، داده‌های ساختاری صحرایی و شواهد ریزساختاری به‌صورت تلفیقی مورد تحلیل قرار گرفتند. این تلفیق امکان بررسی پیوستگی الگوی تغییر شکل از مقیاس رخنمون تا مقیاس میکروسکوپی را فراهم کرد و مبنای ارزیابی ارتباط میان هندسه سامانه‌های برشی، توزیع واتنش و استقرار اندیس‌های طلای تیپ کوهزاد در شمال غرب سندج-سیرجان قرار گرفت.

تحلیل هندسی و سینماتیکی

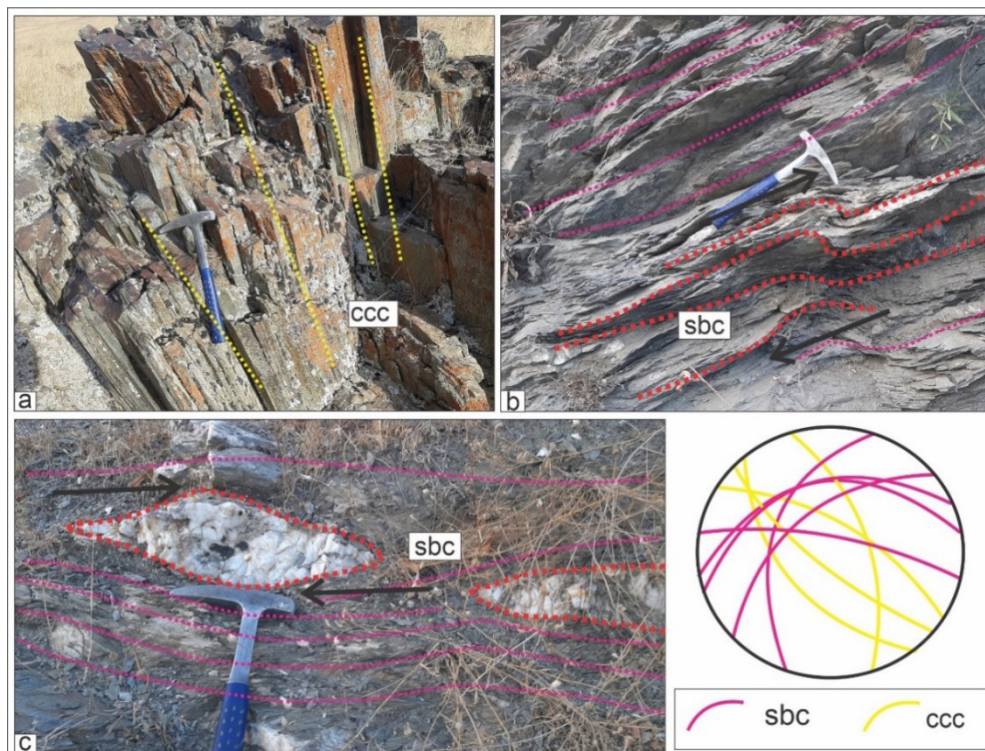
برای بررسی هندسه و سینماتیک پهنه‌های برشی، رابطه فضایی میان بر گوارگی، خطوارگی، سطوح برشی، شکستگی‌ها و رگه‌های کوارتزی تحلیل شد.

شاخص‌های سینماتیکی شامل فابریک‌های S-C، چین‌های نامتقارن، پورفیروکلاست‌های چرخیده و سایر شاخص‌های عدم تقارن برای تعیین جهت برش مورد استفاده قرار گرفتند. در مواردی که چند شاخص سینماتیکی در یک ایستگاه وجود داشت، تعیین جهت برش بر اساس مجموعه شواهد و نه یک شاخص منفرد انجام شد. همچنین، برای بررسی تغییرات هندسی در پهنه‌های برشی، رابطه ساختارهای مرتبه اول با ساختارهای مرتبه دوم و سوم، شامل شاخه‌های فرعی، شکستگی‌های متقاطع، خمیدگی‌ها و ساختارهای کششی مورد بررسی قرار گرفت.

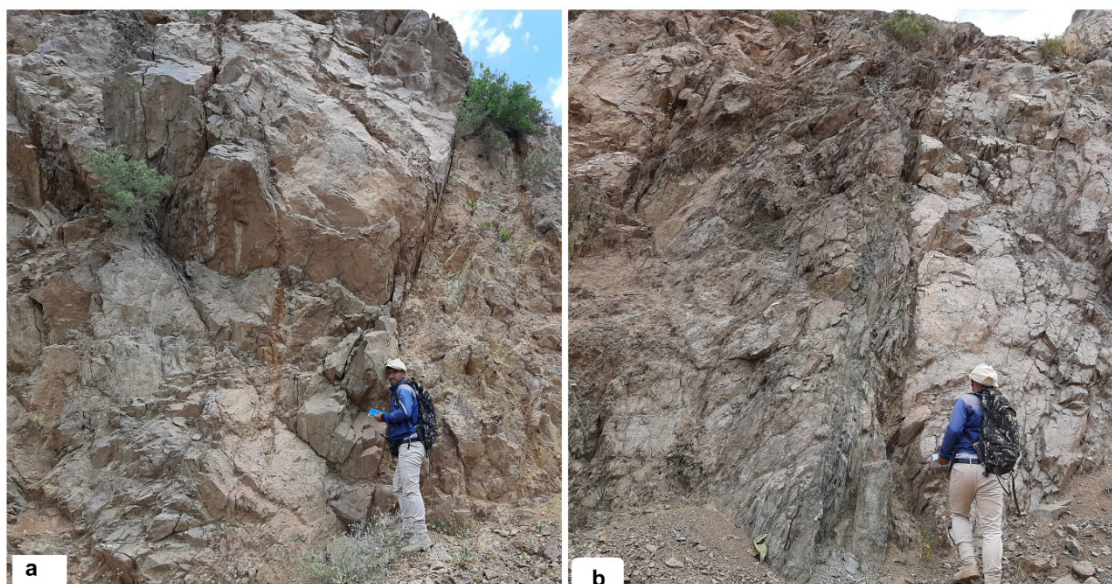
مجموعه‌ای از رویدادهای دگرشکلی موجب توسعه و گسترش بر گوارگی‌های متعدد در منطقه مورد مطالعه شده است. این بر گوارگی‌ها، در صورت همراهی با شکستگی‌ها و سطوح ناپیوستگی پیوسته و مناسب، می‌توانند با افزایش نفوذپذیری موضعی

۱ Compressional crenulation cleavage

۲ Shear band cleavage



شکل ۳- a- برگوارگی فشارشی فراگیر با راستای تقریبی شمال خاور- جنوب باختر در منطقه مورد مطالعه b- برگوارگی برشی همراه با گسترش چین های Z شکل در اثر برش راستگرد c- لنزهای کوارتز در داخل برگوارگی شیستی منطقه- استریونت مربوط به آرایش فضایی برگوارگی ها در محدوده مورد مطالعه



شکل ۴- مرز پهنه برشی در ترانشه های منطقه مورد مطالعه؛ (a) نمای کلی ترانشه و مشخص شدن محدوده پهنه برشی در میان سنگ های نسبتاً کم دگرشکل پیرامون؛ (b) نمای دیگر از پهنه برشی و افزایش شدت دگرشکلی

از دیگر ساختارهای شاخص در منطقه مورد مطالعه، رگه‌های کوارتزی چین‌خورده و بودین‌شده هستند که عمدتاً در واحدهای شیستی توسعه یافته‌اند. این رگه‌ها در برخی رخنمون‌ها به‌صورت لایه‌ای تا عدسی‌شکل در امتداد یا در مجاورت برگوارگی سنگ میزبان قرار گرفته و شواهد مشخصی از دگرشکلی پیش‌رونده را نشان می‌دهند (شکل ۵-ا). چین‌خوردگی رگه‌های کوارتزی بیانگر آن است که رگه‌ها پیش از وقوع مرحله‌ای از دگرشکلی شکل گرفته و سپس همراه با سنگ میزبان تحت تأثیر کوتاه‌شدگی و تغییر شکل قرار گرفته‌اند. بنابراین، هندسه چین‌خورده رگه‌ها را می‌توان به‌عنوان شاهی بر پیش‌بودین‌شدگی و پیش‌دگرشکلی رگه‌های کوارتزی نسبت به بخشی از رویدادهای دگرشکلی در نظر گرفت (شکل ۵-ب).

