



مقاله پژوهشی

نقش پهنه‌های برشی راستالغز و شکستگی‌های مرتبط با چین‌خوردگی در تکوین کانسار طلای زرشوران، همتافت تخت‌سلیمان، شمال تکاب

رضا علی‌پور*، ابراهیم طالع‌فاضل و مهدی فرهانی‌مقدم

گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم پایه، دانشگاه بوعلی سینا، همدان، ایران

دریافت مقاله: ۱۳۹۷/۰۷/۱۰، پذیرش: ۱۳۹۷/۱۲/۱۹

چکیده

کانسار طلای زرشوران در همتافت تکاب در شمال‌باختر ایران و در یال باختری طاق‌دیس ایمان‌خان با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری واقع شده است. واحدهای شیل سیاه زرشوران و آهک چالداغ با سن پرکامبرین مهم‌ترین میزبان‌های کانی‌سازی در منطقه هستند که دگرسانی‌های سیلیسی (ژاسپروئیدی)، کربنات‌زدایی، دولومیتی و آرژیلیک، کانه‌زایی را همراهی می‌کنند. استخراج خطواره‌ها و تحلیل‌های فرکتالی شکستگی‌ها و خطواره‌ها نشان می‌دهد که غلظت طلا در مناطق با تراکم بالای شکستگی، مقادیر متغیری (کمینه ۵ تا بیشینه ۱۰ میلی گرم در تن) دارد. بیشترین فراوانی روند خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد بررسی به ترتیب N20E تا N75E درجه و بیشترین فراوانی روند گسل‌ها N30E تا N85E درجه است. گسل تکاب با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری مهم‌ترین ساختار در منطقه است که عملکرد راستالغز جوان آن باعث ایجاد ساختارهای کششی و فشارشی شده است. طاق‌دیس ایمان‌خان یکی از این ساختارهاست که شکستگی‌های آن محلی مناسب برای اختلاط سیالات جوی و گرمابی حاوی فلز و ته‌نشینی طلا را فراهم کرده است. کانی‌سازی در این طاق‌دیس بیشتر در محل تقاطع شکستگی‌ها و در راستای شکستگی‌های طولی با روند شمال‌باختر-جنوب‌خاور و ناشی از تحذب کمان خارجی طاق‌دیس صورت گرفته است.

واژه‌های کلیدی: کانسار، طاق‌دیس، فرکتال، طلا، گسل تکاب، زرشوران

مقدمه

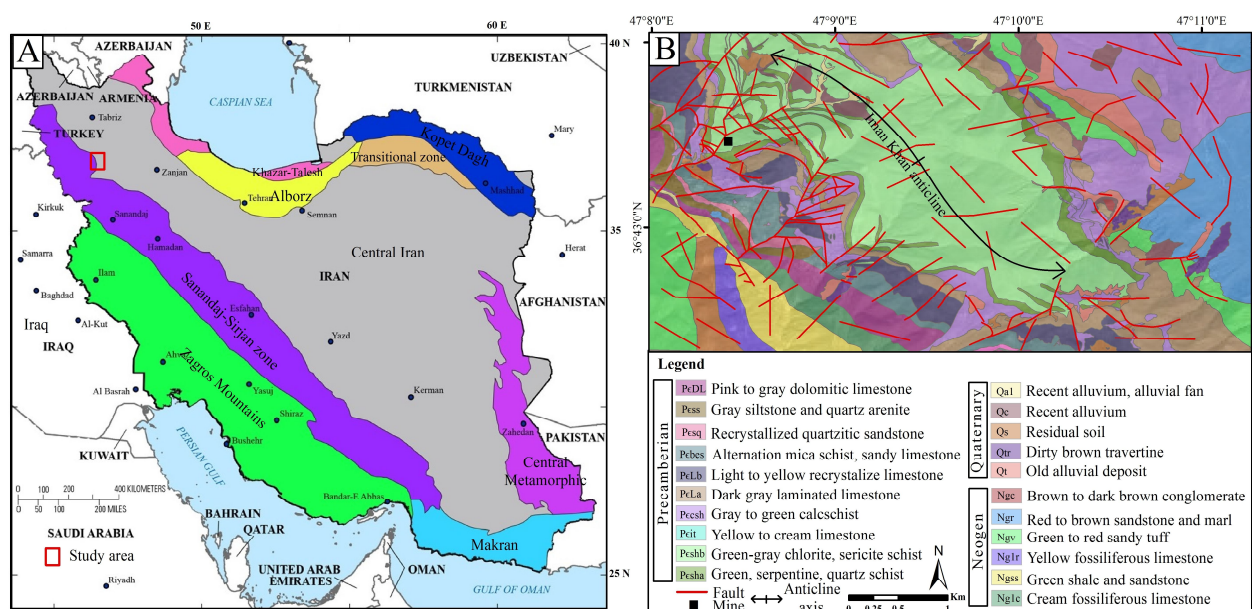
تشکیل شده است. واحد شیست ایمان‌خان به‌عنوان قدیمی‌ترین برون‌زد سنگی در هسته این طاق‌دیس شکل گرفته است (شکل B-۱). از نظر سنگ‌شناختی این منطقه اغلب از واحدهای پرکامبرین شکل گرفته است (Samimi, 1992) که بر روی شیست‌های واحد ایمان‌خان، به‌ترتیب واحدهای سنگی آهک چالداغ، شیل‌های سیاه زرشوران و ماسه‌سنگ و شیل‌های قره-

کانسار طلای زرشوران در فاصله ۵۰ کیلومتری شمال‌خاوری شهرستان تکاب (شمال‌باختر ایران) و در همتافت^۱ تخت‌سلیمان با ویژگی‌های ساختاری و سنگ‌شناختی درهم و پیچیده‌ای واقع شده است (شکل A-۱). این کانسار در یال باختری طاق‌دیس ایمان‌خان با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری

*مسئول مکاتبات: rezaalipoor116@gmail.com

(1999)، گسل های منطقه زرشوران اغلب با روند شمال باختری- جنوب خاوری و شمال خاوری- جنوب باختری و شیب زیاد، نقشی مهم در شکل گیری کانسار داشته اند. بر این مبنا، با توجه به اهمیت گسل ها و شکستگی ها در کانی زایی طلا، در این زمینه بررسی های متعددی توسط پژوهشگران در مناطق مختلفی با ویژگی های زمین شناسی خاص خود انجام شده است (Sibson, 1996; Oliver et al., 1999; Cox, 1999; Robert and Poulsen, 2001; Madrid and Garwin, 2002; McLellan, 2004; Pirajno, 2009; Nouri et al., 2013; Muto et al., 2015; Adib et al., 2017).

داش قرار گرفته است (Asadi et al., 2000). کانه زایی طلا در منطقه زرشوران اغلب در افق های سیلیسی- ژاسپروئیدی واحد شیل زرشوران و کربناتی واحد چالداغ در امتداد گسل های با زاویه شیب زیاد تشکیل شده است (Bazdar et al., 2015). جای گیری و آزاد شدن سیال از نفوذی های عمیق آذرین، رخداد گسلش و شکستگی در ساختمان پی سنگ و واحدهای جوان تر و همچنین تغییر شرایط فیزیکوشیمی محیط کانی سازی و به ویژه دگرسانی از مهم ترین عوامل شکل گیری طلا در کانسارهای طلای ساختاری- گرمایی است (Cline et al., 2005). طبق شواهد صحرایی و پژوهش های پیشین (Mehrabi et al.,



شکل ۱. A: نقشه پهنه بندی ساختاری فلات ایران با تغییرات از اوریس و همکاران (Orris et al., 2015) که چهارگوش قرمز رنگ موقعیت منطقه مورد بررسی را نشان می دهد و B: واحدهای سنگی طاق دیس ایمان خان بر اساس نقشه زمین شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ تخت سلیمان با تغییرات از باباخانب و قلمقاش (Babakhani and Ghalamghash, 1998)

Fig. 1. A: Structural zoning map of the Iranian plateau (after Orris et al., 2015) along with a red rectangle showing the study area, and B: Rock units of the Iman Khan anticline based on the Takht-e-Soleyman map with 1:100000 scale (after Babakhani and Ghalamghash, 1998)

شکستگی بالا و ساختارهای چین خورده، در کنترل کانی سازی نقشی مهم دارند (Tripp and Vearncombe, 2004). بنابراین، جهت گیری، پیوستگی، چگالی و الگوی تداخلی شکستگی ها و خطواره های ساختاری نقشی مهم در بررسی های

به طور کلی، پهنه های برشی بزرگ مقیاس، ساختارهای فرعی ناشی از حرکات پهنه های برشی، پهنه های گسلی متقاطع بزرگ با جهت یابی مشابه یا متفاوت، مناطق با استرین برشی بالا نظیر راندگی های موازی لایه بندی، توده های صلب با تراکم

زرسوران از تحلیل‌های بعد فرکتالی به روش مربع‌شمار استفاده شده است. سپس نحوه تشکیل ساختارهای کششی و فشارشی مثل طاق‌دیس ایمان‌خان در پهنه‌های برشی راستالغز و همچنین نقش شکستگی‌های مرتبط با چین‌خوردگی در کانی‌سازی مورد بررسی قرار گرفته است.

جایگاه ساختاری

همتافت تخت‌سلیمان بخشی از منطقه تکاب-زنجان است که منطقه معدنی زرسوران در آن واقع شده است. این منطقه از نظر تقسیمات ساختاری در پهنه ایران مرکزی قرار گرفته است (Berberian and King, 1981) و داده‌های سن‌سنجی ایزوتوپی U/Pb بر روی زیرکن‌های موجود در سنگ بستر میگماتیته تخت‌سلیمان نشان می‌دهد که این همتافت با دگرگونی‌های خرده‌قاره ایران مرکزی قابل‌مقایسه است (Hajialioghli and Moazzen, 2013). البته در مورد جایگاه ساختاری این منطقه، اختلاف‌نظرهایی وجود دارد. با وجود تشابهات زمین‌شناسی بسیار در پی‌سنگ قاره‌ای تخت‌سلیمان و خرده‌قاره ایران مرکزی، برخی از پژوهشگران نظیر علوی (Alavi, 2004)، همتافت تخت‌سلیمان را با توجه به موقعیت مکانی آن، بخشی از پهنه سهندج-سیرجان در نظر گرفته‌اند. همچنین تفاوت‌های ساختاری قابل‌ملاحظه‌ای که این همتافت با خرده‌قاره ایران مرکزی دارد، باعث شده است که این منطقه را بخشی از پهنه سهندج-سیرجان در نظر بگیرند. این تفاوت‌های ساختاری شامل روند ساختارهای زمین‌ساختی نظیر روند گسل‌های اصلی، برگ‌وارگی و نظایر آن است که به موازات گسل راندگی زاگرس با امتداد شمال‌باختر-جنوب‌خاور است؛ در حالی که در خرده‌قاره ایران مرکزی این ساختارها اغلب به صورت پهنه‌های طویل شده در راستای شمالی-جنوبی جهت‌یابی شده است (Alavi, 2004). اما بررسی‌های سنگ‌شناختی، چینه‌شناسی، فسیل‌شناسی و داده‌های سنی جدید در منطقه تخت‌سلیمان نشان می‌دهد که ویژگی‌های زمین‌شناسی همتافت تخت‌سلیمان بسیار مشابه با خرده‌قاره ایران مرکزی بوده و بر این اساس به نظر می‌رسد رویدادهای ژئودینامیکی و تحولات زمین‌ساختی همتافت تخت‌سلیمان در شمال‌باختر ایران

زمین‌ساختی یک منطقه دارد. خطواره‌های ساختاری پدیده‌هایی با الگوهای ساده و پیچیده هستند که در سطح زمین هندسه خطی یا خمیده از خود نشان می‌دهند. منشأ خطواره‌های ساختاری، استرین حاصل از تجمع تنش در اطراف شکاف‌ها و شکستگی‌ها است که نشان‌دهنده گسل‌ها، شکستگی‌ها، دسته درزه و دایک‌ها در یک منطقه است (Koike et al., 1998). با توجه به اهمیت خطواره‌ها در بررسی‌های زمین‌شناسی، روش‌های متعددی برای استخراج و بررسی آنها وجود دارد که یکی از روش‌های کاربردی استخراج خطواره‌ها، استفاده از روش‌های سنجش از دور است. این روش‌های دورسنجی شامل تفسیر عکس‌های هوایی، تصاویر ماهواره‌ای و الگوهای ارتفاع رقومی DEM است که پایه‌ای برای تفسیرهای زمین‌ساختی است (Rowen and Bowars, 1995; Philip, 1996; Solomon and Ghebreab, 2006; Masoud and Koike, 2006; Hashim et al., 2013). این تفسیرهای زمین‌ساختی می‌تواند به شناسایی کانسارها کمک کند (Kashkoei Jahroomi and Qishlaqi, 2016; Hosseini Zadeh and Honarmand, 2018). علاوه بر روش‌های سنجش از دور و بررسی ارتباط بین خطواره‌ها و گسل‌ها با کانی‌سازی، پژوهش‌های متعددی ارتباط بین ساختارهای زمین‌ساختی و کانی‌سازی را با استفاده از روش‌های عددی مورد بررسی قرار داده‌اند که از جمله این پژوهش‌ها استفاده از ابعاد فرکتالی هندسی است (Raines, 2008; Carranza et al., 2008; Zuo et al., 2009; Carranza, 2009; Wang et al., 2012; Afzal et al., 2012; Nouri et al., 2013; Afzal et al., 2013; Rahmati et al., 2014; Zhao et al., 2015; Mirzaie et al., 2015). کاربرد مدل‌های فرکتال در بیان کیفیت و توصیف ویژگی‌های زمین‌شناسی و در تحلیل توزیع و روابط کانی‌ها، انواع محیط‌های رسوبی، الگوهای گسل‌ها و آبراهه‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرد (Carlson, 1991; Cheng and Agtererg, 1995; Cheng et al., 1996; Wei and Pengda, 2002; Raines, 2008; Carranza et al., 2008; Carranza, 2009). در این پژوهش برای ارتباط بین شکستگی‌ها و خطواره‌های ساختاری با کانی‌سازی طلا در منطقه معدنی

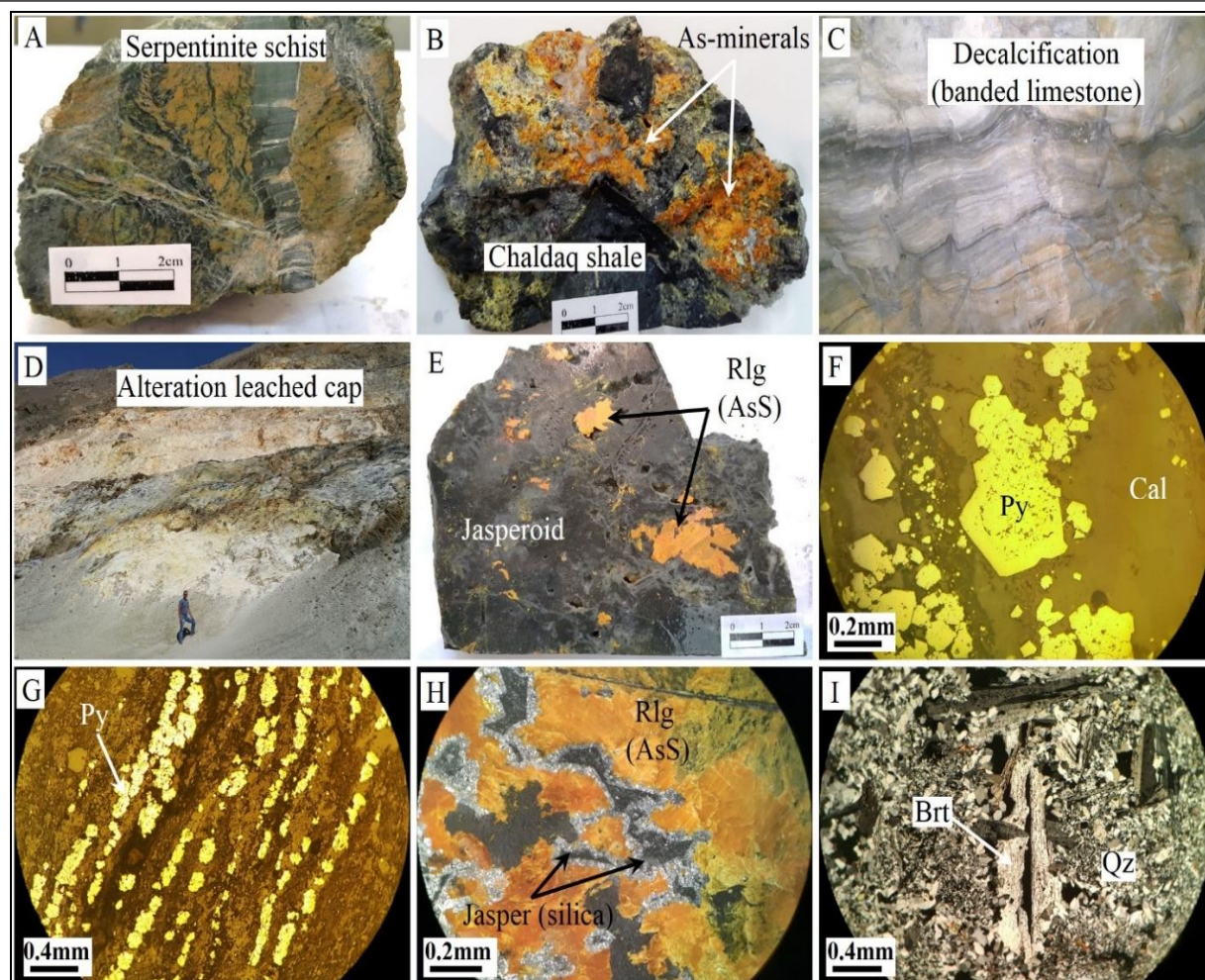
قابل مقایسه با این تحولات در خرده قاره ایران مرکزی باشد (Hajialioghli et al., 2007). همچنین برون‌زد مجموعه دگرگونی در همتافت تخت‌سلیمان مانند خرده قاره ایران مرکزی محدود به گسل‌های راندگی است.

