



## تحلیل ساختاری محدوده معدنی مس دوگان، شمال پهنه گسلی تروود (ایران مرکزی)

میثم تدین<sup>۱\*</sup>، رشید کتال<sup>۲</sup>

۱- استادیار گروه تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشگاه اصفهان، خیابان هزارجریب، اصفهان، ایران

۲- کارشناس ارشد معدن، گروه اکتشافات شرکت توسعه منابع انرژی، تهران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۰۷

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۰۸

### چکیده

در شمال شرق ایران محدوده معدنی مس دوگان، در انتهای شمال شرقی کمربند ولکانیکی-ماگمایی پالئوژن تروود-چاه شیرین که میزبان کانسارهای مس زیادی است، به طور گسترده دارای آثار کانه سازی مس اکسیدی (مالاکیت و آزوریت) در سطح است. این منطقه در ۱۸ کیلومتری شمال گسل پی سنگی و فعال چپگرد و معکوس تروود با امتداد شرقی-غربی تا شمال شرقی-جنوب غربی واقع شده است و از نظر تکنیکی بسیار فعال و تحت تاثیر شدید ساختارهای تکنیکی شکنا قرار گرفته است. برداشتهای ساختاری انجام گرفته در منطقه که به بررسی چهارچوب ساختاری حاکم بر منطقه منجر شده است، نشانگر امتدادهای گسلی غالب شرقی-غربی، شمال غربی-جنوب شرقی و شمال شرقی-جنوب غربی است. مطالعات تکنیکی در منطقه منجر به شناسایی پهنه گسلی ۱۵ کیلومتری شرقی-غربی جنوب دوگان با سازوکار امتداد لغز راستگرد و گسل طویل شمال شرقی-جنوب غربی شمال دوگان با سازوکار معکوس شد. آنالیز تنش وارون انجام گرفته روی گسلها نشانگر تنش افقی شمال غربی-جنوب شرقی موجب مسبب گسلش منطقه است. برداشتهای رخنمونهای مس اکسیدی و پهنههای دگرسانی حاصل از سنجش از دور در منطقه نشانگر قرارگیری کانی سازی مس و دگرسانیها در پهنههای گسلی با امتداد شرقی-غربی و در درجه بعدی شمالی-جنوبی تا شمال غربی-جنوب شرقی است. مطالعات انجام پذیرفته به منظور ایجاد ارتباط ساختارهای شکنا و کانی سازی مس اکسیدی منطقه دوگان پیشنهاد می کند که ساختارهای شکنای اصلی، عمیق و متراکم و همچنین محل تلاقی گسلها، محل های کم فشار مستعد برای تمرکز مایعات مس دار و در نتیجه کانی سازی مس اکسیدی هستند.

**واژه های کلیدی:** پهنه گسلی تروود، ایران مرکزی، گسل های میزبان کانه سازی، مس دوگان، تنش وارون

## Structural analysis of the Dogan copper mine area, north Toroud fault zone (Central Iran)

Tadayon .M<sup>1,\*</sup>; Katal .R<sup>2</sup>

1- Assistant professor of tectonics, Department of Geology, Faculty of Science, University of Isfahan, Isfahan, Iran

2- MSc in mining, Power resources development company, Tehran, Iran

### Abstract

Dogan area with surficial Copper-oxide mineralization located at the northeast of Iran, where the northeastern edge of Toroud-Chah Shirin volcano-magmatic belt hosts the numerous Copper-oxide deposits. The Dogan area lies at 18 Km north of the ENE-WSW striking active left-lateral and basement Toroud fault zone in which dominantly deformed by brittle structures. The original field-based structural measurements in the study area that characterized structural anatomy of the Dogan which show the main faults have E-W, NW-SE and NE-SW orientation. We also identified right-lateral E-W striking south Dogan fault zone with longer than 15 km length and NE-SW striking north Dogan reverse fault. Paleo-stress inversion analysis has performed on all the measured faults that yield horizontal NW-SE directed maximum compression direction (sigma 1) for faulting in Dogan area. Furthermore, integration of field-based data and remotely sensed data revealed that Copper-oxide mineralization and associated alterations are tightly aligned along the E-W and rather the N-S to NW-SE fault zones. To identify the role of the faults in Copper-oxide mineralization at Dogan area, our results suggest that major deep faults, dense fracture zones, and fault intersection zones provide weak and low-pressure zones for concentrating the Cu-containing fluids that are high potential places for copper-oxide mineralization.

**Keywords:** Toroud fault zone, Central Iran, copper mineralization hosting fault, Dogan Copper deposit, Paleo-stress



مس است و در انتها به ارائه مدل پیشنهادی پرداخته شده است.