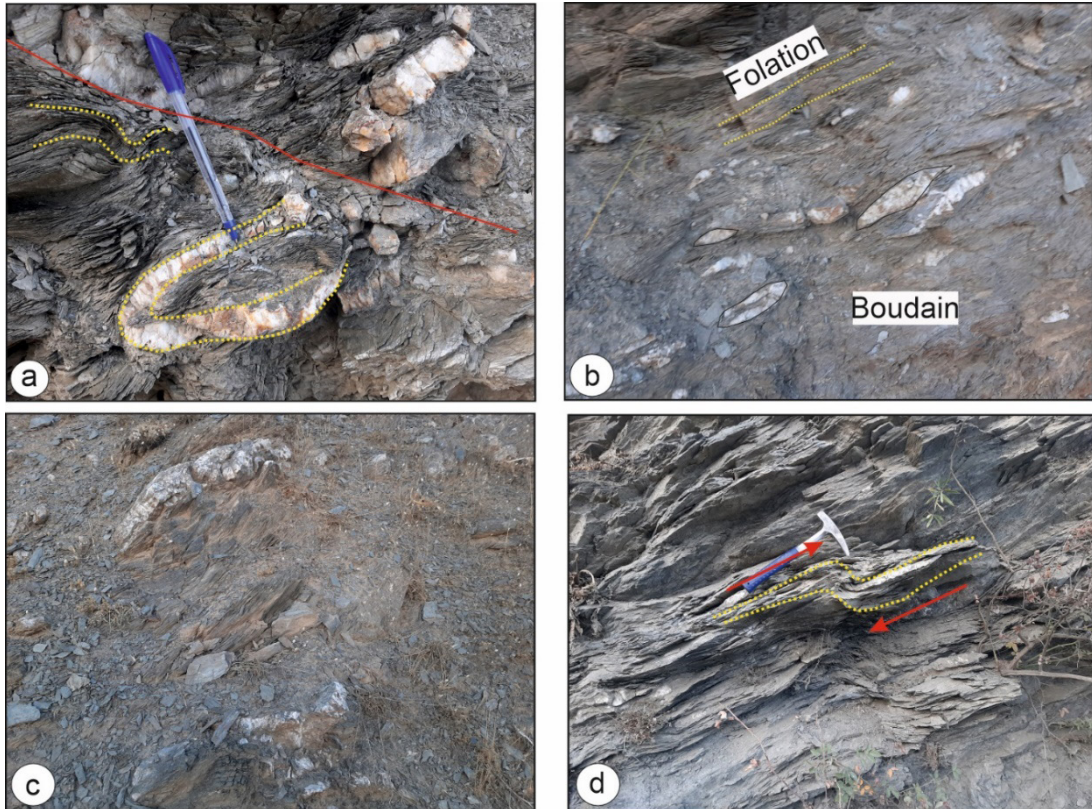
در ادامه، رگه‌های چین‌خورده در بسیاری از موارد دچار باریک‌شدگی موضعی و گسستگی شده و به قطعات کشیده و عدسی‌شکل تقسیم شده‌اند که هندسه‌ای مشابه ساختارهای بودین‌شده (boudinage) ایجاد کرده است. توسعه بودین‌ها نشان‌دهنده آن است که رگه‌های کوارتزی و سنگ شیستی میزبان در جریان دگرشکلی، رفتار مکانیکی یکسانی نداشته‌اند. در شرایطی که کوارتز نسبت به ماتریس شیستی رفتار مقاوم‌تری داشته باشد، اختلاف در قابلیت تغییر شکل میان رگه و سنگ میزبان می‌تواند موجب تمرکز واتنش در مرز رگه و توسعه نواحی باریک‌شده و گسسته‌شده در امتداد آن شود. در نتیجه، بودین‌شدن رگه‌ها را می‌توان به‌عنوان شاخصی از ناهمگونی مکانیکی و تمرکز واتنش در مرز رگه کوارتزی-سنگ‌میزبان تفسیر کرد.

هندسه بودین‌ها و نحوه تغییر شکل رگه‌ها همچنین اطلاعاتی درباره رژیم دگرشکلی منطقه فراهم می‌کند. در صورتی که کشیدگی بودین‌ها، هندسه گردن‌ها و جهت محور طولی آنها با خطوارگی کششی منطقه هم‌راستا باشد، می‌توان نتیجه گرفت که بودین‌شدن در ارتباط با همان مرحله یا مرحله‌ای از دگرشکلی شکل گرفته است که مسئول توسعه خطوارگی و کشیدگی در پهنه‌های برشی بوده است. از سوی دیگر، در صورت وجود چرخش، عدم تقارن یا هندسه متفاوت بودین‌ها، می‌توان از این ویژگی‌ها برای بررسی مؤلفه برشی و

لنزهای کوارتزی وابسته به برش مشاهده می‌شوند که همراه با سایر شاخص‌های سینماتیکی، برای تعیین حس حرکت پهنه‌های برشی مورد استفاده قرار گرفته‌اند (شکل ۳- c). مجموعه این شواهد، غالب بودن مؤلفه راستگرد (dextral) را در پهنه‌های برشی مورد مطالعه نشان می‌دهد.

در ترانشه‌های موجود در منطقه، مرز پهنه‌های برشی به‌صورت نواحی مشخصی با افزایش شدید شدت دگرشکلی قابل مشاهده است که سنگ‌های به‌شدت تغییر شکل‌یافته درون پهنه را از سنگ‌های نسبتاً کم‌دگرشکل خارج از پهنه جدا می‌کنند (شکل ۴- a). در داخل پهنه‌ها، فابریک‌های برشی، خردشدگی، کشیدگی و آرایش ترجیحی کانی‌های پلاستیک و هم‌راستایی فابریک‌ها با سطوح برشی توسعه یافته‌اند، در حالی که با افزایش فاصله از هسته پهنه، شدت این ساختارها کاهش یافته و برگوارگی ناحیه‌ای غالب مجدداً نمود بیشتری پیدا می‌کند. بنابراین، تغییر تدریجی شدت و نوع دگرشکلی در عرض پهنه‌های برشی، در کنار قطع برگوارگی ناحیه‌ای توسط برگوارگی‌های نوار برشی، بیانگر تمرکز موضعی واتنش در این ساختارها و تکامل چندمرحله‌ای دگرشکلی در منطقه است (شکل ۴- b).