سنگ‌های دگرگونی پی‌سنگ در منطقه تخت‌سلیمان و خرده قاره ایران مرکزی توسط رسوبات سکوی اینفراکامبرین از نوع رسوبات قاره‌ای یا دریایی کم ژرفا پوشیده شده‌اند. رخساره‌های رسوبی حاشیه دریا^۱ در منطقه تخت‌سلیمان (سازند کهر) با سازند تاشک در خرده قاره ایران مرکزی قابل مقایسه است (Nadimi, 2007). همچنین، سن نفوذ سنگ اولیه گنیس‌های گرانیتی در مجموعه دگرگونی تخت‌سلیمان (با سن تقریباً ۵۶۰ میلیون سال) قابل مقایسه با سن ایزوتوپی U/Pb زیرکن در سنگ‌های دگرگونی منطقه ساغند در خرده قاره ایران مرکزی است (Ramezani and Tucker, 2003). به‌طور کلی پی‌سنگ کانسار طلای زرشوران از دو مجموعه سنگ‌های دگرگونی تشکیل شده که شامل مجموعه ایمان‌خان با ترکیب آمفیول-ایدوتیت شیست، سربانتینیت شیست، سربسیت کلریت شیست، کوارتز میکا شیست و کالک شیست در بخش زیرین و مجموعه چالداغ با ترکیب مرمر و کالک شیست در بخش بالایی است (Ojaghi, 1996; Ghorbani, 2000). به‌نظر می‌رسد گسل تکاب (قیرجه-چهارطاق) مهم‌ترین ساختار منطقه فلززایی تکاب است که نقشی مؤثر در رخداد کانه‌زایی و شکل‌گیری ذخایر چندفلزی در بخش‌های مختلف ناحیه داشته است. در مورد سازوکار و سوی شیب گسل تکاب اختلاف‌نظر وجود دارد. برخی آن را گسلی عادی (Shafaii Moghadam et al., 2015) و برخی دیگر مانند آلن و همکاران (Allen et al., 2011) آن را گسلی راستالغز با جابه‌جایی راست‌بر ۱۵ کیلومتری تفسیر کرده و برخی آن را راندگی در نظر گرفته‌اند (Babakhani and Ghalamghash, 1998; Saki, 2010).

کانه‌زایی و ژئومتری کانسنگ

مهم‌ترین واحد سنگی منطقه معدنی زرشوران از واحدهای سنگ‌چینه‌ای پرکامبرین تشکیل شده که از قدیم به جدید شامل

سنگ بستر سربانتین شیست-مرمر (واحد ایمان‌خان) (شکل ۲-۱)، واحد آهکی متبلور با ضخامت ۳۰۰ متر (واحد چالداغ) و واحد شیل سیاه با میان‌لایه‌های آهک و دولومیت و ضخامت ۱۵۰ متر (واحد زرشوران) است. واحد شیل سیاه زرشوران به‌عنوان مهم‌ترین میزبان کانه‌زایی طلا شناخته می‌شود (شکل ۲-۲). کانه‌زایی با ژئومتری چینه‌کران تا چینه‌سان، ضخامت متغیر ۵ تا ۶۰ متر، درازای یک کیلومتر و شیب ۳۵ تا ۵۰ درجه جنوب‌باختر در میزبان شیل سیاه واحد زرشوران و به‌طور محلی در بخش بالایی آهک چالداغ تشکیل شده است. بخش بالایی آهک چالداغ در نتیجه واکنش با یک سیال اسیدی داغ دگرسان شده است و به‌صورت آهک‌های پودر شده خاکستری و بسیار سست برون‌زد دارد که ظاهر باندی یا نواری دارند (شکل ۲-۳). با توجه به بررسی‌های انجام‌شده، دست‌کم چهار نوع دگرسانی شامل دگرسانی‌های سیلیسی (با کانی شاخص ژاسپر)، کلسیت‌زدایی، دولومیتی و آرزلیک در سنگ میزبان کانه‌زایی کانسار زرشوران مشاهده شده است (Asadi et al., 2000). فرایندهای دگرسانی برون‌زاد و فروشویی اسیدی نیز به‌طور وسیع همراه این دگرسانی‌ها تشکیل شده که اغلب با رنگ‌های زرد و خاکستری بخش زیادی از منطقه را پوشانده است (شکل ۲-۴). کانی‌های سولفیدی آرسنیک (نظیر اورپیمت و رآلگار) و پیریت فراوان‌ترین کانه‌های فلزی کانسار زرشوران هستند (شکل ۲-۵، F، E، G و H). کانه‌های فرعی اسفالریت، گالن، استینیت، گچلیت، آرسنوپیریت و مارکازیت نیز در این کانسار وجود دارد (Asadi et al., 2000). از کانی‌های کمیاب نیز می‌توان به آپاتیت، روتیل، زیرکن و زنونایم اشاره کرد. مهم‌ترین باطله‌های کانسار نیز شامل کوارتز، فلورین، باریت، مسکویت و کلسیت است (شکل ۲-۶). طبق پژوهش مهرابی و همکاران (Mehrabi et al., 1999)، دست‌کم پنج نوع کانسنگ شامل کانسنگ‌های سیلیسی، آرسنیک، پیریتی، کربناتی کانسنگ طبیعی طلا در بخش درون‌زاد کانسار زرشوران وجود دارد. طبق گزارش اکتشافی صمیمی (Samimi, 1992)، کانسار زرشوران دارای تناژ ۲/۵ میلیون تن و عیار ۱۰ گرم در تن است.



شکل ۲. تصویرهای معرف از رخداد کانی‌سازی در کنسار طلای زرشوران، A: نمونه دستی از واحد سنگ بستر ایمان‌خان از نوع سرپنتینیت شیست، B: نمونه دستی از واحد شیل سیاه زرشوران همراه با کانه‌زایی آرسنیک، C: دگرسانی کلسیت‌زدایی با حضور آهک‌های باندی خاکستری، D: دورنمایی از فرایند دگرسانی برون‌زاد یا فروشویی اسیدی در معدن زرشوران (دید به سمت شمال)، E: کانه‌زایی رآلگار در میزبان ژاسپروئیدهای زرشوران، F: تصویر میکروسکوپی بازتابی-نور عادی (PPL) از پیریت‌های خوش‌وجه در میزبان کلسیت واحد چالداغ، G: تصویر میکروسکوپی بازتابی-نور عادی (PPL) از پیریت‌های با بافت نواری، H: تصویر میکروسکوپی بازتابی-نور متقاطع (XPL) از کانه‌زایی رآلگار همراه با باطله ژاسپر و I: تصویر میکروسکوپی عبوری-متقاطع (XPL) از هم‌رشدی باطله‌های باریت و کوارتز. علائم اختصاری کانی‌ها از ویتنی و اوانز (Whitney and Evans, 2010) اقتباس شده است (Brt: باریت، Cal: کلسیت، Py: پیریت، Qz: کوارتز، Rlg: رآلگار).

Fig. 2. Common features of mineralization at Zarshuran gold deposit, A: hand specimen of serpentinite schist from the Iman Khan unit, B: hand specimen of Zarshuran black shale accompanied with As-bearing minerals, C: decalcification alteration in grey banded limestone, D: outcrop of supergene alteration or acidic leached cap in Zarshuran mine (view looking to north), E: realgar mineralization as open space filling texture within jasperoid, F: euhedral pyrite within Chaldaq calcite (PPL, reflected light), G: elongated pyrite (PPL, reflected light), H: realgar mineralization accompanied with jasper (XPL, reflected light), and I: intergrowth texture between quartz and barite gangues (XPL, transmitted light). Abbreviations after Whitney and Evans (2010) (Brt: barite, Cal: calcite, Py: pyrite, Qz: quartz, Rlg: realgar).

مواد و روش

در این پژوهش با روشی که برپایه الگوریتم STA^۱ (Masoud and

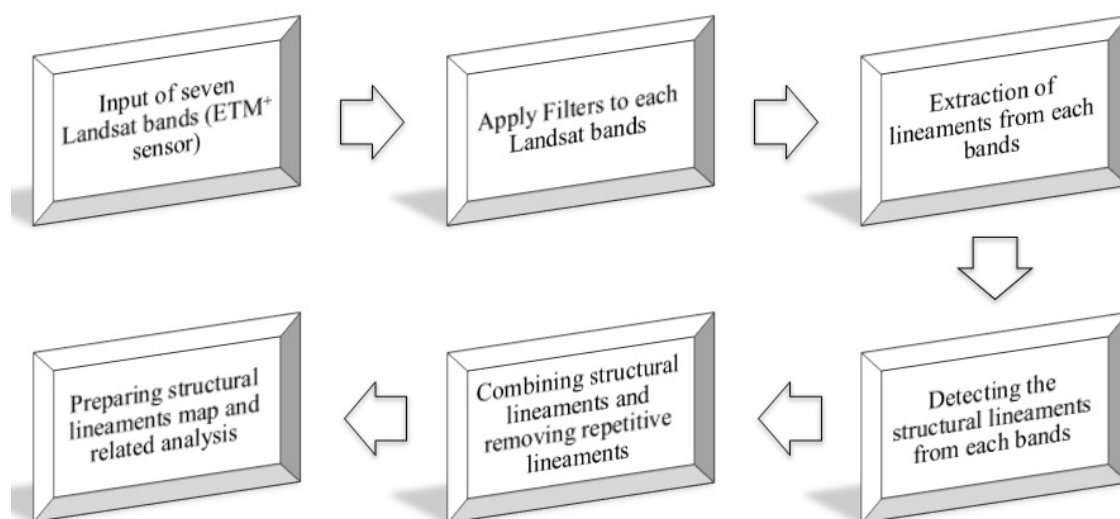
Koike, 2006; Koike et al., 1998) بنا شده است، خطواره‌های

منطقه زرشوران استخراج شده و سپس با استفاده از تحلیل‌های فرکتالی

1. Segment Tracing Algorithm

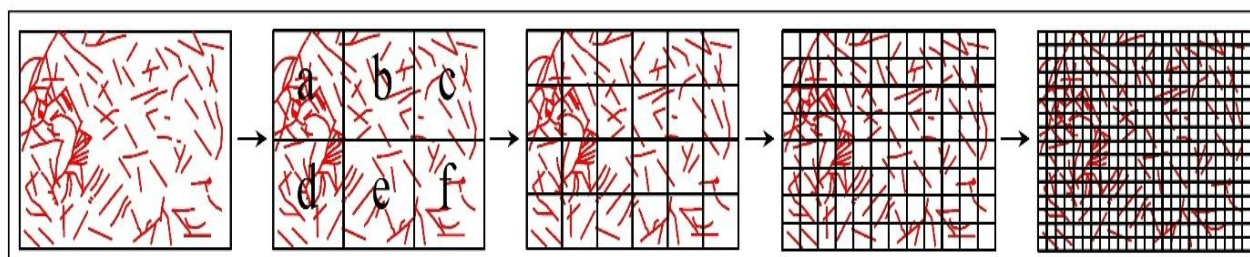
همچنین برای یافتن بعد فرکتالی، باید منطقه مورد بررسی به قطعات کوچکتر تقسیم شود تا میزان تراکم گسل و خطواره در هر قسمت بررسی شود (شکل ۴). پس از تعیین مناطق با تراکم شکستگی بالا، با بررسی نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه معدنی با مقیاس ۱:۳۵۰۰ و برداشت‌های صحرایی، شکستگی‌ها و ساختارهای فشارشی و کششی مرتبط با پهنه‌های گسلی راستالغز بررسی شده است. در ادامه ارتباط بین کانی‌سازی و شکستگی‌ها عرضی و طولی مرتبط با چین خوردگی در طاق‌دیس ایمان‌خان بررسی شده و مدل شماتیک نحوه تشکیل کانسار در این ساختار چین‌خورده ارائه شده است.

ارتباط بین کانی‌سازی و زمین‌ساخت مورد بررسی قرار گرفته است. یکی از روش‌هایی که برای محاسبه ابعاد فرکتالی به کار می‌رود، روش مربع‌شمار یا روش Log-Log است (Mandelbort, 1982). در این روش تعداد مربعات (N) تابعی از r و بعد فرکتال d است و با استفاده از فرمول $N = K (1/r)^d$ به دست می‌آید. استخراج خطواره‌های منطقه مورد بررسی، با استفاده از هفت باند تصویرهای ماهواره Landsat 7 و سپس اعمال فیلترهای مناسب بر روی هر باند به روش نیمه‌خودکار بر پایه الگوریتم STA انجام شده است (شکل ۳). با ورود لایه اطلاعاتی خطواره‌ها به محیط نرم‌افزار ArcGIS و اتصال خطواره‌های مرتبط با هم و نیز حذف خطواره‌های تکراری، نقشه نهایی خطواره‌ها تهیه شد.