## مواد و روش مطالعه

به منظور بررسی ارتباط بین ساختارهای منطقه معدنی مس دوگان و کانه سازی مس در ابتدا بر بررسی تصاویر ماهواره ای به شناسایی پهنه‌های دگرسانی، گسل‌ها و تأثیر فعالیت گسل‌ها بر جابجایی واحدهای زمین شناسی و آبراهه‌ها و آثار کانه زایی پرداخته شد. سپس رخنمون‌های کانه سازی مس اکسیدی که بر دو دسته فعالیت‌های شدادی و سینه کارهای فعال معدنکاری هستند، با تراکم بالا مورد بررسی‌های میدانی و اندازه‌گیری‌های ساختاری همچون بررسی جنس واحد سنگی در برگیرنده کانه سازی، روابط چینه شناسی آن واحد با واحدهای اطراف، اندازه‌گیری لایه بندی، گسل به همراه سازوکار و خشلغز، شکستگی و رگه به روش قانون دست راست (RHR) انجام گرفت و با جی پی اس ثبت شد. دو مقطع عرضی ساختاری عمود بر ساختارهای حاوی کانه زایی مس اکسیدی از منطقه بر اساس داده‌های برداشت شده صحرائی به منظور بررسی آناتومی و روابط ساختاری منطقه بر روی پروفیل ارتفاعی مستخرج از مدل رقومی ارتفاعی (DEM) با قدرت تفکیک مکانی ۱۲/۵ متر از ماهواره Alos Palsar نیز ترسیم شده است. نمایش داده‌های ساختاری برداشت شده و پردازش برگردان تنش مسبب توسط نرم افزار قدرتمند ساختاری DAISY انجام پذیرفت (Salvini et al., 1999). در انتها با تلفیق داده‌های میدانی و تصاویر ماهواره ای به بررسی ارتباط مکانی و پراکندگی کانه سازی‌های مس با ساختارهای حاکم بر منطقه پرداخته شد.

انواع مختلفی از مدل‌های کانه‌زایی مس با میزبانی سنگ آذرین از جمله تیپ‌های پورفیری، چینه کران، رگه و رگچه ای ارائه شده است که از فراوانترین مدل‌های شناخته شده اند (کریمپور و سعادت، ۱۳۸۱). در شمال شرق ایران در محدوده معدنی مس دوگان در دو کیلومتری شمال شرق محدوده معدنی معروف مس چاه موسی و شمال روستای ترو، شرکت‌های اکتشافی و استخراجی در جستجوی نوع و سیستم کانه زایی و میزان ذخیره آن به منظور سرمایه گذاری و طراحی روش مناسب برای استخراج و استحصال مس هستند. محدوده معدنی مس دوگان که دارای کارهای معدنکاری شدادی قدیمی، دگرسانی، معدن کاری مس و همچنین شواهد سرباره ذوب مس است، بسیار متأثر از گسل‌ها و شکستگی‌های متراکم است و در شمال پهنه گسلی پی سنگی و لرزه زای ترو واقع شده است (خادمی، ۱۳۸۶) (شکل ۱). مطالعات ترکیبی زمین‌ساختی و کانه زایی انجام پذیرفته در محدوده‌های معدنی مختلف دنیا نشانگر نقش موثر گسل‌ها و شکستگی‌ها در پراکندگی و کنترل دگرسانی و کانه زایی‌ها از طریق گذرگاه یا مانع بودن برای عبور سیالات کانی ساز بوده است و در بسیاری از موارد سبب معرفی راهنمای اکتشافی تکنیکی شده است (Li et al, 2019; محمدی و همکاران، ۱۳۹۷; تدین و همکاران، ۱۳۹۴; ناکینی و همکاران، ۱۳۹۴; Berger and Drew, 1997; Tosdal and Richards, 2001; Beygi et al., 2018). در این پژوهش در جستجوی یافتن و ارائه راهکار اکتشافی نظام‌مند مس در این منطقه، به بررسی ارتباط ساختارهای شکنا و کانی سازی مس با استفاده از برداشت‌های تکنیکی فراوان با پراکندگی متوازن در رخنمون‌های کانه سازی مس و آنالیز تصاویر ماهواره ای پرداخته شده است. نتایج حاصل این پژوهش نشانگر ارتباط نزدیک ساختارهای شکنا (گسل‌ها و شکستگی‌ها) با کانه سازی