از نظر ارتباط با کانی‌سازی، بخشی از اندیس‌ها و رخداد‌های طالدار منطقه در مجاورت پهنه‌های برشی و ساختارهای وابسته به آنها قرار گرفته‌اند. این هم‌مکانی فضایی، به‌تنهایی اثبات‌کننده کنترل ساختاری کانی‌سازی نیست، اما در صورت همراهی با شواهد هندسی، سینماتیکی و ریزساختاری می‌تواند بیانگر نقش این ساختارها در کانی‌سازی باشد. بر این اساس، پهنه‌های برشی اصلی را می‌توان به‌عنوان ساختارهای کنترل‌کننده در مقیاس منطقه‌ای و ساختارهای ثانویه توسعه‌یافته در داخل و حاشیه آنها، از جمله شکستگی‌ها، لنزهای برشی و فضا‌های کششی، به‌عنوان عوامل کنترل‌کننده در مقیاس رخنمون در نظر گرفت. چنین ساختارهایی می‌توانند با ایجاد یا افزایش نفوذپذیری موضعی، مسیر مناسبی برای جابه‌جایی سیالات کانه‌دار و در نهایت تمرکز رگه‌های کوارتزی و کانی‌سازی طلا فراهم کنند.



شکل ۵- a- رگه کوارتز چین‌خورده و بودین‌شده در پهنه شیستی b- رگه بودین‌شده کوارتز در داخل واحد شیستی و حالت‌های لنزی کوارتز c- لنزهای کوارتز در داخل برگوارگی d- توسعه چین‌های نامتقارن Z شکل نشانگر برش راستگرد در داخل پهنه شیستی

مشاهده‌شده در منطقه، از جمله فابریک‌های S-C و لنزهای برشی، با غالب بودن مؤلفه برشی راستگرد (dextral) سازگار است (شکل ۵-d). بنابراین، چین‌های Z شکل را می‌توان یکی از شاخص‌های سینماتیکی مؤید حرکت راستگرد در پهنه‌های برشی مورد مطالعه در نظر گرفت. تمرکز این چین‌ها در داخل پهنه‌های برشی، در مقایسه با کاهش یا عدم توسعه آنها در سنگ‌های خارج از پهنه، همچنین نشان‌دهنده تمرکز موضعی واتنش و افزایش شدت دگرشکلی در این ساختارها است.

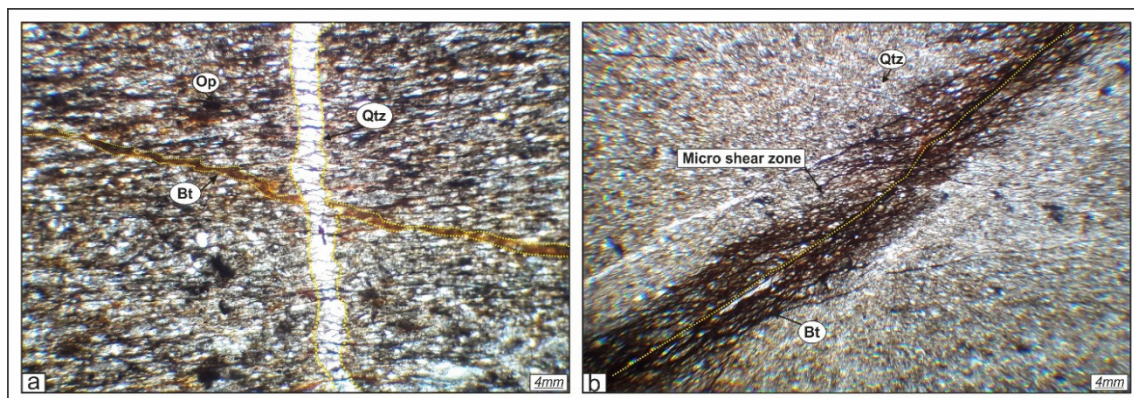
از دیدگاه کانی‌سازی، رگه‌های کوارتزی یکی از مهم‌ترین شواهد صحرایی برای ثبت مسیرهای عبور و گردش سیالات گرمابی در سیستم‌های طلای تیب کوهزاد به شمار می‌روند.

قرارگیری این رگه‌ها در امتداد شکستگی‌ها، سطوح ناپیوستگی و ساختارهای دگرشکلی نشان می‌دهد که این ساختارها می‌توانسته‌اند در ایجاد مسیرهای نفوذپذیر و تمرکز موضعی سیالات نقش داشته باشند. در صورت

تعیین ارتباط آنها با پهنه‌های برشی استفاده کرد.

از دیدگاه تکامل ساختاری، مجموعه روابط مشاهده‌شده را می‌توان به صورت یک توالی چندمرحله‌ای در طی دگرشکلی پیشرونده شامل تشکیل رگه کوارتزی، چین‌خوردگی رگه، تمرکز واتنش و در نهایت بودین‌شدن تفسیر کرد. این توالی نشان می‌دهد که رگه‌های کوارتزی صرفاً ساختارهای پرکننده شکستگی نبوده، بلکه پس از تشکیل در چرخه‌های بعدی دگرشکلی نیز مشارکت داشته‌اند. چنین روابطی می‌تواند در بازسازی تاریخچه نسبی تشکیل رگه‌ها و دگرشکلی منطقه مورد استفاده قرار گیرد (شکل ۵-c).

در داخل پهنه‌های برشی، چین‌های نامتقارن با هندسه Z شکل به‌طور فراوان مشاهده می‌شوند. این چین‌ها عمدتاً در ارتباط با تمرکز تنش برشی و در داخل یا مجاورت پهنه‌های برشی توسعه یافته‌اند و عدم تقارن آنها در مقاطع مناسب، شواهدی از جهت‌گیری ترجیحی دگرشکلی را نشان می‌دهد. هندسه Z شکل این چین‌ها، در همراهی با سایر شاخص‌های سینماتیکی



شکل ۶- a- توسعه برگوارگی در ریزمقیاس و جهت‌یافتگی کانی‌های اپک به موازات سطوح برگوارگی b- ریزپهنه برشی و تمرکز کانی‌های فلزی در این پهنه

و توسعه فابریک‌های برشی، تمرکز واتنش را در امتداد سطوح مشخص نشان می‌دهد. حضور این ساختارها در مقیاس میکروسکوپی، در کنار شواهد صحرایی مانند فابریک‌های S-C، لنزهای برشی و چین‌های نامتقارن، بیانگر تداوم دگرشکلی برشی از مقیاس رخنمون تا مقیاس میکروسکوپی است.

از دیگر ویژگی‌های قابل توجه، نحوه قرارگیری کانی‌های اپک در ارتباط با برگوارگی است. کانی‌های اپک مشاهده شده عمدتاً در امتداد سطوح برگوارگی و در فضای بین این سطوح قرار گرفته‌اند و در بسیاری از موارد، آرایش آنها با جهت‌گیری عمومی برگوارگی همخوانی دارد. این رابطه بافتی نشان می‌دهد که استقرار کانی‌های اپک دست کم تا حدی با سطوح و فضاهای ایجاد شده در امتداد برگوارگی کنترل شده است. در صورت اثبات سولفیدی بودن بخش عمده این کانی‌های اپک، این رابطه می‌تواند بیانگر نقش برگوارگی در هدایت و تمرکز سیالات کانه‌دار باشد.