شکل ۳. طرح کلی استخراج و نقشه نهایی خطواره‌های منطقه زرشوران

Fig. 3. Extraction plan and final lineation map of the Zarshuran area



شکل ۴. طرح شبکه‌بندی خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد بررسی به منظور بررسی ابعاد فرکتالی در منطقه زرشوران

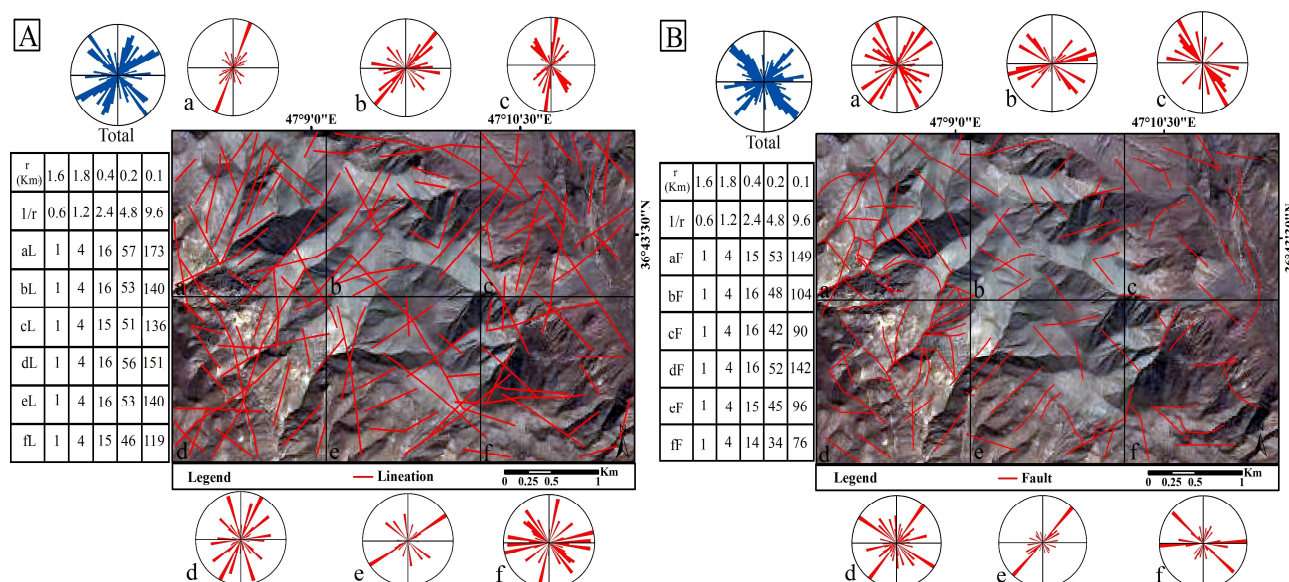
Fig. 4. Grid layout of the lineaments and faults of the study area in order to investigate the fractal dimensions in the Zarshuran area

بحث

تحلیل خطواره‌ها و گسل‌ها

برای محاسبه بعد فرکتال خطواره‌ها و گسل‌های به‌دست آمده، ابتدا منطقه مورد بررسی به شش پهنه (a تا f) تقسیم شد (شکل ۵). سپس در هر شش پهنه، نمودارهای گل سرخی به‌منظور به‌دست آوردن روندهای اصلی و فرعی خطواره‌ها و گسل‌ها ترسیم شد. روندهای اصلی خطواره‌ها در پهنه‌های a، b، d، e و f شمال‌خاوری-جنوب‌باختری، و پهنه c شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است. همچنین روندهای فرعی خطواره‌ها در پهنه‌های a، b، c و f شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و پهنه‌های d و e شمال‌باختری-

جنوب‌خاوری است (شکل ۵-A). روند اصلی گسل‌ها در پهنه‌های a، b، d، e و f شمال‌خاوری-جنوب‌باختری است و در پهنه c روند فرعی شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است و در گسل‌ها در پهنه‌های b و e شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است و در پهنه‌های a، c، d و f، روند فرعی گسل‌ها شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است (شکل ۵-B). به‌طور کلی بیشترین فراوانی روند خطواره‌های منطقه مورد بررسی، روندهای N20E تا N75E و همچنین بیشترین فراوانی روند گسل‌ها N30E تا N85E است (جدول ۱).



شکل ۵. A: نقشه شبکه‌بندی خطواره‌های منطقه زرشوران و B: نقشه شبکه‌بندی گسل‌های منطقه زرشوران به همراه نمودارهای گل سرخی. نمودارهای سرخ‌رنگ روند خطواره‌ها و گسل‌های هر پهنه و نمودارهای آبی رنگ روند کلی را نشان می‌دهند.

Fig. 5. A: Grid map of the lineaments of the Zarshuran area, and B: Grid map of the faults in the Zarshuran area with rose diagrams. The red diagrams show the trends of the lineaments and faults of each zone and the blue diagrams indicate general trend.

Engineers Co., 2013) و تصویرهای ماهواره‌ای، خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد بررسی استخراج شده است. ابتدا نقشه خطواره‌ها به شش مربع اصلی تقسیم شده و برای هر مربع بعد فرکتالی محاسبه شده است (Da تا Df). ابعاد مربع‌ها (r) و تعداد مربع‌هایی که حاوی خطواره هستند (N)، مطابق با شکل ۵

تحلیل بعد فرکتال گسل‌ها و خطواره‌ها و ارتباط آن با

کانی‌سازی

مبنای مطالعه فرکتال، محاسبه ابعاد فرکتالی برای مؤلفه‌های هندسی است که بدین منظور با استفاده از نقشه‌های زمین‌شناسی منطقه معدنی با مقیاس ۱:۳۵۰۰ (Kavoshgaran Consulting

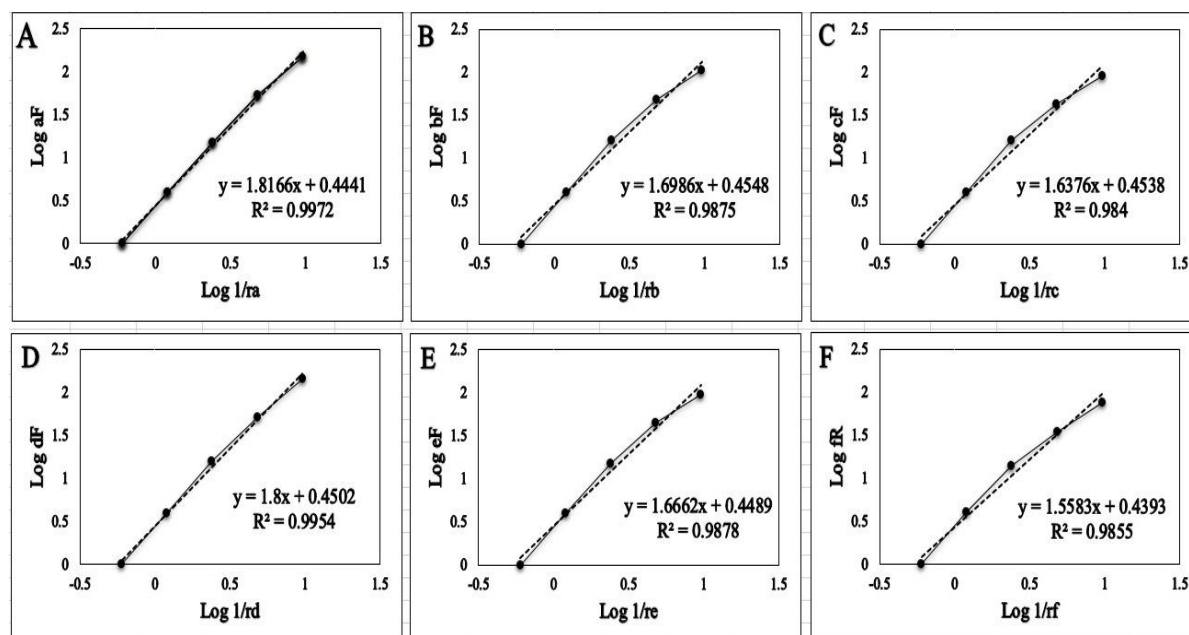
با $D=1.8$ (شکل ۶-د) و در پهنه e برابر با $D=1.6662$ (شکل ۶-ه) است. نمودارهای ابعاد فرکتالی مربوط به خطواره‌های منطقه مورد بررسی در پهنه a برابر با $D=1.8336$ (شکل ۷-ا)، در پهنه b برابر با $D=1.8032$ (شکل ۷-ب) و در پهنه c برابر با $D=1.7754$ (شکل ۷-ج) است. همچنین پهنه d با میزان بعد فرکتال $D=1.8465$ (شکل ۷-د) دارای بیشینه مقدار، پهنه e برابر با $D=1.8032$ (شکل ۷-ه) و پهنه f با مقدار بعد فرکتال $D=1.7415$ (شکل ۷-ف) دارای کمینه مقدار است.

محاسبه شده است. با ترسیم نمودار تعداد مربع‌های حاوی گسل یا خطواره بر معکوس اضلاع مربع می‌توان به بعد فرکتال گسل‌ها و خطواره‌ها در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی پی‌برد. نمودارهای ترسیم شده برای ابعاد فرکتالی گسل‌ها در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی، نشان می‌دهند که پهنه a دارای بیشینه ابعاد فرکتالی است که مقدار آن $D=1.8166$ بوده (شکل ۶-ا) و پهنه f دارای کمینه بعد فرکتالی و حدود $D=1.5583$ است (شکل ۶-ف). همچنین ابعاد فرکتالی در پهنه b برابر با $D=1.6986$ (شکل ۶-ب)، در پهنه c برابر با $D=1.6376$ (شکل ۶-ج)، در پهنه d برابر

جدول ۱. روندهای اصلی و فرعی خطواره‌ها و گسل‌ها در پهنه‌های منطقه زرشوران

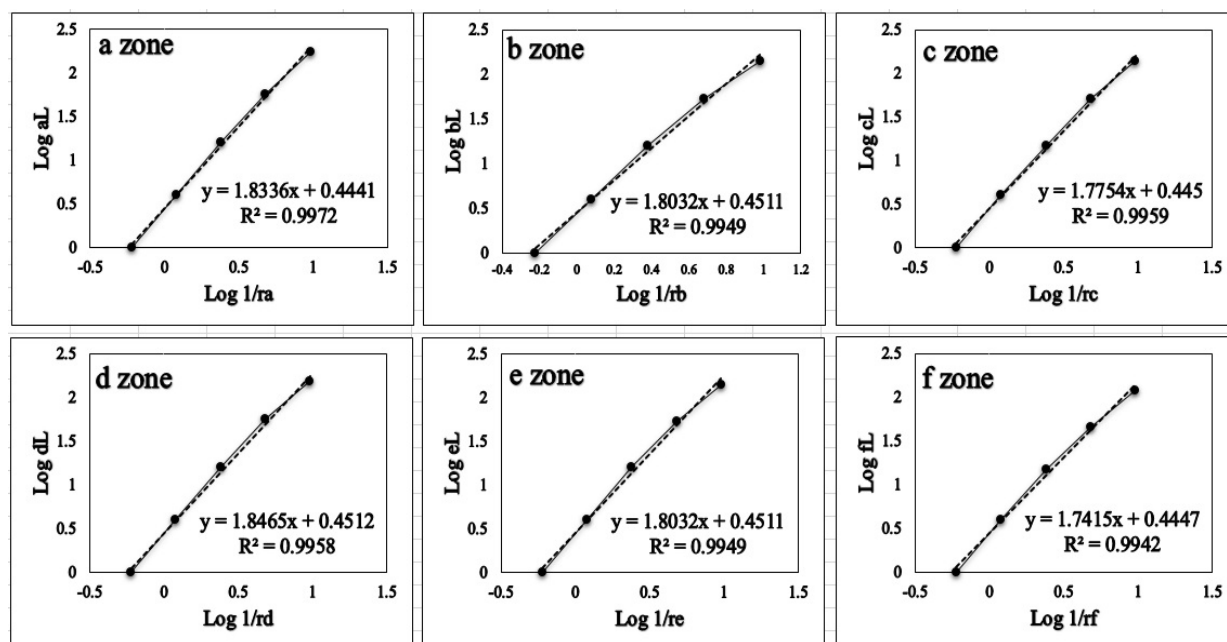
Table 1. Main and secondary trends of the lineaments and faults in the zones of the Zarshuran area.

	Zone	a	b	c	d	e	f	Total trend
Lineation	Main trend	N22E-N25E	N39E-N42E	N33W-N46W	N20E-N37E	N52E-N59E	N72E-N81E	N27E-N21E - N38W
	Subsidiary trend	N39E-N44E	N51E-N56E	N4E-N12E	N13W-N24W	N53W-N58W	N81E-N89E	N41W-
fault	Main trend	N35E-N40E	N75E-N80E	N30W-N35W	N35E-N40E	N40E-N45E	N85E-N90E	N40W-N45W
	Subsidiary trend	N25W-N30W	N65E-N70E	N80W-N85W	N55W-N60W	N60E-N65E	N45W-N50W	N45W-N50W



شکل ۶. نمودار لگاریتمی گسل‌ها برای محاسبه ابعاد فرکتالی در شش پهنه منطقه زرشوران (a تا f)

Fig. 6. Logarithmic diagram of the faults to calculate the fractal dimensions in six zones of the Zarshuran area (a to f)



شکل ۷. نمودار لگاریتمی خطواره‌ها برای محاسبه ابعاد فرکتالی در شش پهنه منطقه زرشوران (a تا f)

Fig. 7. Logarithmic diagram of the lineaments to calculate the fractal dimensions in six zones of the Zarshuran area (a to f)

است. با استفاده از روش‌های درون‌یابی، یک نقشه کلی عیار طلا بر حسب نمونه‌های برداشت‌شده، ترسیم‌شده است که پراکندگی این عنصر را در قسمت‌های مختلف منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد (شکل A-8 و B). برای بررسی ارتباط بین ابعاد فرکتالی گسل‌ها و خطواره‌ها با توزیع پراکندگی عنصر طلا در منطقه مورد بررسی، نقشه گسله‌ها و خطواره‌ها با نقشه توزیع پراکندگی عنصر طلا هم‌پوشانی شده است (شکل A-8). این هم‌پوشانی و مقایسه عیار طلا با مقادیر ابعاد فرکتالی در هر پهنه می‌تواند ارتباط ساختاری بین مناطق با تراکم گسلی بالا و عیار بالای عنصر طلا را نشان دهد. با مقایسه ابعاد فرکتالی و توزیع پراکندگی عنصر طلا در بخش‌های مختلف منطقه مورد بررسی، مشاهده می‌شود که در پهنه‌های a و d که دارای بیشترین ابعاد فرکتالی مربوط به گسل‌هاست، عیارهای بالایی از طلا (عیار بین ۹۳ تا ۲۰۶۸ میلی گرم در تن) را نیز نشان می‌دهند. در پهنه‌های c و f که دارای کمترین مقادیر ابعاد فرکتالی گسل است نیز طلا عیارهای پایینی از طلا (عیار بین ۵ تا ۹۳ میلی گرم در تن) را نشان می‌دهند. در نقشه هم‌پوشانی پراکندگی

برای بررسی ارتباط بین پهنه‌های گسلی و خطواره‌ها و میزان عیار عنصر طلا در منطقه معدنی زرشوران، تعداد ۷۵ نمونه سنگی از قسمت‌های سرشاخه رودها، آبراهه‌ها، ترانشه‌ها و برون‌زدهای سطحی با در نظر گرفتن آنومالی‌های زمین‌شیمی برداشت شد (جدول ۲). نمونه‌های مورد نظر توسط شرکت مهندسین مشاور کاوشگران (Kavoshgaran Consulting Engineers Co., 2013) برداشت‌شده و نتایج آن در گزارشی با نام "پی‌جویی و اکتشاف مقدماتی در اطراف معدن طلای زرشوران" ارائه شده است. بر این اساس، نمونه‌های برداشت‌شده، پس از آماده‌سازی و تفکیک به آزمایشگاه زرآزمایشگاه ارسال‌شده و توسط روش دستگاهی طیف‌سنج نوری جفت‌شده پلاسمای القایی^۱ مورد تجزیه قرار گرفته است. خطای تجزیه ± 1 گرم در تن و حد تشخیص دستگاه برای عناصر مختلف بین ۰/۱ تا ۰/۰۱ درصد وزنی است. برای آماده‌سازی و تخریب نمونه‌ها به منظور تهیه محلول و قرائت توسط دستگاه از روش تخریب چهار اسید استفاده شده است. مقادیر عنصری برای طلا بر حسب میلی گرم در تن و توسط روش آذر محک^۲ تعیین شده

1. Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy
2. Fire Assay

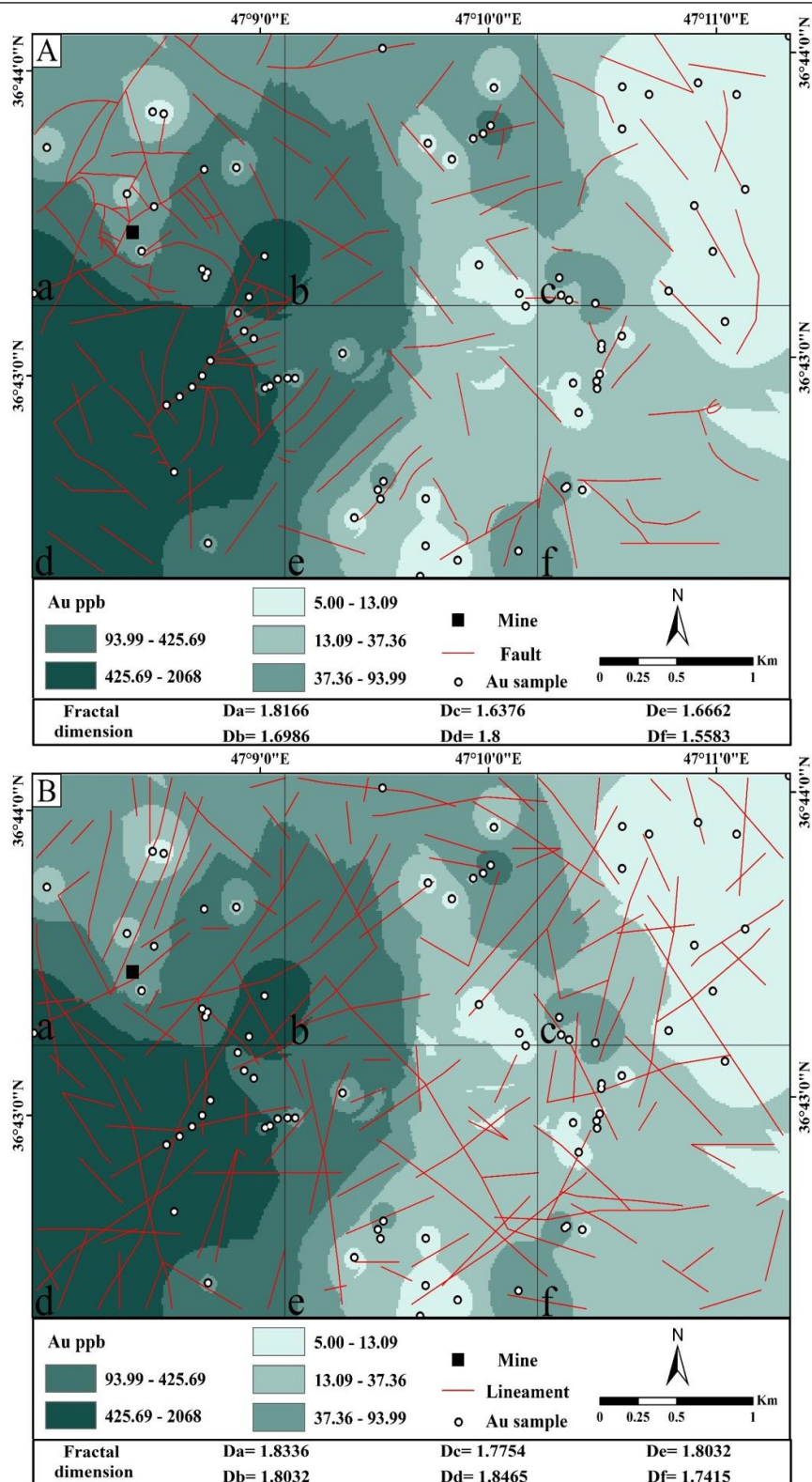
عیار طلا و ابعاد فرکتالی خطواره‌های منطقه مورد بررسی (شکل ۸-
B) نیز مشاهده می‌شود که در پهنه‌های a و d که دارای بیشترین
مقادیر ابعاد فرکتالی خطواره است، عیار طلا نیز بالاست و در
پهنه‌های c و f که دارای کمترین تراکم خطواره هستند، طلا نیز
عیار پایینی دارد. بنابراین، مشاهده می‌شود که در بخش‌هایی از

منطقه مورد بررسی که ابعاد فرکتالی گسل‌ها و خطواره‌ها بالاست،
مقادیر عیار عنصر طلا نیز بالاست. این موضوع نشان‌دهنده یک
ارتباط ساختاری بین تراکم خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد
بررسی با توزیع پراکندگی سطحی عنصر طلاست.

جدول ۲. مقادیر غلظت طلا در تعداد ۷۵ نمونه از ترانشه‌های مختلف در کانسار طلای زرشوران

Table 2. Gold concentration in 75 samples of different trenches at the Zarshuran gold deposit

Sample No.	Au ppb	Sample No.	Au ppb	Sample No.	Au ppb	Sample No.	Au ppb	Sample No.	Au ppb
CD-TR01-01	13656	CD-TR02-01	24	CD-TR05-71	16	NE-TR08A-20	68	Y1-TR01-04	118
CD-TR01-02	5079	CD-TR02-02	52	CD-TR05-72	27	NE-TR08A-21	52	Y1-TR01-05	238
CD-TR01-03	7127	CD-TR02-03	335	CD-TR05-73	18	NE-TR08A-22	79	Y1-TR01-06	307
CD-TR01-04	13997	CD-TR02-04	15	CD-TR05-74	5	NE-TR08A-23	70	Y1-TR01-07	520
CD-TR01-05	13965	CD-TR03-01	89	CD-TR05-75	15	NE-TR08A-24	189	Y1-TR01-08	93
CD-TR01-06	18157	CD-TR03-02	96	CD-TR05-76	16	NE-TR08A-25	410	Y1-TR01-09	318
CD-TR01-07	2499	CD-TR03-03	160	CD-TR05-77	15	NE-TR08A-26	83	Y2-TR06-10	19
CD-TR01-08	2261	CD-TR03-04	447	CD-TR05-78	10	NE-TR08A-27	2232	Y2-TR06-11	17
CD-TR01-09	2155	CD-TR03-05	477	CD-TR05-79	13	NE-TR08B-11	301	Y2-TR06-12	28
CD-TR01-10	1760	CD-TR04-01	30	CD-TR05-80	10	NE-TR08B-12	136	Y2-TR06-13	19
CD-TR01-11	799	CD-TR04-02	33	NE-TR08A-01	27	NE-TR08B-13	75	ZR-TR04-08	177
CD-TR01-12	744	CD-TR04-03	64	NE-TR08A-02	650	NE-TR08B-14	70	ZR-TR04-09	140
CD-TR01-13	5780	CD-TR04-04	53	NE-TR08A-03	47	NE-TR08B-15	58	ZR-TR04-10	199
CD-TR01-14	7648	CD-TR04-05	161	NE-TR08A-04	28	NE-TR08B-16	77	ZR-TR04-11	466
CD-TR01-15	6959	CD-TR04-06	63	NE-TR08A-05	45	NE-TR08B-17	356	ZR-TR04-12	293



شکل ۸. A: نقشه پراکندگی عیار طلا به همراه گسل‌های منطقه زرشوران و B: نقشه پراکندگی عیار طلا به همراه خطواره‌های منطقه زرشوران در شش مربع اصلی ترسیم‌شده برای محاسبه ابعاد فرکتالی

Fig. 8. A: Gold Distribution map with faults of the Zarshuran area, and B: Gold Distribution map with lineaments of the Zarshuran area in the main six squares plotted for calculation of the fractal dimension

شکستگی های مرتبط با پهنه های گسلی راستالغز

محاسبات ابعاد فرکتالی شکستگی ها و خطواره ها و مقایسه آنها با نقشه توزیع پراکندگی عیار طلا در محدوده معدنی زرشوران نشان می دهد که یک انطباق کلی بین مناطق با تراکم شکستگی بالا و توزیع عیارهای بالا وجود دارد. بنابراین در این پژوهش شکستگی های سطحی مرتبط با پهنه های گسلی پیرامون منطقه مورد مطالعه بررسی شده است. به نظر می رسد مهم ترین ساختار گسلی تأثیرگذار بر منطقه مورد بررسی، پهنه گسلی تکاب با روند NNW-SSE و طولی حدود ۸۰ کیلومتر است (شکل ۹- A). سازوکار این گسل در پژوهش های پیشین به صورت عادی (Shafaii Moghadam et al., 2015) یا رانندگی (Saki, 2010) در نظر گرفته شده و با جهت حرکت از سمت خاور به سمت باختر باعث رانده شدن بلوک انگوران بر روی حوضه تکاب شده است (Alavi and Amidi, 1976; Daliran, 2008). پژوهش های جدیدتر گسل تکاب را به صورت گسلی راستالغز با جابه جایی حدود ۱۵ کیلومتری راست گرد نشان می دهد (Allen et al., 2011; Biralvand et al., 2017). در واقع در امتداد این گسل، واحدهای آتشفشانی با حرکت راست گرد ۱۵ کیلومتر جابه جا شده اند و در باختر این گسل شیب لایه های میوسن مربوط به سازند قرمز بالایی به صورت نیمه افقی است. پیرامون این گسل چشمه های گرمابی با محتوای بالای طلا و نقره و همچنین نهشته های تراورتن نشان دهنده فعالیت های گرمابی از زمان میوسن تاکنون است (Daliran, 2008).

رانده شدن بلوک انگوران بر روی بلوک تکاب نشان دهنده عملکرد رانندگی گسل تکاب بوده و جابه جایی های جوان نشان دهنده حرکت راستالغز این گسل است. این تغییر حرکت از رانندگی به راستالغز در امتداد گسل های بزرگ شمال باختر ایران و ترکیه در پهنه برخوردی عربی - اوراسیا اتفاق افتاده است (Allen et al., 2011). پژوهشگران متعددی تغییر حرکت از رانندگی به راستالغز راست گرد در امتداد گسل شمال آناتولی در ترکیه

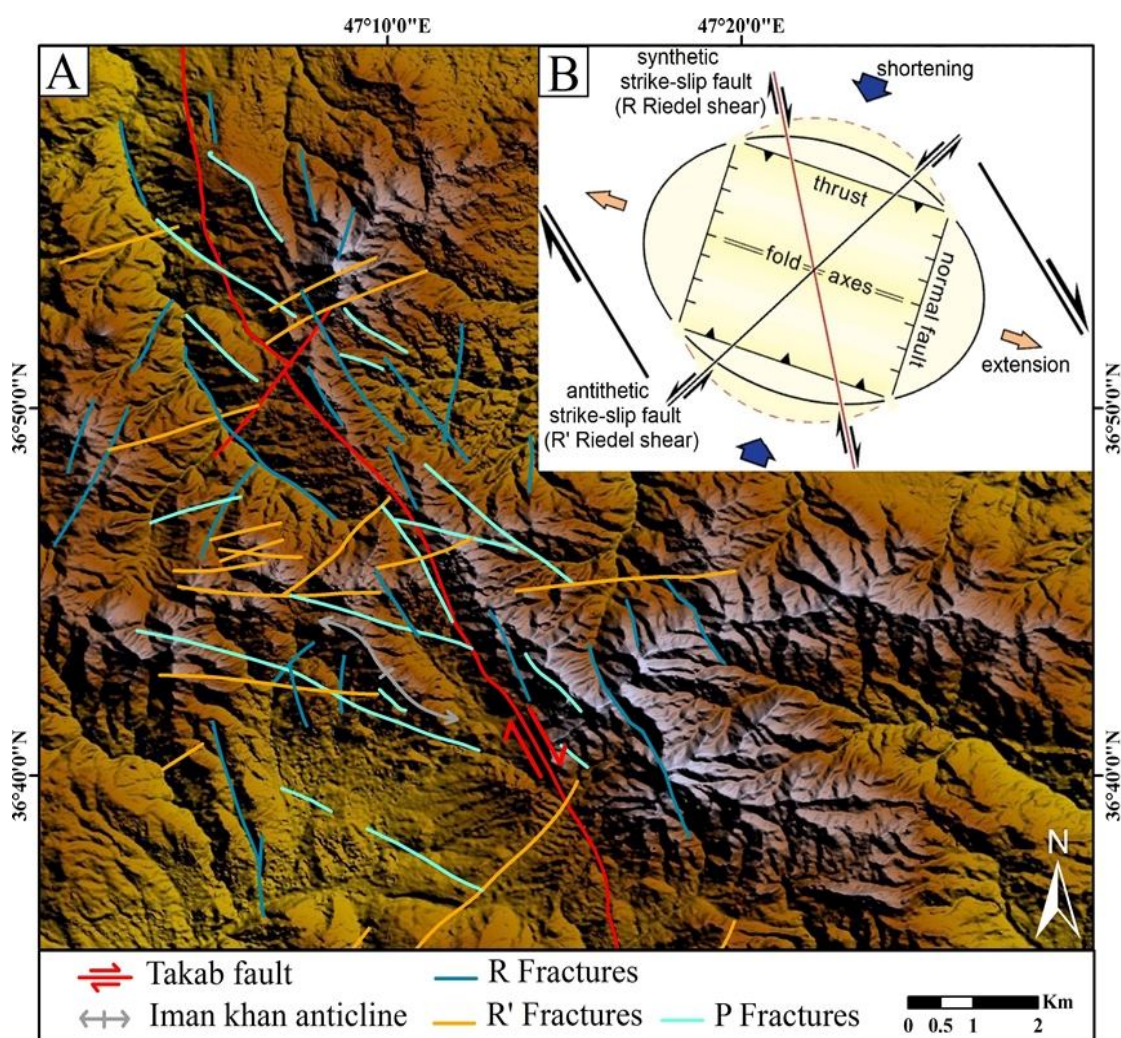
(Keskin, 2003; Hafkenscheid et al., 2006; Faccenna et al., 2006) و گسل جوان اصلی زاگرس در ایران (Alipoor et al., 2012) را با الگوی شکست ورقه^۱ توجیه کرده اند. در منطقه معدنی زرشوران پهنه گسلی تکاب و شکستگی های مرتبط با آن نقشی اساسی در هدایت سیالات گرمابی دارد که اطلاعات سن سنجی نشان می دهد، این فعالیت ها از میوسن تاکنون ادامه داشته است (Mehrabi et al., 1999; Daliran, 2008). زمان رخداد شکست ورقه در بخش های باختری فلات ایران میوسن میانی در نظر گرفته شده (Jahangiri, 2007; Omrani et al., 2008) و احتمالاً گسل تکاب نیز به علت این رخداد از رانندگی به راستالغز تغییر حرکتی پیدا کرده است. این تغییر فاز حرکتی به راستالغز راست گرد ناشی از رخداد شکست ورقه، باعث شروع فعالیت های گرمابی در منطقه شده که تاکنون نیز ادامه دارد.

بنابراین با توجه به نقش شکستگی های مرتبط با گسل راستالغز تکاب در این بخش شکستگی های تشکیل شده در پهنه های گسلی راستالغز مورد بررسی قرار گرفته است. این شکستگی های کوچک بسته به نوع قرارگیری و جنبش شناسی، شامل شکستگی های نوع X، P، R و R' هستند (شکل ۹-B). شکستگی های X، کوچک و کششی (انقباضی) بوده و بدون خش لغزش هستند که اغلب توسط کانه زایی کوارتز و کربنات پر شده اند. جهت یابی این شکستگی ها به نوع حرکت و لغزش صفحه اصلی وابسته است و با شیبی حدود ۴۵ درجه نسبت به صفحه اصلی حرکت قرار می گیرند. شکستگی های P از نوع سیستم شکستگی های برشی هستند که برخی مواقع جهتی خلاف جهت حرکت اصلی دارند. این شکستگی ها زاویه کمی با سطح گسل می سازند و از نظر جنبش شناسی مشابه با گسل های معکوس و یا رانندگی هستند. در سیستم شکستگی های برشی ریدل R گسل های نرمال کم زاویه تشکیل می شوند و شکستگی های R' مانند گسل های معکوس هستند که زاویه زیادی با سطح گسل می سازند. شکستگی های ریدل نسبت به R' متداول تر هستند و با استفاده از این شکستگی ها می توان جهت حرکت ساختارهای اصلی را مشخص کرد (Pinar

(et al., 2003; Fossen, 2010).