## جایگاه زمین‌شناسی و سنگ‌چینه‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه ترود در شمال پهنه تکتونیکی ایران مرکزی و در جنوب البرز شرقی قرار گرفته است (آقانباتی، ۱۳۸۳). در پی فرورانش رو به شمال شرق پو سته اقیانوس تیس جوان به زیر پوسته قاره ای ایران مرکزی و فرایند های تکتونیکی پس از آن، فعالیت‌های گسترده آتشفشانی در پس‌بوم (Hinterland) آن به ویژه در ایران مرکزی در بازه زمانی پالئوژن (بیشتر ائوسن تا الیگوسن) رخ داده است که البته به صورت جزئی در دوره زمانی نئوژن و کواترنری نیز ادامه داشته است (Verdel et al., 2011; Berberian and King, 1981; امامی، ۱۳۷۹; Yousefi et al., 2017). این سنگ‌های آذرین به سن پالئوژن در کنار واحدهای رسوبی مزوزوئیک بالایی تا نئوژن از اجزای اصلی تشکیل دهنده بخش شمالی ایران مرکزی هستند که موجب پتانسیل دار شدن این منطقه از دیدگاه مواد معدنی شده است (TaleFazel et al., 2019; Niroomand et al., 2019) (شکل ۱). از سوی دیگر بخش شمالی ایران مرکزی از نظر تکتونیکی حاوی گسل‌های اصلی پی سنگی، طویل و فعال است که خود به عنوان یکی از عوامل کلیدی کنترل کننده در کانه زایی این ناحیه محسوب می‌شود (شکری و همکاران، ۱۳۹۵; Tadayon et TaleFazel et al., 2019; Niroomand et al., 2019 al, 2019). پهنه گسلی فعال ترود با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی با سازوکار غالب امتداد لغز چپگرد و درازای بیش از ۱۰۰ کیلومتر از شمال شرق ترود تا غرب معلمان گسترش یافته است (Shahvar and Zare, 2013 and شکری و همکاران، ۱۳۹۵) و به عنوان گسل اصلی منطقه که به همراه گسل‌های امتداد لغز چپگرد شمال شرقی- جنوب غربی باغو و رشم و گسل شرقی- غربی آس-تانه-امرو کنترل کننده های تکتونیک منطقه ترود-معلمان هستند (شکل ۲-الف). شایان ذکر است که ترود شرقی ترین بخش از کمربند ماگمایی-ولکانیکی

ترود- چاه شیرین به سن ائوسن تا الیگوسن با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی، درازای ۱۰۰ کیلومتر و عرض تقریبی ۱۲ کیلومتر است (Niroomand et al., 2019) (شکل ۱). کمربند ماگمایی-ولکانیکی ترود- چاه شیرین میزبان محدوده‌های معدنی مس، طلا، سرب و روی فعال زیاد و متراکمی همچون چاه موسی، چشمه حافظ، قله سوخته، پیرمردان، گندی، باغو و ابولحسنی است (حقیقی و همکاران، ۱۳۹۲; TaleFazel et al., 2019).

محدوده مطالعاتی معدنی دوگان در ۱۸ کیلومتری شمال-شمال غرب روستای ترود با امتداد کلی شمال شرقی- جنوب غربی از واحدهای آذرین بیرونی متشکل از واحدهای آذرآواری و آندزیت پورفیری تیره تا قهوه ای رنگ پوشیده شده است که توسط واحد گرانودیوریتی روشن مورد نفوذ واقع شده اند (علوی و همکاران، ۱۳۵۵) (شکل ۲-الف). سن این واحدهای آذرین بیرونی به ائوسن بالایی نسبت داده شده است که میزبان کانه سازی مس منطقه دوگان نیز هستند (علوی و همکاران، ۱۳۵۵).

### یافته های تحقیق از منطقه مورد مطالعه

از آنجایی که محدوده مطالعاتی دوگان برای اولین بار از دیدگاه تکتونیکی و اقتصادی در این پژوهش مورد بررسی قرار می‌گیرد، در نتیجه، با بررسی‌های اولیه بر روی تصاویر ماهواره‌ای به شناسایی پهنه‌های گسلی، گسل‌های کوچک و پهنه‌های دگرسانی مبادرت و سپس در مطالعات صحرایی به صحت‌سنجی و برداشت هندسه و سازوکار آنها پرداخته شده است و بر اساس آن داده‌ها دو مقطع عرضی ساختاری عمود بر پهنه‌های گسلی حاوی کانه زایی مس اکسیدی برای بخش جنوب غربی و شمالی دوگان به ترتیب با نام‌های 'aa' و 'bb' ترسیم شده که در ادامه به تفصیل ارائه می‌شود. به منظور ارائه بهتر مطالعات و اندازه‌گیری‌های صحرایی انجام گرفته در منطقه دوگان،