مجموع شواهد ریزساختاری نشان می‌دهد که دگرشکلی در منطقه صرفاً به ایجاد برگوارگی ناحیه‌ای محدود نبوده، بلکه در پهنه‌های برشی، تنش به صورت موضعی متمرکز شده و فابریک‌های برشی در مقیاس میکروسکوپی توسعه یافته‌اند. از این منظر، رابطه فضایی میان برگوارگی، پهنه‌های برشی و کانی‌های اپک می‌تواند شواهدی از ارتباط میان ساختار و حرکت سیالات کانه‌دار فراهم کند. با این حال، برای تفکیک دقیق رابطه زمانی میان دگرشکلی و کانی‌سازی، بررسی روابط قطع‌شدگی، رشد یا جایگزینی کانی‌های

همراهی رگه‌های کوارتزی با کانی‌های سولفیدی و سایر شواهد کانه‌زایی، این روابط می‌تواند اهمیت ساختاری رگه‌ها را در کنترل کانه‌زایی طلا تقویت کنند.

به‌منظور بررسی سازوکار و هندسه دگرشکلی در مقیاس میکروسکوپی، مطالعات ریزساختاری بر روی مقاطع نازک تهیه شده در صفحه XZ انجام گرفت. انتخاب این صفحه با هدف مشاهده بیشینه تغییرشکل در راستای خطوارگی کششی و عمود بر برگوارگی صورت گرفت و امکان بررسی هندسه فابریک‌ها، تمرکز واتنش و شاخص‌های سینماتیکی مرتبط با پهنه‌های برشی را فراهم کرد.

یکی از ویژگی‌های اصلی مشاهده شده در مقاطع مورد مطالعه، توسعه برگوارگی ناپیوسته است که به صورت آرایش ترجیحی کانی‌های فلسیک و ورقه‌ای و تمرکز آنها در سطوح مشخص مشاهده می‌شود. این نوع برگوارگی، همراه با تغییر شکل و چرخش کانی‌ها، نشان‌دهنده تأثیر دگرشکلی جهت‌دار بر بافت سنگ است. در برخی مقاطع، برگوارگی ناپیوسته با ریزساختارهای مرتبط با برش همراه بوده و تغییر تدریجی جهت و شدت آن در مقیاس میکروسکوپی، تمرکز واتنش را در امتداد سطوح برشی نشان می‌دهد (شکل ۶-a).

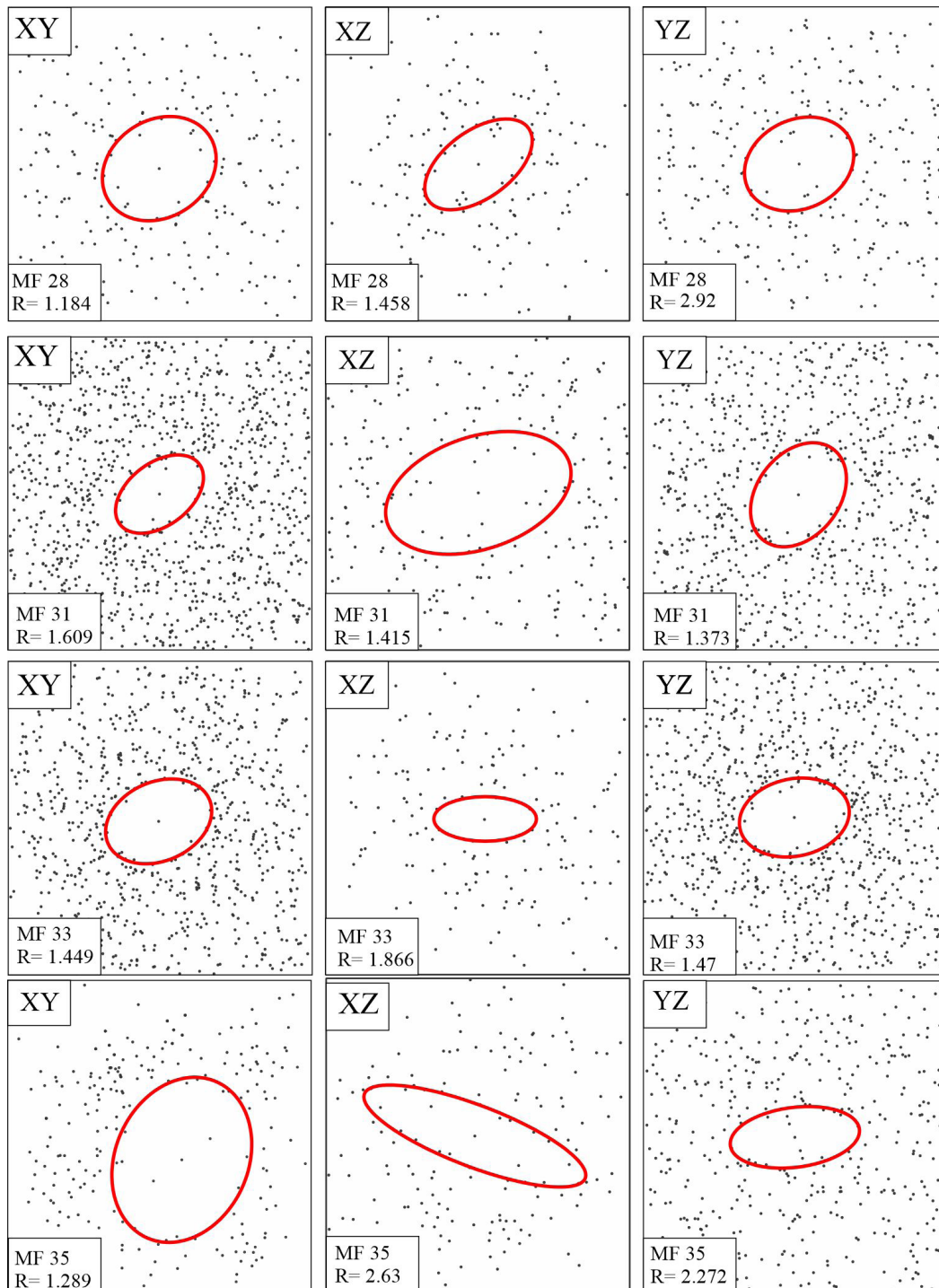
پهنه‌های برشی در مقیاس میکروسکوپی نیز به صورت نواحی باریک با شدت دگرشکلی بیشتر نسبت به سنگ میزبان قابل تشخیص هستند (شکل ۶-b). در این نواحی، آرایش ترجیحی کانی‌ها، کشیدگی و چرخش دانه‌ها

این روش بر اساس تحلیل توزیع فضایی مراکز ذرات، پورفیر و کلاست ها یا سایر عناصر بافتی در یک مقطع دوبعدی است و فرض می کند که توزیع اولیه این عناصر، پیش از دگرشکلی، تقریباً تصادفی و همگن بوده است (Fry, 1979). در اثر دگرشکلی، فاصله نسبی و آرایش فضایی مراکز این عناصر تغییر کرده و الگوی حاصل می تواند برای تعیین هندسه و شدت

اپک نسبت به فابریک های دگرشکلی و تعیین ترکیب کانی شناسی آنها ضروری است.

تحلیل واتنش به روش Fry

روش Fry یکی از روش های هندسی برای تعیین کمی تغییر شکل و بازسازی بیضی فابریک حاصل از واتنش محدود در سنگ های دگرشکل شده است.