فشارشی مثل چین‌خوردگی تشکیل شده است (شکل ۹-۱). طاق‌دیس ایمان‌خان که میزبان کانسار طلای زرشوران و نیز یکی از ساختارهای تشکیل شده در امتداد پهنه گسلی تکاب است، با یک زاویه کم نسبت به روند اصلی این گسل تشکیل شده است. در این طاق‌دیس که یک ساختار چین‌خورده در پهنه گسلی است نیز شکستگی‌های متعددی تشکیل شده که نقشی اساسی در مهاجرت سیالات گرمایی داشته است.

علاوه‌بر شکستگی‌های ذکر شده در پهنه‌های برشی مرتبط با گسل‌های راستالغز ساختارهای فشارشی مثل گسل راندگی و چین‌خوردگی (T در شکل ۹-۲) و ساختارهای کششی مثل گسل‌های نرمال (N در شکل ۹-۲) تشکیل می‌شود. در منطقه مورد بررسی نیز حرکت راستالغز راست‌گرد گسل تکاب باعث تشکیل شکستگی‌های متفاوتی شده و علاوه‌بر این شکستگی‌ها ساختارهای



شکل ۹. A: نقشه الگوی ارتفاع رقومی و شکستگی‌های برشی در منطقه زرشوران و B: نحوه تشکیل شکستگی‌ها در ارتباط با گسل امتدادلغز با حرکت راست‌گرد. علائم اختصاری از فوسن (Fossen, 2010) اقتباس شده است (R: شکستگی‌های ریدل، P: شکستگی‌های برشی، X: شکستگی‌های کششی، Y: صفحه حرکت گسل).

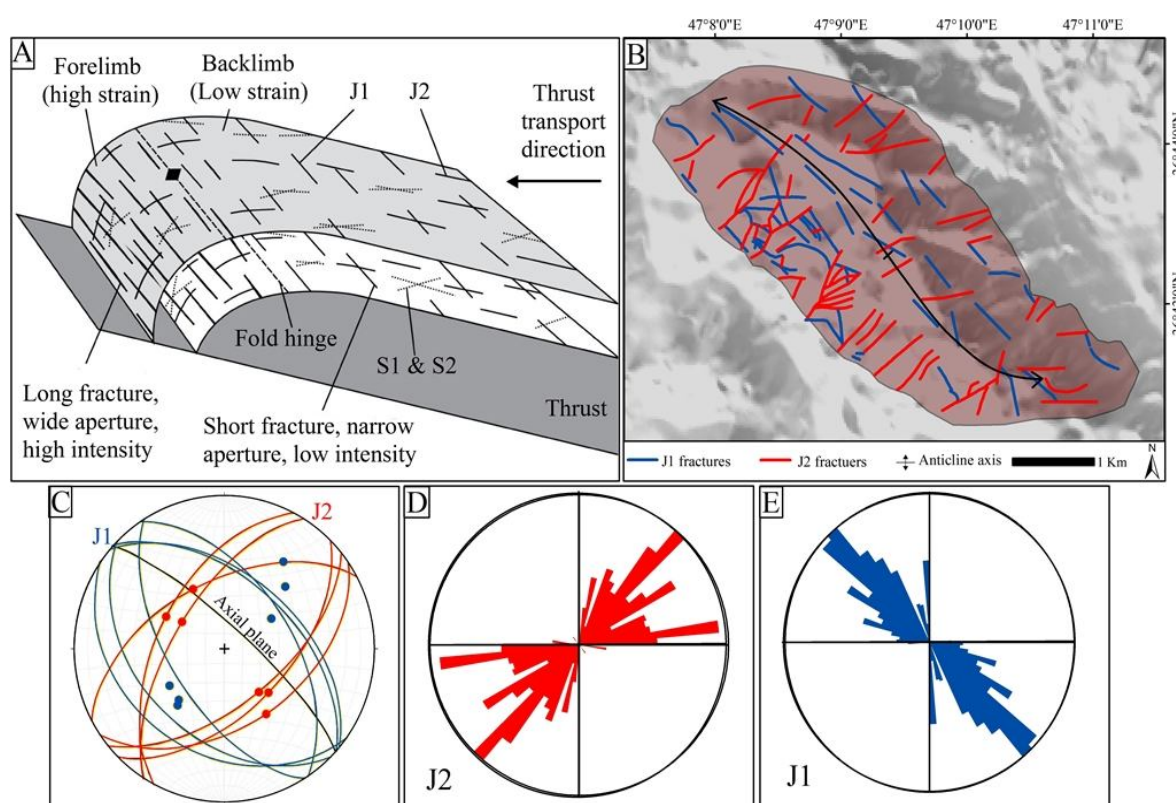
Fig. 9. A: Digital elevation model and shear fractures in the Zarshuran area, B: The formation of fractures related to the right-lateral strike-slip faults. Abbreviations after Fossen (2010) (R: Riedel fractures, P: Shear fractures, X: Extension fractures, Y: Fault movement plane).

شکستگی‌های مرتبط با چین خوردگی در طاق‌دیس

ایمان‌خان

چنان‌که قبلاً اشاره شد حرکت برشی راست‌الغز پهنه گسلی تکاب باعث تشکیل ساختارهای کششی و فشارشی در منطقه مورد بررسی شده است. یکی از ساختارهای مهم تشکیل شده در این پهنه، طاق‌دیس ایمان‌خان است که میزان کانسار طلای زرشوران است. شکستگی‌های مرتبط با این ساختار چین‌خورده نقش مهمی در هدایت سیالات گرمایی به عهده داشته‌اند. به‌طور کلی، سیستم‌های شکستگی در مکان‌هایی از چین که دارای استرین بالایی هستند تشکیل می‌شوند و چهار سیستم اصلی شکستگی مرتبط با چین خوردگی‌ها وجود دارد (Price, 1966) (شکل ۱۰-A و B). سیستم اول شامل شکستگی‌های طولی است که موازی با لولای

چین شکل می‌گیرند و شیبی عادی با لایه‌بندی دارند (J1). این دسته از شکستگی‌ها ممکن است با کشش بیرونی کمان طی چین‌خوردگی همراه باشند (شکل ۱۰-E). دومین سیستم، شکستگی‌های عرضی یا عمود بر لولای چین شکل می‌گیرند و شیبی عادی با لایه‌بندی دارند (J2). به سبب میزان استرین بالا بر روی پلاتر طاق‌دیس، احتمالاً این سیستم شکستگی با مناطق کششی محلی در ارتباط است (شکل ۱۰-D). استریوگراف ترسیم شده شکستگی‌های طولی و عرضی با صفحه محوری طاق‌دیس ایمان‌خان (شکل ۱۰-C) نشان می‌دهد که شکستگی‌های طولی به علت کشش بیرونی کمان طی چین خوردگی و به موازات محور چین خوردگی تشکیل شده است.



شکل ۱۰. A: سیستم‌های شکستگی در چین‌خوردگی‌های مرتبط با گسل (Price, 1966)، B: سیستم شکستگی‌های طولی (J1) و عرضی (J2) در راستای طاق‌دیس ایمان‌خان در منطقه زرشوران، C: استریوپلات شکستگی‌های طولی و عرضی و صفحه محوری طاق‌دیس، D: نمودار گل‌سرخ شکستگی‌های عرضی و E: نمودار گل‌سرخ شکستگی‌های طولی

Fig. 10. A: Fractures system in the fault related folding (Price, 1966), B: Longitudinal (J1) and transverse (J2) fractures system along the Iman Khan anticline in the Zarshuran area, C: Stereonet of the Longitudinal and transverse fractures and axial plane of the anticline, D: Rose diagram of the transverse fractures, and E: Rose diagram of the Longitudinal fractures

این دسته از شکستگی‌ها احتمالاً در مراحل انتهایی چین‌خوردگی و افزایش انحنا کمان بیرونی طاق‌دیس تشکیل شده‌اند. سیستم شکستگی‌های عرضی نیز که عمود بر صفحه محوری طاق‌دیس تشکیل شده‌اند، احتمالاً هم‌زمان با تشکیل چین‌خوردگی و افزایش استرین تشکیل شده‌اند. شکستگی‌های دیگری که مرتبط با چین‌ها تشکیل می‌شوند شامل سیستم شکستگی‌های برشی مزدوج (S1 و S2) هستند که نیمساز زاویه حاده آنها موازی با جهت حرکت گسلش عمقی است. ممکن است این شکستگی‌ها به سبب فشارش محلی یا فشارش داخلی کمان مرتبط با استرین طولی مماسی تشکیل شوند (Ramsay, 1967). میزان استرین، تعیین‌کننده عرض بازشدگی شکستگی بوده و درجایی که استرین بالاست، عرض شکاف شکستگی نیز بیشتر است (Jamison, 1997). سنگ‌شناسی نیز تأثیر زیادی بر بازشدگی شکستگی دارد؛ به‌طوری که سنگ‌هایی با مقاومت پایین اغلب دارای تراکم شکستگی کم (Corbett et al., 1987; Ferrill and Morris, 2008) و سنگ‌هایی با مقاومت بالا دارای شکستگی‌های زیادی هستند (Hugman and Friedman, 1979; Hanks et al., 1997; Ferrill and Morris, 2008; Ortega et al., 2010; Barbier et al., 2012). با این حال، تراکم شکستگی در مناطقی از چین‌خوردگی که دارای بیشترین انحنا و استرین هستند، بالاست؛ هرچند که ترکیب سنگی مختلفی داشته باشند (Hobbs, 1967; Jamison, 1997; Ortega et al., 2010). برای مثال تراکم شکستگی در رأس چین و یال جلویی نسبت به یال پشتی بیشتر است (Barbier et al., 2012; Awdal et al., 2013).

سیستم شکستگی‌های مرتبط با طاق‌دیس ایمان‌خان، عموماً از نوع شکستگی‌های طولی و عرضی است. این طاق‌دیس با میل دو سویه و با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری دارای درازای حدوداً ۸ کیلومتر و عرض حدود ۲ کیلومتر است. یال جنوبی این طاق‌دیس پرسیب‌تر و در بخش‌های مرکزی طاق‌دیس بین ۵۰ تا ۷۰ درجه است. بررسی‌های سن‌سنجی بر روی آرژیلیت‌های دگرسان‌شده گرمابی و سنگ‌های آتشفشانی طاق‌دیس ایمان‌خان سن کانه‌زایی در کانسار زرشوران را حدود ۱۴ میلیون سال نشان می‌دهد (Mehrabi et al., 1999).

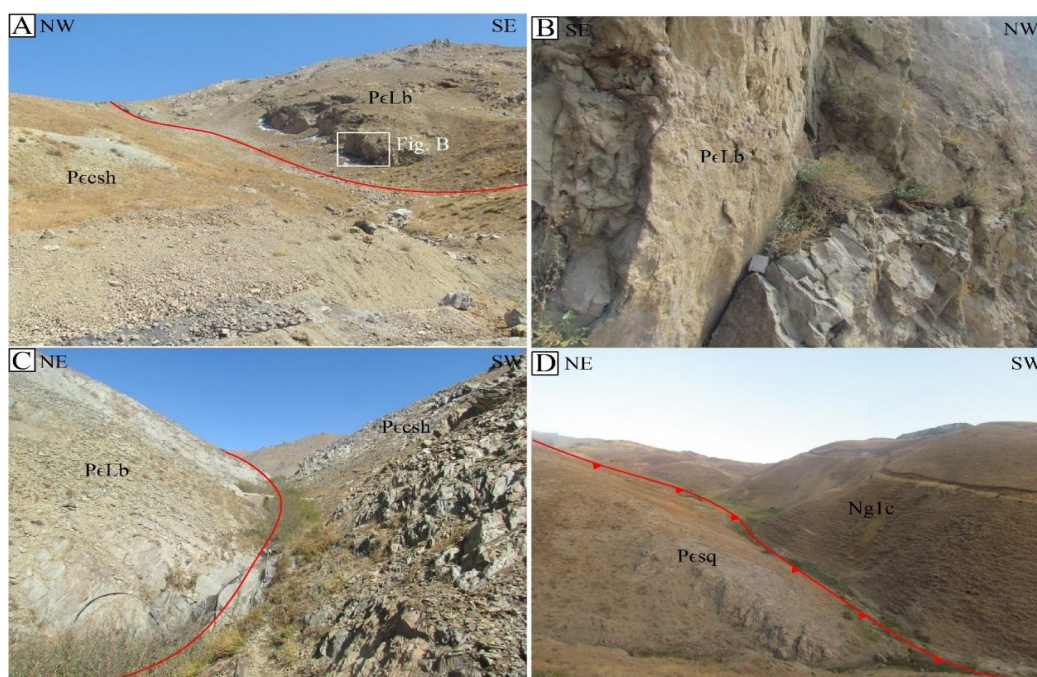
بنابراین، بعد از رخداد شکست ورقه و تشکیل ساختار چین‌خورده

ناشی از حرکت راستالغز گسل تکاب، سیالات گرمابی از طریق شکستگی‌های مرتبط با چین‌خوردگی به سطح راه پیدا کرده‌اند. این شکستگی‌ها در طاق‌دیس ایمان‌خان در روندهای مختلفی باعث دگرریختی شده و مرز بین واحد آهکی چالداغ و شیست‌های زرشوران را تشکیل می‌دهند (شکل ۱۱-A). پهنه برشی این شکستگی‌ها در واحدهای شکننده آهک چالداغ با روند شمال‌خاوری-جنوب‌باختری در مشاهدات صحرایی قابل مشاهده است (شکل ۱۱-B). در طاق‌دیس ایمان‌خان شکستگی‌های طولی اغلب بیشتر با کانی‌سازی همراه هستند؛ هرچند که در تقاطع شکستگی‌های با روند متفاوت نیز کانی‌سازی تشکیل شده است. این شکستگی‌های طولی اغلب هم‌روند با محور طاق‌دیس ایمان‌خان بوده و کنترل‌کننده کانی‌سازی هستند (شکل ۱۱-C). به‌طور کلی شکستگی‌های طولی مرتبط با طاق‌دیس ایمان‌خان به‌صورت ساختارهای گسلی با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری و شیب به سمت شمال‌خاور و جنوب‌باختر مشاهده می‌شوند. همچنین شکستگی‌های عرضی مرتبط با این طاق‌دیس به‌صورت گسلی با راستای شمال‌خاوری-جنوب‌باختری و با شیب به سمت شمال‌باختر یا جنوب‌خاور مشاهده می‌شوند. عملکرد این گسل‌های طولی و عرضی در منطقه مورد بررسی باعث شده است تا واحدهای سنی متفاوتی در کنار هم قرار گیرند؛ به‌طوری که در بخش‌های باختری منطقه مورد بررسی واحدهای الیگومیوسن در کنار واحد ماسه‌سنگ کوارتزی دگرگون‌شده پرکامبرین قرار گرفته‌اند (شکل ۱۱-D).