پهنه گسلی که به صورت هاله‌ای دگر سانی (alteration) آرژیلیکی در راستای پهنه گسلی جنوب دوگان مشاهده می‌شود روی تصاویر ماهواره‌ای جابجایی راستگرد ۶۰۰ متری را در واحدهای ائوسن نشان می‌دهد (شکل A۳) از سوی دیگر این بخش از پهنه گسلی جنوب دوگان، سینه کار فعال مس اکسیدی این مجموعه نیز هست که اندازه‌گیری‌های ساختاری روی صفحه‌های گسلی دارای خشلغز نشانگر عرض ۱۳۲ متر، امتداد و شیب N277, 79N و سازوکار امتداد لغز راستگرد به همراه مولفه کوچک شیئی معکوس برای این پهنه گسلی است (شکل B۳ و aa'۵). این پهنه گسلی دارای معماری گلواره مثبت (positive flower structure) است و کانه سازی مس اکسیدی، مالاکیت، آزوریت و مقداری نئوتوسایت، نیز در لزه‌های محدود شده بین صفحات گسلی جای گرفته اند که همگی از امتداد گسل پیروی می‌کنند (شکل‌های ۳-۲ ب و aa'۵). به سمت شمال، گسل F3 با طول تقریبی ۲ کیلومتر، بر روی تصویر ماهواره‌ای شواهد جابجایی ۱۵۰ متری راستگرد را برای یک لایه آذرآواری ائوسن نشان می‌دهد (شکل ۳-الف). اندازه‌گیری‌های صحرائی نشانگر هندسه N101,80SW، عرض ۹ متر و سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد برای گسل F3 است (شکل‌های ۳-ج و ۳-د). کانه زایی مس اکسیدی، غالباً مالاکیت، در این گسل به صورت نوارهایی موازی در بخش‌هایی که تراکم شکستگی و گسل‌ها بیشتر است تشکیل شده است (شکل ۳-ه). کمی به سمت شمال، پهنه گسلی F4 با امتداد شرقی- غربی و عرض ۴٫۵ متر میزبان کانه زایی مس اکسیدی و هاله آرژیلیکی است که کاملاً توسط معدنکاری شدادی استخراج گردیده است (شکل ۳-و). کارهای شدادی همگی به موازات شاخه‌های گسلی و تا عمق ۶ متری انجام پذیرفته است (شکل‌های ۳-و و aa'۵). برداشت‌های ساختاری روی دیواره‌های دارای آئینه و خشلغز گسلی بیانگر امتداد و شیب میانگین N093, 79SW و سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد و مولفه

در اینجا شواهد را در قالب دو بخش جنوبی و شمالی ارائه می‌کنیم (شکل ۲-ب).

میانگین سیزده لایه بندی انجام گرفته از واحدهای آذر آواری و دارای لایه بندی در منطقه نشانگر امتداد کلی شمال شرقی- جنوب غربی N049, 28SE است. در بخش جنوبی منطقه دوگان آثار جابجایی و دگر سانی به صورت پهنه ای خطی با امتداد شرقی- غربی و طول بیش از هجده کیلومتر در تصویر ماهواره ای شناسایی شد (شکل ۲). این پهنه گسلی متشکل از شاخه‌های موازی با امتداد شرقی- غربی هستند و دارای شواهدی برای قطع واحدهای ائوسن تا کواترنری است که آن را پهنه گسلی جنوب دوگان نامگذاری کردیم (شکل ۲-ب). در جنوب غرب محدودده معدنی دوگان، بخش غربی شاخه اصلی این پهنه گسلی سبب انحراف و جابجایی راستگرد مخروط افکنه و آبراهه های آن تا حداکثر مقدار ۶۷۰ متر شده است که این میزان جابجایی در راستای همین گسل برای واحدهای ائوسن نیز ۸۶۰ متر است (شکل‌های ۲-ب و ۳-الف). شاخه‌های جنوبی و شمالی این پهنه گسلی نیز جابجایی‌های راستگرد با مقدار ۱۸۰ متر را از خود ثبت کرده اند (شکل ۲-ب). بررسی‌های میدانی ساختاری در طول شاخه‌های اصلی پهنه گسلی جنوب دوگان که واحدهای ائوسن را بریده‌اند، نشانگر سازوکار غالب امتداد لغز راستگرد است که مویده جابجایی امتداد لغز راستگرد آبراهه‌ها نیز هستند (شکل ۳-الف). در بخش جنوب غربی محدوده معدنی دوگان گسل‌هایی با امتداد کلی شرقی- غربی موازی با پهنه گسلی جنوب دوگان گسترش یافته اند که آثار معدن کاری شدادی (قدیمی) و فعال امروزی در امتداد آنها تمرکز یافته است (شکل ۳-الف). این گسل‌ها از جنوب به شمال با نام های F1 تا F4 مشخص شده‌اند (شکل ۳-الف). پهنه گسلی جنوب دوگان SDFZ با طول حدوداً ۴ کیلومتر در راستای خود سبب جابجایی راستگرد آبراهه‌ها به میزان حداقل ۵۷ متر شده است (شکل ۳-الف). بخش غربی این