شکل ۷- تحلیل مقدار واتنش به روش فرای برای برخی از ایستگاه های محدوده مورد مطالعه

ناهمسانگردی و واتنش کمتری را نشان می‌دهند (شکل ۷).
بیشترین مقادیر (R) در نمونه‌های MF18، MF35 و MF10 مشاهده شده است که بیانگر توسعه فابریک و واتنش قوی‌تر در این نمونه‌هاست، در حالی که نمونه‌های MF28، MF31 و MF34 مقادیر پایین‌تری را نشان می‌دهند. این تغییرات مکانی را می‌توان در چارچوب توزیع ناهمگن واتنش در منطقه تفسیر کرد؛ به‌ویژه با توجه به شواهد صحرایی و ریزساختاری که نشان می‌دهند دگرشکلی در مجاورت و داخل پهنه‌های برشی به‌صورت موضعی متمرکز شده است. بنابراین، تغییرات (R) می‌تواند در کنار شواهد هندسی و سینماتیکی، برای شناسایی بخش‌های دارای شدت بیشتر تغییرشکل و بررسی ارتباط آنها با پهنه‌های برشی مورد استفاده قرار گیرد.

کنترل‌کننده‌های ساختاری و کانی‌سازی طلا

بررسی اندیس‌های طلای پهنه برخوردی زاگرس نشان می‌دهد که کانه‌زایی در واحدهای سنگ‌شناسی متنوعی، از جمله واحدهای شیستی، کربناتی و متاگرانی، رخ داده است. بنابراین، نوع سنگ میزبان به‌تنهایی نمی‌تواند پراکندگی و سازوکار کانه‌زایی طلا را در محدوده مورد مطالعه توضیح دهد. در مقابل، توزیع فضایی اندیس‌ها و شواهد کانه‌زایی نشان‌دهنده ارتباط نزدیک آن‌ها با پهنه‌های برشی، گسل‌ها، شکستگی‌ها و رگه‌های سیلیسی است. از این رو، ساختارها را می‌توان یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده تمرکز و توزیع کانه‌زایی در منطقه دانست.

برداشت‌های ساختاری در اندیس‌های مختلف نشان می‌دهد که نقش ساختارها را می‌توان در دو سطح کلی در نظر گرفت. ساختارهای اصلی و پیوسته، شامل پهنه‌های برشی و گسل‌های بزرگ‌مقیاس، مسیرهای اصلی و بالقوه انتقال سیالات کانه‌زا را فراهم کرده‌اند؛ در حالی که ساختارهای فرعی، شامل شاخه‌های ثانویه، شکستگی‌ها، برگوارگی‌ها، نواحی کششی و محل تقاطع ساختارها، با ایجاد تغییرات موضعی در هندسه، واتنش و نفوذپذیری سنگ، شرایط مناسب‌تری را برای تمرکز و رسوب کانی‌های کانه‌زا فراهم کرده‌اند.

واتنش مورد استفاده قرار گیرد. در نمودار Fry، توزیع نقاط پیرامون یک فضای خالی مرکزی، بیضی فابریک را مشخص می‌کند که شکل و نسبت محورهای آن بازتابی از تغییرشکل اعمال‌شده بر سنگ است.

در این مطالعه، تحلیل Fry بر روی مقاطع تهیه‌شده در سه صفحه اصلی XY، YZ، XZ انجام شد. انتخاب این سه صفحه با هدف بررسی تغییرشکل در جهات مختلف و ارزیابی هندسه سه‌بعدی تغییرات و واتنش صورت گرفت. در مجموع، داده‌های مربوط به نمونه‌های سنگی برداشت‌شده از واحدهای آذرین و دگرگونی منطقه مورد بررسی قرار گرفت و نسبت تغییرات و واتنش (R) برای هر یک از سه صفحه محاسبه شد. مقادیر (R) حاصل از تحلیل Fry به‌عنوان شاخصی از نسبت تغییرات و واتنش مورد استفاده قرار گرفتند؛ به‌گونه‌ای که افزایش مقدار (R) بیانگر افزایش واتنش و در نتیجه افزایش شدت تغییرشکل در صفحه مورد نظر است.

بر اساس داده‌های حاصل، مقادیر (R-XZ) در نمونه‌های مورد مطالعه بین ۱/۴۰ تا ۲/۷ تغییر می‌کند. بیشترین مقدار (R-XZ) در نمونه MF18 با مقدار ۲/۷۰ و کمترین مقدار در نمونه MF31 با مقدار ۱/۴۰ به دست آمده است. مقادیر (R-XZ) در سایر نمونه‌ها شامل ۱/۴۵ در MF28، ۱/۷۰ در MF34، ۱/۸۳ در MF17، ۱/۸۶ در MF33، ۱/۹۰ در MF37، ۲/۱۱ در MF10، ۲/۲۹ در MF16 و ۲/۶۰ در MF35 است. این دامنه تغییرات نشان‌دهنده تفاوت قابل توجه در شدت و هندسه تغییرشکل میان نمونه‌های مختلف منطقه است (جدول ۱).

مقایسه مقادیر (R) در سه صفحه اصلی نشان می‌دهد که شدت و هندسه فابریک و واتنش در همه جهات یکسان نیست. در بیشتر نمونه‌ها، مقدار (R-XZ) و (R-YZ) نسبتاً بزرگ‌تر از (R-XY) است؛ برای مثال، در نمونه MF10 مقادیر (R-XZ)، (R-YZ) و (R-XY) به‌ترتیب ۲/۷۰، ۱/۷۷ هستند. این الگو نشان می‌دهد که تغییرشکل در صفحات حاوی خطوارگی و در راستای مرتبط با هندسه دگرشکلی منطقه، نسبت به صفحه XY برجسته‌تر بوده است. در مقابل، نمونه‌هایی مانند MF31 با مقادیر ۱/۴۰، ۱/۶۰ و ۱/۳۰ شدت و



بنابراین، اهمیت کانه‌زایی صرفاً به حضور یک پهنه برشی یا گسل محدود نمی‌شود، بلکه به موقعیت‌هایی مربوط است که در آن‌ها ساختارهای اصلی و فرعی با یکدیگر برهم‌کنش داشته و شرایط مناسبی برای عبور و تمرکز سیال ایجاد کرده‌اند.

بر این اساس، کنترل ساختاری کانه‌زایی در محدوده مورد مطالعه را می‌توان در سه مقیاس ناحیه‌ای، رخنمون/کانسار و میکروسکوپی بررسی کرد.

ساختارهای ناحیه‌ای شامل پهنه‌های برشی و گسل‌های بزرگ مقیاس هستند که در کنترل هندسه و توسعه شبکه ساختاری منطقه نقش دارند. پهنه‌های برشی عمدتاً دارای روند تقریبی شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و در برخی بخش‌ها خاوری-باختری هستند. این ساختارها در مقیاس منطقه‌ای گسترش قابل توجهی داشته و طول آن‌ها بیش از ۵۰ کیلومتر و عرض مجموعه‌های برشی در حدود چند کیلومتر برآورد می‌شود. منظور از این پهنه‌ها یک ساختار منفرد و کاملاً پیوسته نیست، بلکه مجموعه‌ای از پهنه‌های برشی موازی تا نیمه‌موازی با روندهای مشابه است که همراه با گسل‌های بزرگ مقیاس، یک شبکه ساختاری چندمرحله‌ای را ایجاد کرده‌اند.