شواهد صحرایی از تقاطع گسل‌های عرضی، طولی و مزدوج در منطقه مورد بررسی با توجه به فرسایش‌پذیری سریع به‌سختی قابل مشاهده است. با این حال در ترانشه‌های حفاری‌شده، شواهدی از تقاطع گسل‌های طولی و عرضی در مرز واحد آهکی چالداغ و شیست ایمان‌خان قابل مشاهده است. گسل عرضی F1 با امتداد و شیب N70E/80SE باعث جابه‌جایی حدود ۵۰ سانتی‌متری گسل طولی F2 با امتداد و شیب N40W/75SW شده است. استریوپلات ترسیم‌شده برای این دو گسل محل تقاطع آنها را نشان می‌دهد (شکل ۱۲-A). علاوه بر محل تقاطع گسل‌ها در منطقه مورد بررسی، هندسه گسل‌های طولی نیز اهمیت زیادی دارد؛ زیرا در راستای این گسل‌ها اغلب کانی‌سازی قابل مشاهده است. شواهد

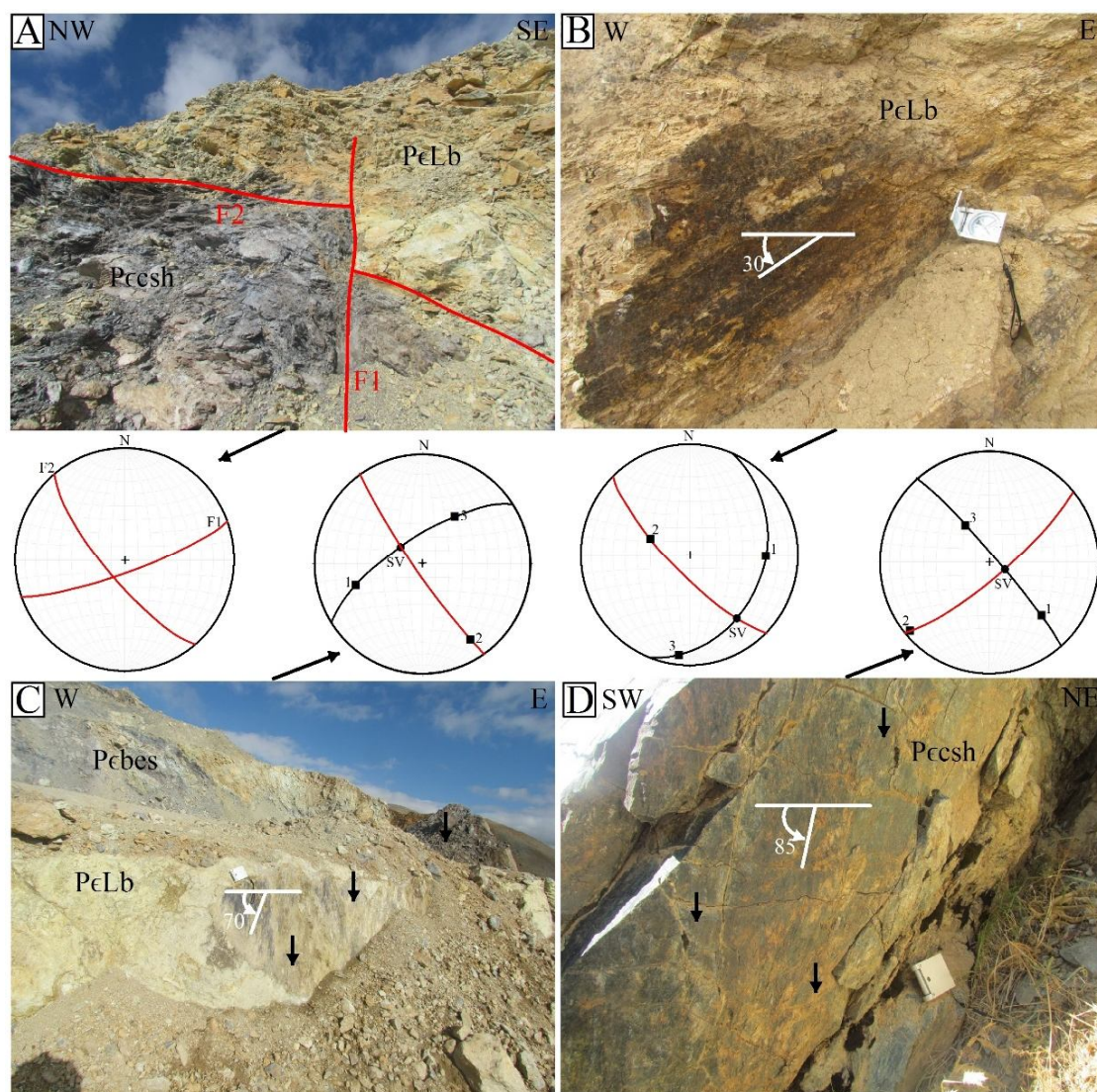
گسل طولی با مشخصات N35W/84SW و زاویه ریک ۷۰ درجه دارای عملکرد عادی است. استریوپلات ترسیم شده برای این گسل و جهت تنش‌های اصلی منطقه، عملکرد این گسل را نشان داده است (شکل ۱۲-C). سیستم شکستگی‌های عرضی در منطقه مورد بررسی دارای روند شمال خاوری-جنوب‌باختری بوده و اغلب عمود بر راستای محور طاق‌دیس ایمان‌خان تشکیل شده است. این شکستگی‌ها در راستای تنش اصلی پیشینه در منطقه بوده و اغلب دارای مؤلفه حرکتی عادی هستند. در واحد شیستی ایمان‌خان یک گسل عرضی با امتداد و شیب N50E/78SW و زاویه ریک ۸۵ درجه دارای عملکرد عادی است. استریوپلات ترسیم شده برای این گسل جهت تنش‌های اصلی و مؤلفه حرکتی راست‌گرد را نشان می‌دهد (شکل ۱۲-D).

صحرائی نشان می‌دهد که گسل‌های طولی منطقه اغلب دارای عملکرد راستالغز راست‌گرد و عادی هستند. یکی از گسل‌های طولی و امتدادلغز در واحدهای آهکی چالداغ با مشخصات N45W/76SW و زاویه ریک ۳۰ درجه جنوبی رخمون پیداکرده است. استریوپلات ترسیم شده برای این گسل، عملکرد آن را راستالغز راست‌گرد نشان می‌دهد (شکل ۱۲-B). علاوه بر این، گسل‌های طولی و راستالغز، گسل‌های طولی عادی نیز در منطقه مورد بررسی به فراوانی قابل مشاهده هستند. این گسل‌ها چون به موازات روند کلی محور طاق‌دیس و در راستای کشش قرار گرفته‌اند، فراوانی زیادی در منطقه مورد بررسی داشته و اغلب با کانی‌سازی همراه هستند. با توجه به حفاری متوالی ترانشه‌ها در منطقه مورد بررسی، رخمون‌های زیادی از این گسل‌های عادی در واحدهای مختلف قابل مشاهده است. در واحد آهکی چالداغ یک



شکل ۱۱. A: گسل عرضی بین واحد آهکی چالداغ و شیست‌های ایمان‌خان (چهارگوش سفیدرنگ موقعیت شکل B را نشان می‌دهد)، B: صفحه گسل در واحد آهکی چالداغ، C: گسل طولی در مرز بین واحد آهکی چالداغ و شیست ایمان‌خان و D: راندگی بین واحدهای الیگومیوسن و واحد ماسه‌سنگی دگرگون شده پرکامبرین. حروف اختصاری شامل: PeLb: آهک چالداغ، Peesh: شیست ایمان‌خان، Pesq: ماسه‌سنگ دگرگون شده پرکامبرین، Ng1c: واحدهای الیگومیوسن

Fig. 11. A: Transverse fault between the Chaldaq limestone and Iman Khan schist (White rectangle show the location of the Fig. B), B: Fault plane in the Chaldaq limestone, C: Longitudinal fault in boundary between the Chaldaq limestone and Iman Khan schist, and D: Thrust fault between the Oligomiocene units and metamorphic sandstone of the Precambrian. Abbreviations: PeLb: Chaldaq limestone, Peesh: Iman Khan schist, Pesq: metamorphic sandstone (Precambrian), Ng1c: Oligomiocene units



شکل ۱۲. A: تقاطع گسل عرضی F1 با امتداد و شیب N70E/80SE و گسل طولی F2 با امتداد و شیب N40W/75SW در مرز بین واحد آهکی و شیست ایمان‌خان، B: گسل طولی و امتدادلغز در واحدهای آهکی چالداغ با مشخصات N45W/76SW و زاویه ریک ۳۰ درجه جنوبی، C: گسل طولی و عادی با مشخصات N35W/84SW و زاویه ریک ۷۰ درجه و D: گسل عرضی و عادی با امتداد و شیب N50E/78SW و زاویه ریک ۸۵ درجه دارای مؤلفه راستالغز راست‌گرد

Fig. 12. A: Intersection of F1 transverse fault with N70E/80SE strike and dip and F2 longitudinal fault with N40W/75SW strike and dip in boundary between the Chaldaq limestone and Iman Khan schist, B: Longitudinal and strike-slip fault with an attitude of N45W/76SW and 30S slip rake angle in the Chaldaq limestone, C: Longitudinal and normal fault with an attitude of N35W/84SW and 70 slip rake angle, and D: Transverse and normal fault with N50E/78SW strike and dip and 85 slip rake angle with right-lateral strike-slip component

مدل‌سازی منشأ-تله^۱

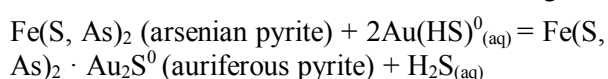
عناصر فلزی در کانسارهای با سنگ میزبان رسوبی، استفاده از

مدل‌سازی منشأ-تله است (Large et al., 2011; Muntean et

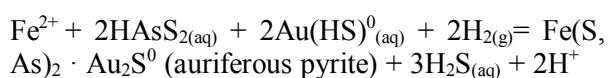
از مناسب‌ترین الگوهای اکتشافی برای دستیابی به ذخایر معدنی و

۰/۱۶ گرم در تن و شیل سیاه زرشوران ۹/۵۷ گرم در تن، به‌دست آمده است. همچنین محتوای عناصر جیوه و تالیوم در شیل‌های سیاه واحد زرشوران به‌ترتیب برابر ۲۶/۱۴ و ۲۰/۵ گرم در تن به‌دست آمده است که در سنگ‌های دیگر این مقادیر به مراتب کمتر است. طبق پژوهش‌ها، محتوای کربن آلی کل^۳ رابطه مستقیمی با رخداد طلا در سنگ‌های رسوبی ذخایر طلای کارلین بین ۰/۲ تا ۱۵ درصد وزنی در تغییر است. محتوای کربن در شیل‌های سیاه زرشوران ۷/۳۸ درصد وزنی گزارش شده (Asadi et al., 2000) که این مقدار در سنگ‌های دیگر منطقه کمتر از ۰/۵ درصد وزنی است. بر این مبنا می‌توان گفت واحد شیل-سیلستون سیاه در منطقه مورد بررسی به‌عنوان لایه‌ای کلیدی و سنگ منشأ مطرح است که حضور پیریت‌های آرسنیک‌دار و حاوی طلا از شاخص‌های اصلی آن است. از جمله دلایل همراهی طلا با پیریت‌های آرسنیک‌دار در کانسار زرشوران را می‌توان به وجود کمپلکس‌های بی‌سولفیدی $\text{Au}(\text{HS})$ و HAsS_2 محلول که از توده‌های نفوذی عمیق منشأ گرفته است، نسبت داد (Reich et al., 2005). طبق واکنش‌های زیر توسط ریچ و همکاران (Reich et al., 2005) طلا می‌تواند همراه با پیریت‌های آرسنیک‌دار در محیطی غیراکسیدان نهشته شود:

واکنش ۱



واکنش ۲



علاوه‌بر این، نقش کنترل‌کننده‌های ساختاری به‌عنوان عامل مهاجرت‌دهنده سیال و سازوکار آن در توزیع و تکوین کانه‌زایی طلا در کانسار زرشوران نیز بسیار مهم است. طبق شواهد صحرایی به‌نظر می‌رسد که حرکت پهنه‌های گسلی راستالغز و ساختارهای کششی اولیه و فشارشی بعدی نقشی مهم در کنترل کانی‌سازی طلا در کانسار زرشوران داشته‌اند. مهم‌ترین ساختار گسلی در منطقه

(al., 2011). در این میان، کانسارهای طلای نوع کارلین در میزبان شیل سیاه، سیلت‌سنگ و کربنات با تمرکز بالایی از عناصر طلا، آرسنیک، جیوه، آنتیموان و تالیوم شناخته می‌شوند که طلا اغلب به‌صورت ذرات میکرونی پراکنده (کوچک‌تر از ۰/۱ میکرون) یا پیوند شیمیایی^۱ در ساختمان پیریت‌های آرسنیک‌دار و آرسنوپیریت متمرکز می‌شود (Cline et al., 2005; Hofstra et al., 2005; Kesler et al., 2005). شیل‌های سیاه به‌عنوان یک منشأ مناسب برای تمرکز عناصر As, Au, S معرفی شده‌اند (Large et al., 2011). پژوهش‌های کراکت (Crocket, 1991) بر روی تعداد ۵۵۳ نمونه از گروه‌های مختلف سنگی نشان می‌دهد شیل‌های سیاه کربن‌دار با میانگین ۶/۷ میلی گرم در تن، بیشترین سهم را در مقایسه با سنگ‌های آذرین (میانگین ۲/۵ میلی گرم در تن)، پوسته بالایی (میانگین ۱/۸ میلی گرم در تن) (Taylor and McLennan, 1995) و جبه (میانگین ۱/۰ میلی گرم در تن) (Crocket, 1991)، دارند. پژوهش‌های اخیر توسط کتریس و یوویچ (Ketris and Yudovitch, 2009) بر روی تعداد ۹۰۰ نمونه شیل سیاه از سایر نقاط دنیا گویای میانگین طلا در ترکیب این سنگ‌هاست. مقدار زمینه طلا در شیل‌ها بین ۳ تا ۲۰ میلی گرم در تن و بیشترین فراوانی جمعیتی در مقادیر ۳۵ تا ۵۰ میلی گرم در تن متغیر است. این مقادیر سازگار با محتوای طلای زمینه در شیل‌های سیاه ذخایر کارلین نوادا (میانگین ۲۸ میلی گرم در تن) است (Large et al., 2011). در مجموع شیل‌های سیاه حاوی ماده عالی^۲ دارای محتوای بیش از ۳ برابر طلا، ۱۵ برابر آرسنیک و ۲ برابر سولفور نسبت به ترکیب متوسط پوسته‌ای دارند و لذا می‌توانند سنگ منشأ مناسبی برای ذخایر طلا با میزبان رسوبی باشند (Arthur and Sageman, 1994; Large et al., 2011).

با توجه به این مطالب، طبق تجزیه‌های انجام‌شده بر روی واحدهای سنگی مختلف در کانسار زرشوران توسط اسدی و همکاران (Asadi et al., 2000) محتوای طلا در گرانیتوئیدهای دگرسان ۰/۱۴ گرم در تن، در ژاسپروئیدها ۲/۴۲ گرم در تن، آهک چالداغ

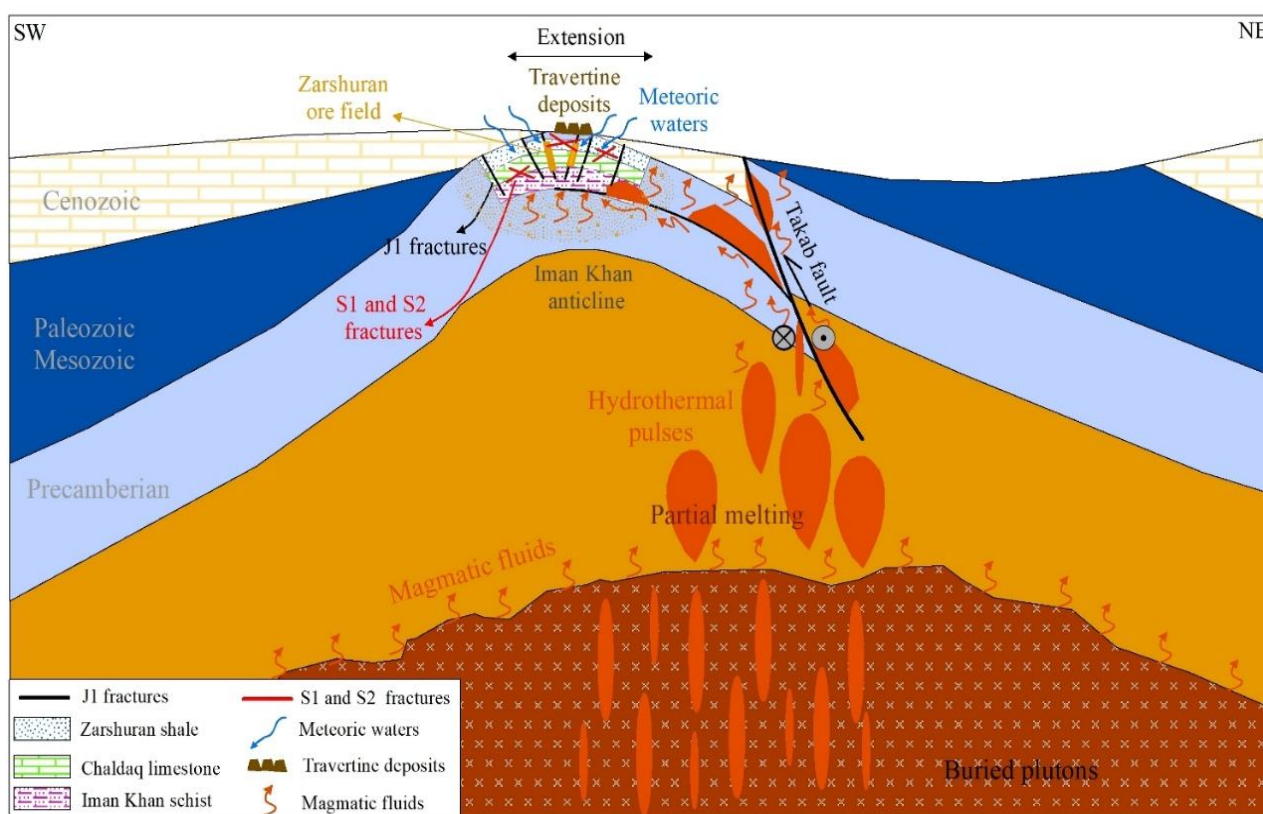
1. Chemically bounded

2. Carbonaceous black shale

3. Total organic carbon

شده و سپس از طریق شکستگی‌های تشکیل شده در طاق‌دیس به سطح را پیدا کرده است (شکل ۱۳). جای‌گیری توده‌های آذرین عمیق در منطقه و به دنبال صعود و مهاجرت سیال گرمایی به صورت متناوب از طریق شاخه‌های فرعی گسل اصلی تکاب انجام شده است. این سیالات پس از ورود در واحدهای سنگ-چینه‌ای پرکامبرین نظیر شیل و سیلت‌سنگ‌های واحد زرشوران تحت کنترل شکستگی‌های مزدوج مرتبط با چین‌خوردگی طاق‌دیس ایمان‌خان، زمینه رخداد کانه‌زایی را فراهم کرده است. مجموع این فرایندها به-طور خلاصه و شماتیک در شکل ۱۳ ارائه شده است.