میانگین N351, 79NE، طول و عرض ۷۶۰ و ۲ متر دارای سازوکار چپگرد نرمال می‌باشد و در طول خود ساختار گلوواره منفی را ایجاد کرده است (شکل‌های ۴-ه و ۴-و و bb'5). در طول گسل F7 نیز دگرسانی آرژیلیکی و کانه زایی مالاکیت در تراشه‌های (sliver) بین صفحه‌های گسلی متمرکز شده که مورد استخراج کارهای شدادی واقع شده است (شکل‌های ۴-ه و ۴-و). در بخش میانی، پهنه گسل اصلی با امتداد ساختاری شمال شرقی-جنوب غربی با طول بیش از ۵ کیلومتر از شمال شرق تا میانه محدوده گسترش یافته که در اینجا گسل شمال دوگان (NDF) نامگذاری می‌شود و خود به عنوان یک خطواره بسیار واضح و ممتد با طول ۵ کیلومتر در تصویر ماهواره‌ای و توپوگرافی خودنمایی می‌کند (شکل ۴-الف). گسل شمال دوگان با پهنای تقریبی ۱۱ متر و فعالیت معکوس سبب برافراشتن دو رخنمون از توده (های) نفوذی گرانودیوریتی در فرادیواره خود شده است (شکل‌های ۴-الف و ۴-ز و bb'5). برش گسلی عریضی پهنه گسلی شمال دوگان را به ویژه به سمت فرادیواره همراهی می‌کند (شکل ۴-ح). اندازه‌گیری صفحه‌های گسلی مزین شده به خشلغزهای ایجاد شده در طول پهنه گسل شمال دوگان، بیانگر شیب و امتداد N240, 59NW و میانگین ریک ۶۱ است که نشانگر سازوکار مایل لغز معکوس راستگرد است و سبب رانده شدن واحد گرانودیوریتی به روی واحد آندزیتی خاکستری تیره شده است (شکل‌های ۴-ز و ۴-ح). در شمال غرب این محدوده، گسل نرمال شمال غربی-جنوب شرقی F8 به عنوان یک مرز کنترل کننده لیتولوژی و توپوگرافی عمل کرده است، به گونه‌ای که در فرادیواره شمال شرقی آن واحدهای آذرآواری اخرای رنگ و بلوک فرودیواره ای جنوب غربی آن از جنس آندزیت های خاکستری رنگ است و سبب افتادگی ۸,۵ متری فرادیواره نسبت به فرادیواره در طول گسل شده است (شکل ۴-الف و bb'5). در غرب دگرسانی نعلی شکل گسل F9 با امتداد شرقی-غربی که بر روی تصویر

کوچک شیبی معکوس برای این پهنه گسلی با ساختمان گلوواره مثبت است (شکل ۳-ز و '5aa). بخش شرقی پهنه گسل F4 و کانه زایی مس اکسیدی آن به یکباره در محل تقاطع آن با گسل شمال شرقی-جنوب غربی F5 قطع شده است (شکل ۳-الف). گسل F5 بر اساس برداشت‌های زمینی دارای امتداد و شیب N062, 47SE و سازوکار معکوس و همچنین در امتداد آن برش گسلی (fault breccia) تشکیل شده است (شکل ۵'aa).