در محدوده مورد مطالعه، سه مجموعه اصلی شامل پهنه برشی آلوت-باریکا، پهنه برشی قلقله-کسنزان و پهنه برشی بسطام را می‌توان از شمال به جنوب تفکیک کرد (شکل ۲). در دو پهنه نخست، اندیس‌ها و کانسارهای طلای شناخته‌شده با ساختارهای برشی ارتباط دارند، در حالی که پهنه برشی بسطام با وجود شواهد دگرشکلی و ساختارهای بالقوه مناسب، از نظر ارتباط مستقیم با کانه‌زایی طلا کمتر مطالعه شده است. با این حال، ناشناخته‌بودن یا کمبود اندیس‌های ثبت‌شده در یک پهنه نباید به عنوان شواهدی برای فقدان پتانسیل کانه‌زایی تفسیر شود؛ زیرا میزان رخنمون، پوشش سطحی و شدت مطالعات اکتشافی می‌تواند بر تعداد اندیس‌های شناسایی‌شده تأثیر بگذارد.

اهمیت پهنه‌های برشی در کانه‌زایی طلا بیش از آنکه صرفاً به وجود یک ساختار برشی وابسته باشد، به هندسه، میزان تمرکز واتنش و تغییرات مکانیکی

در امتداد آن‌ها مربوط است. بخش‌هایی از پهنه که دارای دگرشکلی شدید، میلونیتی‌شدن، سیلیسی‌شدن، شکستگی‌زایی یا گذار از رفتار شکل‌پذیر به شکننده هستند، می‌توانند شرایط مناسب‌تری برای ایجاد مسیرهای جریان سیال داشته باشند. بنابراین، پهنه برشی را نباید به‌طور مستقیم معادل پهنه کانه‌زا در نظر گرفت؛ بلکه باید بخش‌های دارای شواهد هم‌زمان ساختاری، دگرسانی و کانه‌زایی را به عنوان اهداف مناسب‌تر در نظر گرفت.

در مقیاس رخنمون تا کانسار، شاخه‌های فرعی پهنه‌های برشی، گسل‌ها و شکستگی‌های ثانویه، ساختارهای متقاطع، تغییرات موضعی در روند و شیب ساختارهای اصلی، برگراگی‌ها و نواحی کششی اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. این ساختارها می‌توانند در اثر تغییر هندسه و توزیع واتنش، نفوذپذیری سنگ را به‌صورت موضعی افزایش داده و موجب انحراف، تمرکز یا کاهش جریان سیالات شوند.

در محدوده مورد مطالعه، شواهدی از قطع‌شدن ساختارهای شکل‌پذیر توسط گسل‌ها و شکستگی‌های متأخر، توسعه رگه‌های سیلیسی در امتداد یا در عرض برگراگی و تشکیل ساختارهای لنزی، بودین، چین‌های Z شکل و ریزگسل‌ها مشاهده شده است. این روابط نشان می‌دهد که پهنه‌های برشی در طول تکامل خود به‌صورت یک ساختار ایستا عمل نکرده‌اند، بلکه با تغییر شرایط دگرشکلی، ساختارهای جدیدی درون یا پیرامون آن‌ها ایجاد شده است.

محل تقاطع ساختارهای مختلف، تغییرات ناگهانی در روند یا شیب پهنه‌های برشی و بخش‌هایی که در آن‌ها دگرشکلی شکل‌پذیر با شکستگی‌های شکننده همراه شده است، از مهم‌ترین موقعیت‌های بالقوه برای تمرکز سیال محسوب می‌شوند. در چنین مناطقی، افزایش ناهمگنی مکانیکی و ایجاد فضاهای کششی می‌تواند نفوذپذیری موضعی را افزایش دهد. با این حال، وجود یک شکستگی، گسل یا محل تقاطع به‌تنهایی نمی‌تواند به عنوان شاخص قطعی کانه‌زایی در نظر گرفته شود و ارزش اکتشافی آن زمانی افزایش می‌یابد که با شواهدی مانند رگه‌های کوارتز،

نفوذپذیری و در نتیجه تمرکز موضعی سیالات کانه‌زا فراهم کرده باشد.

یکی از مهم‌ترین شواهد برای ارزیابی کنترل ساختاری کانه‌زایی، ارتباط فضایی و زمانی میان ساختارهای دگرشکلی، رگه‌های کوارتز یا سیلیسی، دگرسانی و کانی‌های سولفیدی است. در محدوده مورد مطالعه، رگه‌های سیلیسی به‌صورت موازی، مورب و متقاطع با برگوارگی مشاهده شده و در برخی موارد تحت تأثیر چین‌خوردگی و بودن شدن قرار گرفته‌اند یا توسط شکستگی‌های جوان‌تر قطع شده‌اند. این روابط هندسی نشان می‌دهد که تشکیل برخی رگه‌ها پیش از مراحل بعدی دگرشکلی رخ داده است، در حالی که قطع شدن آن‌ها توسط شکستگی‌های متأخر، بیانگر ادامه فعالیت ساختاری پس از تشکیل رگه‌هاست. همراهی رگه‌های سیلیسی با دگرسانی و سولفیدشدگی، اهمیت ساختارها را از یک کنترل هندسی صرف فراتر می‌برد و نشان می‌دهد که ساختارها احتمالاً در هدایت و تمرکز سیالات هیدروترمال نیز نقش داشته‌اند.

سیلیسی‌شدن، دگرسانی و سولفیدشدگی همراه باشد (حوری و تدین، ۱۴۰۱).

تمرکز واتنش می‌تواند از طریق تغییر بافت سنگ و ایجاد یا بازفعال‌سازی ناپوستگی‌ها، بر نفوذپذیری و مسیر حرکت سیالات اثر بگذارد. در مراحل شکل‌پذیر، افزایش واتنش موجب توسعه برگوارگی، ریزش‌دگی دانه‌ها، کشیدگی کانی‌ها و ایجاد فابریک‌های برشی می‌شود و با تغییر شرایط مکانیکی به سمت رفتار شکننده، امکان ایجاد ریزش‌کستگی‌ها و گسل‌های جدید افزایش می‌یابد. از این منظر، گذار شکل‌پذیر-شکننده می‌تواند مرحله مهمی در ایجاد شبکه‌های نفوذپذیر برای سیالات باشد.