گسل تکاب با راستای شمال‌باختری-جنوب‌خاوری است که طبق شواهد صحرایی این پژوهش، حرکات اخیر آن راستالغز راست‌گرد بوده است. به نظر می‌رسد حرکت راستالغز این گسل که از میوسن میانی آغاز شده است، باعث شکل‌گیری ساختارهای زمین‌ساختی چین‌خورده نظیر طاق‌دیس ایمان‌خان شده است. ساختارهای گسلی راستالغز به صورت گسلی منفرد نبوده و معمولاً در نزدیک به سطح زمین شاخه‌هایی از آنها منشعب می‌شود که در بخش جنوب‌باختری گسل تکاب، یک شاخه گسلی در قاعده طاق‌دیس ایمان‌خان تشکیل شده و به سطح نرسیده است (شکل ۱۳). پس از این، عملکرد این گسل باعث جابه‌جایی سیالات گرمایی به طاق‌دیس



شکل ۱۳. مدل فرضی از نحوه عملکرد کنترل‌کننده‌های سنگی-ساختاری در تکوین کانسار طلای زرشوران. بر مبنای این مدل، جای‌گیری توده‌های آذرین عمیق در منطقه و به دنبال بالا آمدن سیالات گرمایی به صورت ضربانی از طریق گسل اصلی تکاب موجب شده است تا این سیالات پس از ورود در واحدهای سنگ-چینه‌ای پرکامبرین (کنترل‌کننده سنگی) و راه‌یابی به سطح از طریق شکستگی‌های مزدوج (S1 و S2) مرتبط با چین‌خوردگی طاق‌دیس ایمان‌خان (کنترل‌کننده ساختاری)، رخداد کانه‌زایی را فراهم کند.

Fig. 13. The conceptual model from mechanism of lithological-structural controls in development of the Zarshuran gold deposit. Based on, emplacement of buried igneous rocks in the area and subsequently the rise of hydrothermal pulses through the Takab main fault caused these fluids inter the Precambrian strata (lithological controls) and reach the surface through conjugate fractures (S1 and S2) associated with the Iman Khan anticline (structural controls), and provide an mineralization event.

نتیجه‌گیری

کانسار طلای زرشوران در شمال‌باختر ایران و در فاصله ۵۰ کیلومتری شمال‌خاوری شهرستان تکاب واقع شده است. این کانسار که در طاق‌دیس ایمان‌خان و در هم‌تافت تخت‌سلیمان قرار دارد، یکی از مهم‌ترین کانسارهای طلای شمال‌باختر ایران است. طاق‌دیس ایمان‌خان با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری، به‌ترتیب درازا و عرضی حدوداً ۸ و ۲ کیلومتری دارد. یال جنوب‌باختری این طاق‌دیس شیب بیشتری داشته و در قسمت‌های میانی شیب آن به ۵۰ تا ۷۰ درجه می‌رسد. مهم‌ترین واحد سنگی منطقه مورد بررسی، واحدهای پرکامبرین است که از قدیم به جدید شامل سنگ بستر شیست-مرمر (واحد ایمان‌خان)، واحد آهکی متبلور (واحد چالداغ) و شیل سیاه با میان‌لایه‌های آهک و دولومیت (واحد زرشوران) است. واحد زرشوران مهم‌ترین میزبان کانه‌زایی طلا در این کانسار است.

استخراج خطواره‌های ساختاری با روش الگوریتم STA نشان می‌دهد که بیشترین فراوانی روند خطواره‌های منطقه مورد بررسی N20E تا N75E درجه و بیشترین فراوانی روند گسل‌ها N30E تا N85E درجه است. تحلیل‌های فرکتالی خطواره‌ها و گسل‌ها، ارتباط مستقیمی بین کانی‌سازی و زمین‌ساخت را در منطقه مورد بررسی نشان می‌دهد. در قسمت‌هایی که ابعاد فرکتالی گسل‌ها و خطواره‌ها بالاست، مقادیر عیار عنصر طلا نیز بالاست. بنابراین یک ارتباط ساختاری بین تراکم خطواره‌ها و گسل‌های منطقه مورد بررسی با توزیع پراکندگی سطحی عنصر طلا وجود دارد.

گسل تکاب ساختاری مهم در منطقه مورد بررسی است که دارای روند NNW-SSE درجه و طولی حدود ۸۰ کیلومتر

است. حرکت راندگی این گسل باعث شده است که بلوک انگوران در خاور بر روی حوضه تکاب در باختر رانده شود و جهت حرکت این راندگی از سمت خاور به سمت باختر است. به‌نظر می‌رسد که رخداد شکست ورقه باعث شده است که عملکرد حرکتی گسل تکاب از راندگی به معکوس تغییر پیدا کند. این تغییر عملکرد در گسل‌های اصلی شمال‌باختر ایران اتفاق افتاده است. بنابراین برش راست‌الغز و جوان گسل تکاب از میوسن میانی تاکنون باعث تشکیل ساختارهای کششی و فشارشی شده است که طاق‌دیس ایمان‌خان یکی از این ساختارهای چین‌خورده در پهنه برشی است. شکستگی‌های طولی، عرضی و مزدوج فراوانی همراه با ساختارهای چین‌خورده تشکیل می‌شوند که سیالات گرمایی از طریق این شکستگی‌ها به سطح راه پیدا می‌کنند. در طاق‌دیس ایمان‌خان شکستگی‌های طولی با روند شمال‌باختری-جنوب‌خاوری اغلب بیشتر با کانی‌سازی همراه هستند؛ هرچند که در تقاطع شکستگی‌های عرضی، طولی و مزدوج نیز کانی‌سازی تشکیل شده است. شکستگی‌های طولی در منطقه مورد بررسی اغلب هم‌روند با محور طاق‌دیس ایمان‌خان، کنترل‌کننده کانی‌سازی هستند.

قدردانی

نویسندگان از همکاری صمیمانه کارکنان معدن طلای زرشوران، به‌ویژه جناب آقای مهندس عباس اروجی به دلیل راهنمایی‌های مفیدشان تشکر می‌شود. همچنین از داوران محترم نشریه زمین‌شناسی اقتصادی برای ارائه نظرات مفید و سازنده صمیمانه قدردانی می‌شود.

References

Adib, A., Mirzaei, S.I., Shaoei, G. and Afzal, P., 2017. Determination of a Conceptual Model for the Structural Features and Pb-Zn Mineralization in the North of Behabad Fault Zone, Central Iran.

Iranian Journal of Earth Sciences, 9(2): 168–183.
Afzal, P., Dadashzadeh, A.H., Rashidnejad, O.N. and Aliyari, F., 2013. Delineation of gold mineralized zones using concentration-volume fractal model in Qolqoleh gold deposit, NW Iran.

- Ore Geology Reviews, 55(6): 125–133.
- Afzal, P., Fadakar, Y.A., Moarefvand, P., Rashidnejad, O.N. and Asadi, H.H., 2012. Application of power-spectrum-volume fractal method for detecting hypogene, supergene enrichment, leached and barren zones in Kahang Cu porphyry deposit, Central Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 112(1): 131–138.
- Alavi, M., 2004. Regional stratigraphy of the Zagros Fold-Thrust belt of Iran and its proforenead evolution. *American Journal of Science*, 304(1): 1–20.
- Alavi, M. and Amini, M., 1976. Geological Quadrangle map of Iran, 1:250,000 scale, sheet C4 (Takab), Geological Survey of Iran.
- Alipoor, R., Zaré, M. and Ghassemi, M.R., 2012. Inception of activity and slip rate on the Main Recent Fault of Zagros Mountains, Iran. *Geomorphology*, 175–176(22): 86–97.
- Allen, M.B., Kheirkhah, M., Emami, M.H. and Stuart, J.J., 2011. Right-lateral shear across Iran and kinematic change in the Arabia-Eurasia collision zone. *Geophysical Journal International*, 184(2): 555–574.
- Arthur, M.A. and Sageman, B.B., 1994. Marine black shales: Depositional mechanisms and environments of ancient deposits. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences*, 22 (1): 499–551.
- Asadi, H.H., Voncken, J.H.L., Kühnel, R.A. and Hale, M., 2000. Petrography, mineralogy and geochemistry of the Zarshuran Carlin-like gold deposit, northwest Iran. *Mineralium Deposita*, 35(7): 656–671.
- Awdal, A.H., Braathen, A., Wennberg, O.P. and Sherwani, G.H., 2013. The characteristics of fracture networks in the Shiranish formation of the Bina Bawi Anticline; comparison with the Taq Taq field, zagros, Kurdistan, NE Iraq. *Petroleum Geoscience*, 19(2): 139–155.
- Babakhani, A and Ghalamghash, J., 1998. Geological map of Takht-e-Soleyman, scale 1:100,000. Geological Survey of Iran.
- Barbier, M., Hamon, Y., Callot, J., Floquet, M. and Daniel, J., 2012. Sedimentary and diagenetic controls on the multiscale fracturing pattern of a carbonate reservoir: The Madison Formation (Sheep Mountain, Wyoming, USA). *Marine and Petroleum Geology*, 29(1): 50–67.
- Bazdar, H., Fattahi, H. and Ghadimi, F., 2015. Hybrid ANN with Invasive Weed Optimization Algorithm, a New Technique for Prediction of Gold and Silver in Zarshuran Gold Deposit, Iran. *Journal of Tethys*, 3(3): 273–286.
- Berberian, M. and King, G.C.P., 1981. Towards a paleogeography and tectonic evolution of Iran. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 18(2): 210–265.
- Biralvand, M., Mohajjel, M. and Ghassemi, R., 2017. Thick-skinned dextral transpression in Takab complex, NW Iran. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 26(102): 27–38. (in Persian with English abstract)
- Carranza, E.J.M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geology Reviews*, 35(3–4): 383–400.
- Carranza, E.J.M., Wibowo, H., Barritt, S.D. and Sumintadireja, P., 2008. Spatial data analysis and integration for regional-scale geothermal potential mapping, West Java, Indonesia. *Geothermics*, 37(3): 267–299.
- Carlson, C.A., 1991. Spatial distribution of ore deposits. *Geology*, 19(2): 111–114.
- Cheng, Q. and Agterberg, F.P., 1995. Multifractal modeling and spatial point processes. *Mathematical Geology*, 27(7): 831–845.
- Cheng, Q., Agterberg, F.P., Bonham-Carter, G.F., 1996. Fractal pattern integration for mineral potential estimation. *Nonrenewable Resource*, 5 (2): 117–130.
- Cline, J.S., Hofstra, A.H., Muntean, J.L., Tosdal, R.M. and Hickey, K.A., 2005. Carlin-type gold deposits in Nevada: Critical geologic characteristics and viable models. In: J.W. Hedenquist, J.F.H. Thompson, R.J. Goldfarb and J.P. Richards (Editors), *Economic Geology 100th anniversary volume*. Society of Economic Geologist, Littleton, CO, pp. 451–484.
- Corbett, K., Friedman, M. and Spang, J., 1987. Fracture development and mechanical stratigraphy of Austin Chalk, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 71(1): 17–28.
- Cox, S.F., 1999. Deformational controls on the dynamics of fluid flow in mesothermal gold systems. In: K.J.W., McCaffey, L. Lonergan and J.J. Wilkinson, (Editors), *Fractures, fluid flow and mineralization*. Geological Society of

- London Publications, Special Publications 155, London, pp. 123–140.
- Crocket, J.H., 1991. Distribution of gold in the Earth's crust. In: R.P. Foster (Editor), Gold metallogeny and exploration. Springer, Boston, pp. 1–36.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404.
- Faccenna, C., Be llier, O., Mar tinod, J., Piromallo, C. and Regard, V., 2006. Slab detachment beneath eastern Anatolia: a possible cause for the formation of the North Anatolian fault. *Earth and Planetary Science Letters*, 242(1): 85–97.
- Ferrill, D.A. and Morris, A.P., 2008. Fault zone deformation controlled by carbonate mechanical stratigraphy Balcones fault system, Texas. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 92(3): 359–380.
- Fossen, H., 2010. Structural geology. Cambridge University Press, New York, 481 pp.
- Ghorbani, M., 2000. Magmatism and metalogeny of Taka area. Ph.D. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, pp. 224. (in Persian with English abstract)
- Hafkenscheid, E., Wortel, M. and Spakman, W., 2006. Subduction history of the Tethyan region derived from seismic tomography and tectonic reconstructions. *Journal of Geophysical Research*, 111(8): 1–24.
- Hajjialioghli, R. and Moazzen, M., 2013. Precambrian crustal basement rocks in Iran new evidence from the Takht-e-Soleyman metamorphic complex from NW Takab. *Scientific Quarterly Journal, GEOSCIENCES*, 22(88): 197–204. (in Persian with English abstract)
- Hajjialioghli, R., Moazzen, M., Droop, G.T.R., Oberhänsli, R., Bousquet, R., Jahangiri, A. and Ziemann, M., 2007. Serpentine polymorphs and P-T evolution of metaperidotites and serpentinites in the Takab area, NW Iran. *Mineralogical Magazine*, 71(2): 203–222.
- Hanks, C.L., Lorenz, J., Teufel, L. and Krumhardt, A.P., 1997. Lithologic and structural controls on natural fracture distribution and behavior within Lisburne Group, Northeastern Brooks Range and North Slope Subsurface, Alaska. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 81(10): 1700–1720.
- Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M.A. and Beiravand Pour, A., 2013. Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. *Advances in Space Research*, 51(5): 874–890.
- Hobbs, D.W., 1967. The formation of tension joints in sedimentary rocks: an explanation. *Geological Magazine*, 104(6): 550–556.
- Hofstra, A., Emsbo, P., Christiansen, W., Theodorakos, P., Zhang, X.C., Hu, R.Z., Su, W.C. and Fu, S.H., 2005. Source of ore fluids in Carlin-type gold deposits, China: Implications for genetic models. In: J. Mao and F.P. Bierlein (Editors), *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*. Springer, Berlin, pp. 533–536.
- Hosseinjani Zadeh, M. and Honarmand, M., 2018. Remote sensing and Aeromagnetic investigations in porphyry copper deposits for identification of areas with high concentration of gold: a case study from the central part of Dehaj-Sarduiyeh belt, Kerman, Iran. *Journal of Economic Geology*, 10(1): 237–254. (in Persian with English abstract)
- Hugman, R.H.H. and Friedman, M., 1979. Effects of texture and composition on mechanical behavior of experimentally deformed carbonate rocks. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 63(9): 1478–1489.
- Jahangiri, A., 2007. Post-collisional Miocene adakitic volcanism in NW Iran: geochemical and geodynamic implications. *Journal of Asian Earth Sciences*, 30(3): 433–447.
- Jamison, W.R., 1997. Quantitative evaluation of fractures on Monkshood anticline, a detachment fold in the Foothills of Western Canada. *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 81(7): 1110–1132.
- Kashkoei Jahroomi, M. and Qishlaqi, A., 2016. A new approach for hydrothermal alteration mapping by selecting and interpreting principal components in Landsat ETM+ images. *Journal of Economic Geology*, 8(1): 181–199. (in Persian with English abstract)
- Kavoshgaran Consulting Engineers Co., 2013. Prospecting and preliminary exploration in