بخش شمال شرقی محدوده معدنی دوگان که در میانه آن طرحی نعل شکل (U) از دگرسانی آرژیلیکی رخنمون دارد، از نقاط کلیدی و پتانسیل دار مس اکسیدی این محدوده معدنی به شمار می‌رود و نیز شامل کارهای معدنی شدادی و فعال و آثار ذوب مس است (شکل ۴-الف). این بخش همچون بخش جنوبی شدیداً متاثر از فعالیت گسل‌هایی با امتدادهای مختلف است که محل تمرکز یا قطع کننده پهنه‌های دگرسانی و کانه سازی مس نیز هستند (شکل ۴-الف). در این بخش از محدوده دوگان، قطعه‌های گسلی با امتدادهای شمال غربی-جنوب شرقی تا شمالی-جنوبی در جنوب و شمال دگرسانی نعلی شکل قرار گرفته و در امتداد خود کانه زایی مس اکسیدی را میزبانی می‌کنند که به ترتیب با نام‌های F6 و F7 مشخص شده اند (شکل ۴-الف). اندازه‌گیری‌های میدانی از گسل F6 نشان می‌دهد که این گسل دارای امتداد و شیب N133,63SW و عرض هسته گسلی ۱,۵ متر و سازوکار مایل لغز با مولفه غالب شیب لغز نرمال به همراه مولفه کوچکی از امتدادلغز چپگرد است (شکل‌های ۴-ب و ۴-د). فعالیت این گسل سبب فرو افتادگی حدوداً سه متری پهنه گسلی و فرادیواره نسبت به واحدهای سنگی آندزیت پورفیری تیره فرودیواره شده است. کانه سازی مس اکسیدی (غالب مالاکیت و جزئی آزوریت) به صورت متراکم و پرکننده فضای بین صفحه‌های گسل است (شکل ۴-ج). در بخش شمالی دگرسانی آرژیلیکی نعلی شکل، گسل F7 با امتداد و شیب



شمال غربی - جنوب شرقی برای منطقه دوگان است که موازی چین خوردگی های شکل گرفته در واحد های نئوژن جنوب گسل ترود است (شکل ۲-الف). این روند چین خوردگی غالب شمال شرقی - جنوب غربی منطقه گویای تنش بیشینه بعد از میوسن با راستای شمال غربی - جنوب شرقی است.

منطقه دوگان از نظر ساختاری در نیمه جنوبی بیشتر متأثر از ساختارهای شکناهای شرقی - غربی راستگرد قرار گرفته است به گونه ای که جابجایی تقریباً نزدیک به یک کیلومتر را در راستای پهنه گسلی جنوب دوگان شاهد هستیم (شکل ۳-الف). اما در بخش شمالی در کنار گسل های شرقی - غربی، حضور گسل های شمال شرقی - جنوب غربی با سازوکار غالب معکوس رخنمون دارد که سبب بالا آمدن توده های نفوذی گرانیتوئیدی از عمق به سطح در فرادیواره های خود شده اند (شکل ۴-الف). به منظور بدست آوردن راستای تنش (های) مسبب گسل خوردگی های اندازه گیری شده در محدوده معدنی دوگان، با استفاده از نرم افزار DAISY به روش برگردان Rotax (Salvini et al., 1999)، داده های ساختاری جمع آوری شده از تمام منطقه را مورد آنالیز قرار دادیم که نتایج آن در شکل ۶-الف ارائه شده است. نتایج این برگردان تنش نشانگر جهت تنش بیشینه ( $\sigma_1$ ) افقی در راستای شمال غرب - جنوب شرق  $N312$  و  $N131$ ، جهت تنش کمینه ( $\sigma_3$ ) تقریباً افقی در راستای شمال شرق - جنوب غرب ( $N221$ ) و تنش میانگین ( $\sigma_2$ ) تقریباً قائم است (شکل ۶-الف). با توجه به این که پهنه گسلی جنوب دوگان با درازای بیش از ۱۸ کیلومتر طولی ترین و موثرترین ساختار منطقه دوگان است و به عنوان پهنه اصلی جابجایی (PDZ: Principal Displacement Zone) در منطقه، در کنار دیگر گسل هایی که به موازات آن از شمال تا جنوب منطقه گسترش یافته است و از سوی دیگر واقع شدن عمودی جهت گیری تنش میانگین، همگی

ماهواره ای جابجا کننده پهنه گسلی شمال دوگان نیز هست یکی دیگر از میزبان های کانه زایی مس اکسیدی (مالاکیت و آزوریت) و اندکی مس سولفیدی (کالکوسیت) است. بررسی های میدانی در امتداد گسل F9 با ساختمان گلواره مثبت بازگو کننده امتداد و شیب  $N094, 81SW$  و نشانگر سازوکار امتداد لغز راستگرد با مولفه جزئی ۵ درجه ای معکوس است و از سوی دیگر کانه سازی ها همگی در راستای تراشه های موازی این گسل متمرکز شده اند.

## بحث

### تفسیر داده های ساختاری منطقه دوگان

منطقه دوگان پوشیده از واحد های آذرین بیرونی ائوسن با رفتار شکنا است و از همین رو فعالیت های تکتونیکی ائوسن تا به امروز سبب تشکیل گسل ها و شکستگی ها در جهت های مختلف با فراوانی و تراکم بالا در محدوده شده است. به منظور شناسایی ساختارهای اصلی و کنترل کننده کانه زایی، بدست آوردن الگوی تکتونیکی این منطقه و همچنین بررسی احتمالی ارتباط ساختارهای شکنا و کانه زایی مس اکسیدی نتایج مشاهدات صحرایی که در بالا به آنها ارائه شد، در اینجا مورد واکاوی و تفسیر قرار می گیرد.