اهمیت تمرکز واتنش زمانی افزایش می‌یابد که با شکستگی‌های مناسب، رگه‌زایی، دگرسانی و سولفیدشدگی همراه باشد. بنابراین، در محدوده مورد مطالعه، ترکیب دگرشکلی شکل‌پذیر پرواتنش با شکستگی‌زایی و بازفعال‌شدن ساختارها در شرایط شکننده، می‌تواند سازوکار مناسبی برای ایجاد و تغییر

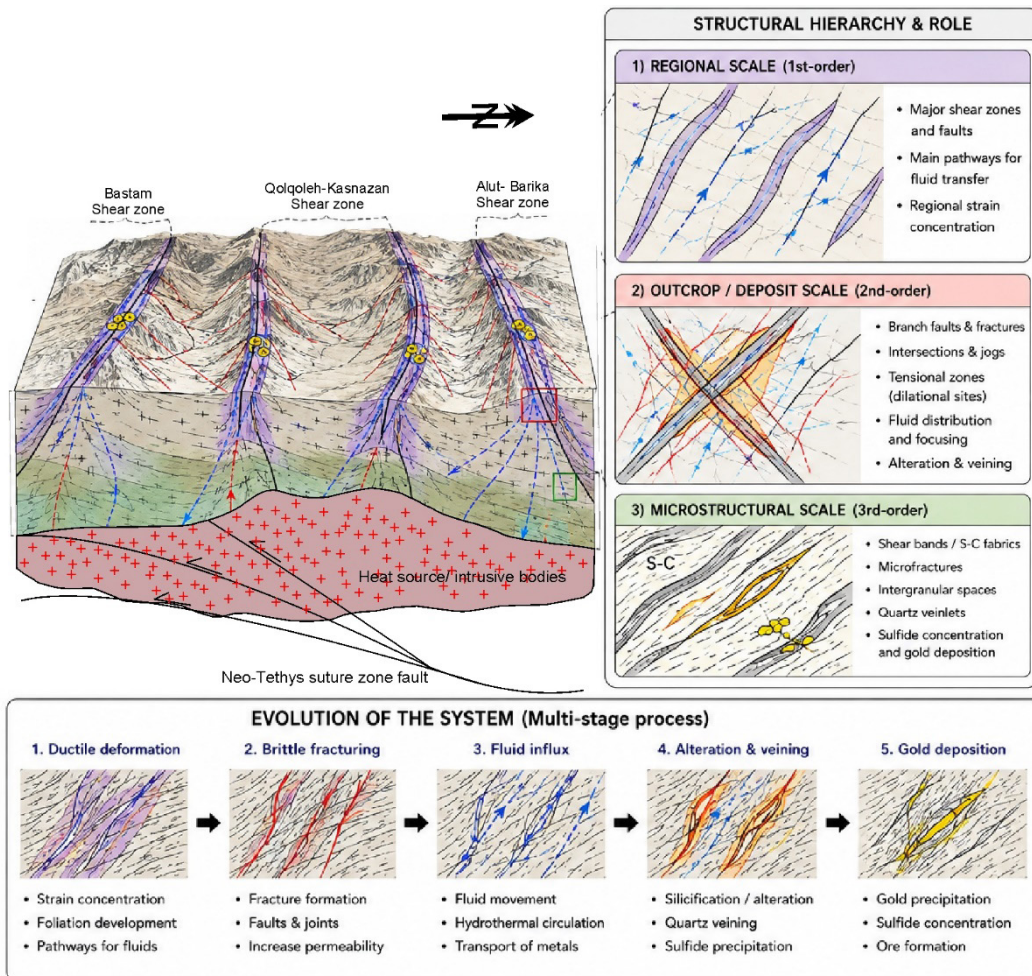
جدول ۱- داده‌های مربوط به اندازه‌گیری واتنش به روش فرای در منطقه مورد مطالعه

(Sample(xz	Latitude	Longitude	Lithology	(R (XZ	(R (YZ	(R (XY
MF 10	35° 51' 17.00"	46° 23' 49.44"	Andesite	2.11	2.7	1.77
MF 16	35° 52' 56.63"	45.04° 22' 46"	Regional metamorphic rocks	2.29	2.16	1.2
MF 17	07.07° 53' 35°	46° 22' 44.43"	Regional metamorphic rocks	1.83	1.67	1.3
MF 18	35° 53' 43.06"	46° 22' 06.27"	Regional metamorphic rocks	2.7	2.2	1.7
MF 28	36° 05' 38.26"	46° 10' 30.39"	Regional metamorphic rocks	1.45	1.2	1.18
MF 31	36° 04' 53.25"	46° 07' 21.74"	undifferentiated rocks	1.4	1.6	1.3
MF 33	36° 06' 26.88"	46° 02' 01.42"	Regional metamorphic rocks	1.86	1.44	1.47
MF 34	36° 05' 29.58"	46° 01' 24.55"	Regional metamorphic rocks	1.7	1.3	1.06
MF 35	36° 04' 33.44"	46° 02' 33.62"	Regional metamorphic rocks	2.6	2.2	1.2
MF 37	36° 03' 19.53"	46° 08' 29.79"	Regional metamorphic rocks	1.9	1.4	1.1

و در برخی موقعیت‌ها متمرکز کرده‌اند؛ و ساختارهای کوچک‌مقیاس و ریزساختارهای برشی، در صورت ایجاد فضای باز و دسترسی سیال، در تمرکز موضعی رگه‌ها و کانی‌های کانه‌زا نقش داشته‌اند. بنابراین، مناسب‌ترین اهداف کانه‌زایی، نه صرفاً خود پهنه‌های برشی، بلکه بخش‌هایی از آن‌ها هستند که هم‌زمان شواهدی از تمرکز واتنش، شکستگی‌زایی، رگه‌های کوارتز، دگرسانی و سولفیدشدگی نشان می‌دهند.

مدل ساختاری پیشنهادی

در مجموع، مدل ساختاری پیشنهادی برای محدوده مورد مطالعه یک سامانه سلسله‌مراتبی و چندمقیاسی است. در این مدل، پهنه‌های برشی و گسل‌های بزرگ‌مقیاس در مقیاس ناحیه‌ای، مسیرهای اصلی و بالقوه انتقال سیالات را فراهم کرده‌اند؛ ساختارهای مرتبه دوم در مقیاس رخنمون و کانسار، با تغییر هندسه و نفوذپذیری، جریان سیال را توزیع



شکل ۸- مدل ساختاری پیشنهادی به همراه کنترل کننده های ساختاری برای شکل گیری طلای تپ کوهزاد در منطقه مورد مطالعه

نتیجه گیری

بزرگ مقیاس می توانسته اند مسیرهای اصلی انتقال سیالات را فراهم کنند، در حالی که شاخه های فرعی، شکستگی های متقاطع، نواحی کششی، تغییرات هندسی و گذار شکل پذیر-شکننده، شرایط مناسب تری برای تمرکز موضعی سیالات و نهشت کانی های کانه زا ایجاد کرده اند. بنابراین، پهنه برشی را نمی توان به طور مستقیم معادل پهنه کانه زا در نظر گرفت؛ بلکه بخش هایی از آن که هم زمان با تمرکز و تنش، شکستگی زایی، رگه های کوارتزی، دگرسانی و سولفیدشدگی همراه هستند، از اهمیت بیشتری برخوردارند. بر این اساس، مدل ساختاری پیشنهادی، کانی سازی طلای تپ کوهزاد در منطقه را حاصل برهم کنش ساختارهای اصلی و فرعی و تغییرات موضعی نفوذپذیری می داند و می تواند مبنایی برای شناسایی و اولویت بندی اهداف اکتشافی در بخش های مشابه زون سنندج-سیرجان باشد.