- near zarshuran gold mine. Ministry of Mines and Metals, Republic Islamic of Iran (unpublished), 500 pp. (in Persian)
- Keskin, M., 2003. Magma generation by slab steepening and break off beneath a subduction accretion complex: an alternative model for collision related volcanism in eastern Anatolia, Turkey. *Geophysical Research Letters*, 30(24): 1–9.
- Kesler, S.E., Riciputi, L.C. and Ye, Z., 2005. Evidence for a magmatic origin for Carlin-type gold deposits: isotopic composition of sulfur in the Betze-Post-Screamer Deposit, Nevada, USA. *Mineralium Deposita*, 40(2): 127–136.
- Ketris, M.P. and Yudovitch, Y.E., 2009. Estimations of Clarkes for Carbonaceous bioliths: World averages for trace element contents in black shales and coals. *International Journal of Coal Geology*, 78(2): 135–148.
- Koike, K., Nagano, S. and Kawaba, K., 1998. Constraction and analysis of interpreted fracture plans through combination of satellite image derived lineaments and digital elevation model date. *Computers & Geosciences*, 24(1): 573–583.
- Large, R.R., Bull, S.W. and Maslennikov, V.V., 2011. A carbonaceous sedimentary source rock model for Carlin-type and orogenic gold deposits. *Economic Geology*, 106(3): 331–358.
- Madrid, R.J. and Garwin, S.L., 2002. Structural methods for targeting gold deposits, northern Carlin trend, Nevada. In: C.P. Swager, B. Stone and S. Reddy (Editors), *Applied Structural Geology for Mineral Exploration and Mining*. Australian Institute of Geoscientists, Kalgoorlie, pp. 118–121.
- Mandelbort, B.B., 1982. *The Fractal Geometry of Nature*. Freeman, New York, 460 pp.
- Masoud, A. and Koike, K., 2006. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 45(4-5): 467–477.
- McLellan, J.G., 2004. Fluid flow in extensional environments; numerical modelling with an application to Hamersley iron ores. *Journal of Structural Geology*, 26(6–7): 1157–1171.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696.
- Mirzaie, A., Shafiei, B.S. and Derakhshani, R., 2015. Fault control on Cu mineralization in the Kerman porphyry copper belt, SE Iran: A fractal analysis. *Ore Geology Reviews*, 71(11): 237–247.
- Muntean, J.L., Cline, J.S., Simon, A.C. and Longo, A.A., 2011. Magmatic-hydrothermal origin of Nevada's Carlin-type gold deposits. *Nature Geoscience*, 4(2): 122–127.
- Muto, J., Nakatani, T., Nishikawa, O. and Nagahama, H., 2015. Fractal particle size distribution of pulverized fault rocks as a function of distance from the fault core. *Geophysical Research Letters*, 42(10): 3811–3819.
- Nadimi, A., 2007. Evolution of the Central Iranian basement. *Gondwana Research*, 12(3): 324–323.
- Nouri, R., Afzal, P., Arian, M., Jafari, M. and Feizi, F., 2013. Reconnaissance of copper and gold mineralization using analytical hierarchy process (AHP) in the Rudbar 1:100,000 map sheet, northwest Iran. *Journal of Mining and Metallurgy, Section A: Mining*, 49(1): 9–19.
- Ojaghi, B., 1996. *Economic Geology and Investigation of the Form of the Zarshuran Gold Deposit (North Takab)*. M.Sc. Thesis, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran, 264 pp. (in Persian with English abstract)
- Oliver, N.H.S., Pearson, P.J., Holcomb, R.J. and Ord, A., 1999. Mary Kathleen metamorphic hydrothermal uranium rare-earth element deposit: ore genesis and numerical model of coupled deformation and fluid flow. *Australian Journal of Earth Sciences*, 46(3): 467–484.
- Omrani, J., Agard, P., Whitechurch, H., Benoit, M., Prouteau, G. and Jolivet, L., 2008. Arc-magmatism and subduction history beneath the Zagros Mountains, Iran: a new report of adakites and geodynamic consequences. *Lithos*, 106(3–4): 380–398.
- Orris, G.J., Dunlap, P. and Wallis, C.J., 2015. *Phosphate Occurrence and Potential in the Region of Afghanistan, Including Parts of China, Iran, Pakistan, Tajikistan, Turkmenistan, and Uzbekistan*. United States Geological Survey, Virginia, 70 pp.
- Ortega, O.J., Gale, J.F.W. and Marrett, R., 2010. Quantifying diagenetic and stratigraphic

- controls on fracture intensity in platform carbonates: an example from the Sierra Madre Oriental, northeast Mexico. *J. Struct. Journal of Structural Geology*, 32(12): 1943–1959.
- Philip, G., 1996. Landsat Thematic Mapper data analysis for Quaternary tectonics in parts of the Doon Valley, NW Himalaya, India. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (1): 143–153.
- Pinar, A., Kuge, K. and Honkura, Y., 2003. Moment tensor inversion of recent small to moderate sized earthquakes: implications for seismic hazard and active tectonics beneath the Sea of Marmara. *Geophysical Journal International*, 153(1): 133–145.
- Pirajno, F., 2009. *Hydrothermal Processes and Mineral Systems*. Springer, Netherlands, 1250 pp.
- Price, N.J., 1966. *Fault and Joint Development in Brittle and Semi-brittle Rocks*. Elsevier, London, 186 pp.
- Rahmati, A., Afzal, P., Abrishamifar, S.A. and Sadeghi, B., 2014. Application of concentration-number and concentration-volume fractal models to delineate mineralized zones in the Sheytoor iron deposit, Central Iran. *Arabian Journal of Geosciences*, 8(5): 2953–2965.
- Raines, G.L., 2008. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? *Natural Resources Research*, 17(2): 87–97.
- Ramezani, J. and Tucker, R.D., 2003. The Saghand region, central Iran: U-Pb geochronology petrogenesis and implications for Gondwana tectonics. *American Journal of Science*, 303(7): 622–665.
- Ramsay, J.G., 1967. *Folding and Fracturing of Rocks*. McGraw-Hill, New York, 568 pp.
- Reich, M., Kesler, S.E., Utsunomiya, S., Palenik, C.S., Chrysosoulis, S.L. and Ewing, R., 2005. Solubility of gold in arsenian pyrite. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 69(11): 2781–2796.
- Robert, F. and Poulsen, K.H., 2001. Vein formation and deformation in greenstone gold deposits. In: J.P. Richards and R.M. Tosdal (Editors), *Structural controls on ore genesis*. Society of Economic Geologists, Denver, pp. 111–155.
- Rowen, L.C. and Bowers, T.L., 1995. Analysis of linear features mapped in Landsat Thematic Mapper and Side-Looking Airborne Radar images of the Reno 10 by 20 Quadrangle, Nevada and California, Implications for mineral resource studies. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 61(6): 749–759.
- Saki, A., 2010. Proto-Tethyan remnants in northwest Iran: Geochemistry of the gneisses and metapelitic rocks. *Gondwana Research*, 17 (4): 704–714.
- Samimi, M., 1992. *Recognisance and preliminary exploration in the Zarshuran*. Kavoshgaran Consulting Engineers Company, Tehran, 220 pp. (in Persian)
- Shafaii Moghadam, H., Li, X.H., Stern, R.J., Ghorbani, G. and Bakhshizad, F., 2015. Zircon U-Pb ages and Hf-O isotopic composition of migmatites from the Zanzan-Takab complex, NW Iran: Constraints on partial melting of metasediments. *Lithos*, 240–243(1): 34–48.
- Sibson, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18(8): 1031–1042.
- Solomon, S. and Ghebreab, G., 2006. Lineament characterization and their tectonic significance using Landsat TM data and field studies in the central highlands of Eritrea. *Journal of African Earth Sciences*, 46(4): 371–378.
- Taylor, S.R. and McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics*, 33(2): 241–265.
- Tripp, G.I. and Vearncombe J.R., 2004. Fault/fracture density and mineralization: a contouring method for targeting in gold exploration. *Journal of Structural Geology*, 26(6–7): 1087–1108.
- Wang, W., Zhao, J., Cheng, Q. and Liu, J. 2012. Tectonic-geochemical exploration modeling for characterizing geo-anomalies in southeastern Yunnan district, China. *Journal of Geochemical Exploration*, 122(9): 71–80.
- Wei, S. and Pengda, Z., 2002. Theoretical study of statistical fractal model with applications to mineral resource prediction. *Computers and Geosciences*, 28(3): 369–376.
- Whitney, D. and Evans, B.W., 2010. Abbreviations for names of rock-forming minerals. *American Mineralogist*, 95(1): 185–187.
- Zhao, J., Chen, S. and Zuo, R., 2015. Identifying geochemical anomalies associated with Au-Cu mineralization using multifractal and artificial neural network models in the Ningqiang district, Shaanxi, China. *Journal of Geochemical*

- Exploration, 164(5): 54–64.
- Zuo, R., Cheng, Q. and Xia, Q., 2009. Application of fractal models to characterization of vertical distribution of geochemical element concentration. Journal of Geochemical Exploration, 102(1): 37–43.



The role of right-lateral shear zone and folding-related fractures in development of Zarshuran gold deposit, Takht-e-Soleyman complex, northern Takab

Reza Alipoor*, Ebrahim Tale Fazel and Mahdi Farhani Moghadam

Department of Geology, Faculty of Basic Sciences, Bu-Ali Sina University, Hamedan, Iran

Submitted: Oct. 02, 2018

Accepted: Mar. 10, 2019

Keywords: *Ore deposit, Anticline, Fractal, Gold, Takab fault, Zarshuran*

Introduction

The Zarshuran gold deposit is located in the Takht-e-Soleyman complex, NW Iran. It is formed in the Iman Khan NW-trending anticline (Mehrabi et al., 1999; Samimi, 1992). The rock units at Zarshuran mainly consist of Precambrian sequence (Iman Khan schist, Chaldaq limestone and Zarshuran black shale) which are overlain by Cambro-Ordovician limestone and Oligo-Miocene formations. Gold mineralization in the Zarshuran area occurs associated with jasperoid alteration within the Zarshuran black shale and Chaldaq carbonate rocks (Bazdar et al., 2015). The deposition and transportation of mineralized fluids from buried igneous rocks, faulting and fractures in basement and covered units, physico-chemical exchange in site of deposition, and hydrothermal alterations are the most important controls on gold mineralization at Zarshuran. There is a structural control on mineralization and ore deposition with respect to the alignment of gold mineralization along the NW- and NE-trending faults at Zarshuran. The mechanism of deformation in the studied area has been controlled by two sets of main fault systems. The early system is the NW-trending steeply-dipping right-lateral strike-slip faults with a reverse component and the late systems are the NE-trending faults that have been displaced by the early system. In this study, the relationship between fractures and structural lineaments with gold mineralization in the Zarshuran gold deposit was studied by remote sensing methods and fractal analysis. Then, development of extension and compressive

structures of the Imam Khan anticline in the right-lateral shear zone and role of fractures related folding in mineralization were investigated. It revealed that the spatial distribution of the fractures systems in folding structures is related to the kinematic evolution and geometry of folding.

Material and methods

Relations between mineralization and fracture systems are interpreted using field observations, extraction of lineaments and fractal analysis in this study. The lineaments map of the study area were extracted using appropriate algorithms of spatial data (STA algorithm), using Landsat 8 satellite (ETM⁺ sensor) images by semi-automatic method. Also, fractal dimensions in six parts of the area were calculated for faults and structural lineaments using the square method, log-log charts and related fractal analysis. A total of 75 samples were collected from trenches and surface outcrops. Then, analysis was performed for measurement of base and precious metal assays by inductively coupled plasma-optical emission spectroscopy (ICP-OES) in the Kanpazhuh laboratory (Tehran, Iran). Geochemical anomalies were reported by field observations and geological maps, and the extension and compressive structures associated to right-lateral shear zones were studied after determining the areas with high fractures density. Then, the relations between mineralization and transverse and longitudinal fractures related to folding in the Iman Khan anticline are investigated and a schematic model

*Corresponding author Email: rezaalipoor116@gmail.com

of the ore formation related to the folded structure are presented.

Results and discussion

The study area is first divided into six parts (a to f) in order to calculate the fractal dimensions of the lineaments and faults. The most frequent trends of the lineaments and faults is at about N20E to N75E and N30E to N85E, respectively. In order to study the relation between fractal dimensions of faults and lineaments with the distribution of gold in study area, the fault and lineament maps are somehow combined with the gold distribution map. In parts of the study area where the fractal dimensions of faults and lineaments show high values, gold concentration is also high. This indicates a structural relationship between the density of lineaments and faults of the study area with distribution of gold mineralization. The most important fault structure affecting the study area is the Takab fault zone with NNW-SSE trend and a length of about 80 km. The Takab fault zone and its related fractures play a major role in transport of hydrothermal fluids, and the biometric data show that these activities have continued from Miocene to date (Mehrabi et al., 1999; Daliran, 2008). The right-lateral strike-slip movement of the Takab fault has led to displacement of the rock units in study area. Also, this right-lateral movements caused formation of fractures with different trends and compressive and extensional structures as folding, reverse faulting and normal fractures. The Iman Khan anticline hosting the Zarshuran gold deposit is one of the main structures related to the Takab fault movement. The fractures related to this

folded structure have played an important role in transporting the hydrothermal fluids. The fracture systems related to the Iman Khan anticline, is generally of longitudinal and transverse type. Therefore, after the slab break-off event and formation of a compressive structure due to the strike-slip movement of the Takab fault, the faults served as pathways to the ore-forming fluids. All evidences shows that the longitudinal fractures have an important role in the mineralization along the Iman Khan anticline, although the thickness of the mineralized zone increases at the intersection of longitudinal and transverse fractures.

References

- Bazdar, H., Fattahi, H. and Ghadimi, F., 2015. Hybrid ANN with Invasive Weed Optimization Algorithm, a New Technique for Prediction of Gold and Silver in Zarshuran Gold Deposit, Iran. *Journal of Tethys*, 3(3): 273–286.
- Daliran, F., 2008. The carbonate rock-hosted epithermal gold deposit of Agdarreh, Takab geothermal field, NW Iran hydrothermal alteration and mineralization. *Mineralium Deposita*, 43(4): 383–404.
- Mehrabi, B., Yardley, B.W.D. and Cann, J.R., 1999. Sediment-hosted disseminated gold mineralization at Zarshuran, NW Iran. *Mineralium Deposita*, 34(7): 673–696.
- Samimi, M., 1992. Recognisance and preliminary exploration in the Zarshuran. Kavoshgaran Consulting Engineers Company, Tehran, 220 pp. (in Persian)