بروزد واحد های ائوسن منطقه دوگان با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی در بین واحدهای کواترنری نشانگر برخاستگی این منطقه در اثر عملکرد گسل های معکوس با همین امتداد همچون گسل شمال دوگان NDF، گسل F5 و پهنه گسلی چپگرد و معکوس ترود که گسل اصلی منطقه است، می باشد (شکل ۲-الف). این نتایج با مطالعات قبلی انجام شده در منطقه که پهنه گسلی ترود را عامل اصلی دگرریختی منطقه می دانند همراستا است (خادمی، ۱۳۸۶؛ معیری، ۱۳۸۷؛ کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹). امتداد لایه بندی های اندازه گیری شده نیز نشانگر همین روند



با راستای شمال غربی- جنوب شرقی محاسبه شده (از روش آنالیز تنش وارون مسبب گسل خوردگی های منطقه توسط نرم افزار DAISY) هم اکنون نیز بر منطقه حاکم است و با تنش مسبب چین خوردگی واحدهای پی سنگی ائوسن و پوشش (cover) نئوژن منطقه نیز مطابقت دارد.

مطالعات تحلیل جهت تنش مسبب گسلش دیگری نیز در منطقه انجام گرفته که نتیجه حاصل آن بر روی پهنه گسلی ترو نشانگر تنش بیشینه فشارشی افقی با امتداد N۱۹۵ بوده (کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ الف) و برای محدوده های معدنی بخش شمالی ترو - معلمان با جهت تنش بدست آمده در پژوهش پیش رو که افقی و شمال غربی - جنوب شرقی است مطابقت کامل دارد (TaleFazel et al., 2019).

### ارتباط ساختارهای شکنا و پراکندگی مس اکسیدی در منطقه دوگان

در محدوده معدنی دوگان دگرسانی ها و کانه سازی مس اکسیدی در گسل ها و پهنه های گسلی که قطع کننده واحدهای مختلف سنگی (از نظر جنس) هستند گسترش و پراکندگی پیدا کرده اند و همه کانه سازی ها شامل مالاکیت، آزوریت و به صورت جزئی کریزو کولا است (شکل های ۳-ب، ۳-ه، ۴-ج و ۴-و). پراکندگی کانه زایی مس اکسیدی در منطقه دوگان در گسل ها و میزبانی مس اکسیدی توسط واحدهای سنگی با جنس های مختلف از آندزیت اخراپی تا آندزیت پورفیری نشانگر این موضوع است که الف- جنس واحد سنگی میزبان کنترل کننده کانه زایی مس اکسیدی در این محدوده معدنی نباشد. ب- بررسی های مکانی کانه سازی مس اکسیدی در منطقه نشانگر گسترش آن در گسل هایی با امتدادها و ساز و کارهای مختلف است که بیانگر عدم وابستگی این نوع کانه سازی به امتداد و سازو کار خاصی در منطقه دوگان است (شکل های ۳-الف و ۴-الف). ج- بررسی های انجام

بیانگر این موضوع است که رژیم تکتونیکی حاکم بر منطقه رژیم تکتونیکی امتدادلغز است. چنانچه پهنه گسلی جنوب دوگان که تحت تنش بیشینه شمال غربی - جنوب شرقی قرار گرفته و در حال پیاده و منتشر کردن آن تنش در منطقه است را به عنوان پهنه اصلی جابجایی (PDZ) فرض کنیم و دیگر گسل های اندازه گیری شده در منطقه را نسبت به آن ترسیم کنیم، الگوی یک زون گسلی برشی امتدادلغز ساده بدست می آید (Storti et al., 2006) (شکل ۶-ب). به گونه ای که در این مدل ساختاری روابط امتدادی و سازو کار گسل ها نسبت به یکدیگر به شرح زیر است: در درجه اول جهت تنش بیشینه زاویه حدوداً ۴۵ درجه نسبت به پهنه جابجایی اصلی دارد، در درجه دوم گسل های امتدادلغز هم سازو کار با سازو کار PDZ با زاویه حدودی ۱۵ درجه نسبت به PDZ آرایش می یابد (R: Riedel shears)، سپس گسل های امتداد لغز با سازو کار مخالف با سازو کار PDZ با زاویه حدودی ۷۵ درجه نسبت به PDZ قرار می گیرند (Anti-Riedel shears) و در انتها گسل های معکوس (C: Contraction) و نرمال (T: Tension) عمود بر یکدیگر و با زاویه ۴۵ درجه نسبت به PDZ آرایش می یابند (شکل ۶-ب). شایان ذکر است که در مدل ساختاری ایده آل برشی امتدادلغز ساده، گسل های مزدوج امتداد لغز همسو (R) و غیر همسو (R') با زاویه ۶۰ درجه نسبت به یکدیگر قرار می گیرند و منصف زاویه حاده آنها گسل های نرمالی خواهند بود که به موازی راستای تنش بیشینه آرایش یافته اند (شکل ۶-ب). آرایش امتدادی گسل های منطقه نشانگر انطباق خوب آنها با مدل ساختاری برشی امتدادلغز ساده راستگرد برای منطقه دوگان است (شکل ۶-ب).