نتایج مطالعات صحرایی، تحلیل های هندسی و سینماتیکی، مطالعات ریزساختاری و تحلیل Fry نشان می دهد که دگرشکلی در محدوده مورد مطالعه به صورت ناهمگن و عمدتاً در امتداد پهنه های برشی متمرکز شده است. فابریک های S-C، چین های نامتقارن Z شکل، لزه های برشی، رگه های کوارتزی چین خورده و بودین شده و ریزساختارهای برشی، همراه با شاخص های سینماتیکی، مؤلفه غالب راستگرد را در پهنه های برشی نشان می دهند. تحلیل Fry نیز با مقادیر نسبت محوری ۱,۴۰ تا ۲,۷۰ در صفحه XZ، تغییرات مکانی و ناهمسانگردی و تنش را تأیید می کند. تلفیق این شواهد با پراکندگی اندیس های طلا بیانگر یک کنترل ساختاری سلسله مراتبی و چندمقیاسی است؛ به گونه ای که پهنه های برشی و گسل های

Almasi, A., Yousefi, M., and Carranza, E. J. M., 2017. Prospectivity analysis of orogenic gold deposits in Saqez-Sardasht Goldfield, Zagros Orogen, Iran. *Ore Geology Reviews* 91, 1066-1080.

Behyari, M., Azizi, M. R., and Abedini, A., 2020. The role of the structures on the fluorite mineralization: insight to fluid inclusion and alteration map of the Laal-Kan fluorite deposit, NW Iran. *Acta Geodynamica et Geomaterialia*.

Behyari, M., and Shahbazi, M., 2019. Strain and vorticity analysis in the Zagros suture zone (W Iran): Implications for Neo-Tethys post-collision events. *Journal of Structural Geology* 126, 198-209.

Behyari, M., Fathollahzadeh, F., 2023. Deformation style change in the transition zone from mantle to crust: NW Khoy ophiolite. *Advanced Applied Geology* 13, 144-160. doi: 10.22055/aag.2022.40767.2296

Berberian, M., and King, G. C. P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian journal of earth sciences* 5, 101-117.

François, T., Agard, P., Bernet, B., Meyer, B., Chung, S.-L., Zarrinkoub, M. H., Burov, E., and Monié, P., 2014. Cenozoic exhumation of the internal Zagros: first constraints from low-temperature thermochronology and implications for the build-up of the Iranian plateau. *Lithos* 206-207, 100-112.

Fry, N., 1979. Random point distributions and strain measurement in rocks. *Tectonophysics* 60, 89-105.

Goldfarb, R. J., and Groves, D. I., 2015. Orogenic gold: Common or evolving fluid and metal sources through time. *Lithos* 233, 2-26.

Goldfarb, R. J., and Pitcairn, I., 2023. Orogenic gold: is a genetic association with magmatism realistic? *Mineralium Deposita* 58, 5-35.

Gholipour, S., Azizi, H., Masoudi, F., Asahara, Y., and Tsuboi, M., 2021. Zircon U-Pb ages, geochemistry, and Sr-Nd isotope ratios for early cretaceous magmatic rocks, southern Saqez, northwestern Iran. *Geochemistry* 81, 125687.

Groves, D., Santosh, M., Goldfarb, R., and Zhang, L., 2018. Structural geometry of orogenic gold deposits: implications for exploration of world-class and giant deposits. *Geosci Front* 9, 1163-1177.

Heidari, S., Moosavi Makooi, S., Mirzakhani, M.,

قدردانی:

نویسندگان از معاونت پژوهش و فناوری دانشگاه ارومیه به دلیل حمایت مالی و سازمانی از این پژوهش قدردانی می‌کنند. همچنین، از سردبیر و داوران ناشناس مجله به خاطر نظرات سازنده و پیشنهادهای ارزشمندشان که به بهبود کیفیت مقاله کمک کرد، سپاسگزاری می‌کنند.

منابع

پسران شریف حوری، تدین میثم، ۱۴۰۱. بررسی کنترل کننده‌های ساختاری در کانی زایی باریت رگه ای محدوده شرق مورچه خورت، شمال اصفهان. زمین ساخت ۶، ۴۶-۷۰.

Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., Monié, P., Meyer, B., and Wortel, R., 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148, 692-725.

Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros fold-thrust belt of Iran and its proforeland evolution. *American journal of science* 304, 1-20.

Aliyari, F., Raštad, E., Goldfarb, R. J., and Sharif, J. A., 2014. Geochemistry of hydrothermal alteration at the Qolqoleh gold deposit, northern Sanandaj-Sirjan metamorphic belt, northwestern Iran: Vectors to high-grade ore bodies. *Journal of geochemical exploration* 140, 111-125.

Aliyari, F., Raštad, E., and Mohajjel, M., 2012. Gold deposits in the sanandaj-sirjan zone: orogenic gold deposits or intrusion-related gold systems? *Resource Geology* 62, 296-315.

Aliyari, F., Raštad, E., and Zengqian, H., 2007. Orogenic gold mineralization in the Qolqoleh deposit, northwestern Iran. *Resource Geology* 57, 269-282.

Almasi, A., Jafarirad, A., Afzal, P., and Rahimi, M., 2015. Prospecting of gold mineralization in Saqez area (NW Iran) using geochemical, geophysical and geological studies based on multifractal modelling and principal component analysis. *Arabian Journal of Geosciences* 8, 5935-5947.

Australia: The role of regional stress change and the tectonic regime. *Ore Geology Reviews* 120, 103390.

Rasoli, F., Ghaderi, M., and Abadi, A., 2016. A review of tectonomagmatic evolution and gold metallogeny in the inner parts of Zagros orogeny: A tectonic model for the major gold deposits, western Iran. *Eurasian Mining* 25, 3-20.

Heidari, S., Raštad, E., Mohajjel, M., and Shamsa, M., 2006. Gold mineralization in ductile shear zone of Kervian (southwest of Saez-Kordestan province). *Geosciences* 58, 18-37.

Heydari, M., and Behyari, M., 2024. Kink-band Kinematic Analysis and its Implications for Late-stage Deformation in the Internal Parts of the Zagros Collision (Sanandaj-Sirjan Zone) in West Iran. *Acta Geologica Sinica-English Edition* 98, 921-935.

Hassanzadeh, J., and Wernicke, B. P., 2016. The Neotethyan Sanandaj-Sirjan zone of Iran as an archetype for passive margin-arc transitions. *Tectonics* 35.

Kouhestani, H., Rashidnejad-Omran, N., Raštad, E., Mohajjel, M., Goldfarb, R. J., and Ghaderi, M., 2014. Orogenic gold mineralization at the Chah Bagh deposit, Muteh gold district, Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 91, 89-106.

Mohajjel, M., and Fergusson, C. L., 2000. Dextral transpression in Late Cretaceous continental collision, Sanandaj-Sirjan zone, western Iran. *Journal of structural geology* 22, 1125-1139.

Mohajjel, M., Fergusson, C. L., and Sahandi, M. R., 2003. Cretaceous-Tertiary convergence and continental collision, Sanandaj-Sirjan Zone, western Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 21, 397-412.

Nassif, M. T., Kuiper, Y. D., Goldfarb, R. J., Monecke, T., and Holm-Denoma, C. S., 2018. Structural evolution of a gold-bearing transtensional zone within the Archean Porcupine-DeSoto deformation zone, southern Abitibi greenstone belt, eastern Ontario, Canada. *Journal of Structural Geology* 117, 203-218.

Shafaii Moghadam, H., et al., 2018. Two plutonic complexes of the Sanandaj-Sirjan magmatic-metamorphic belt record Jurassic to Early Cretaceous subduction of an old Neotethys beneath the Iran microplate. *Gondwana Research* 62, 246-268.

Wilson, C. J., Moore, D. H., Vollgger, S. A., and Madeley, H. E., 2020. Structural evolution of the orogenic gold deposits in central Victoria,