پیرو مطالب ارائه شده در بالا و نظر به اینکه پهنه گسلی راستگرد جنوب دوگان و گسل های موازی آن، قطع کننده واحد های ائوسن و کواترنری با سازو کار یکسان امتدادلغز راستگرد است می توان اینگونه نتیجه گرفت که تنش بیشینه





مس اکسیدی است و در درجه بعدی گسل های شرقی - غربی از نظر کانه سازی مس اکسیدی مستعدتر از دیگر امتدادهای گسلی در منطقه دوگان هستند.

مطالعات کانه زایی ساختاری انجام گرفته بر روی محدوده های معدنی مس نزد یک به محدوده معدنی دوگان، همچون محدوده های چاه موسی و قله کفتران که در جنوب محدوده مورد مطالعه قرار گرفته اند، نشانگر سیستم کانی زایی رگه و رگچه ای مس اکسیدی است که در شکستگی ها و گسل هایی با امتدادهای N040E تا N070E متمرکز شده اند (امام جمعه و همکاران، ۱۳۸۷؛ کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ ب). دیگر مطالعات انجام شده در محدوده معدنی مس که همگی در شمال پهنه گسلی ترود - معلمان و جنوب غربی محدوده دوگان گسترش یافته اند به ترتیب از شرق به غرب نشانگر آن است که محدوده معدنی مس چشمه حافظ کانه زایی مس اکسیدی آن توسط گسل ها و شکستگی ها کنترل و در امتداد گسل های شمالی - جنوبی تا شمال شرقی - جنوب غربی متمرکز شده است (کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ ب)، محدوده معدنی مس پیرمردان دارای کانه زایی مس اکسیدی به صورت رگه و رگچه ای است که در امتداد شکستگی های غالباً شرقی - غربی تا متمایل به شمال غرب متمرکز پیدا کرده است (ابراهیمی، ۱۳۹۸) و در نهایت کانه زایی مس اکسیدی در محدوده معدنی گندی در امتداد گسل ها و شکستگی های شمال شرقی - جنوب غربی گسترش یافته است (کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ ب)؛ (TaleFazel et al., 2019). موضوع مهم دارا بودن امتداد کانه زایی مس اکسیدی در محدوده های معدنی نامبرده شده خود گویای ارتباط تنگاتنگ بین ساختارهای شکنا و کانه زایی مس اکسیدی در این پهنه وسیع پر پتانسیل معدنی است. در نتیجه این همانندی ارتباط بین ساختارهای شکنا و کانه زایی مس اکسیدی را می توان به عنوان یک راهنمای اکتشافی و به عنوان محل های مستعد کانه زایی

گرفته به منظور یافتن ارتباط منطقی بین ساختار و کانه سازی در محدوده معدنی دوگان نشان می دهد که از میان بیست و یک نقطه شناخته شده حاوی کانه سازی مس اکسیدی (دو نقطه فعال معدن کاری و یک نقطه معدنکاری شدادی) محل تمرکز کانه سازی مس اکسیدی در محل تلاقی دو امتداد گسلی شرقی - غربی و شمال شرقی - جنوب غربی قرار گرفته است (شکل های ۳-الف و ۴-الف). در بخش جنوب غربی منطقه دوگان، این نقاط محل تلاقی گسل معکوس F5 با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی با پهنه گسلی شرقی - غربی جنوب دوگان در جنوب و گسل راستگرد و شرقی - غربی F4 در شمال آن است (شکل ۳-الف). در بخش شمالی محدوده دوگان، این نقطه تمرکز مس اکسیدی محل تلاقی گسل معکوس شمال دوگان با امتداد شمال شرقی - جنوب غربی با گسل راستگرد شرقی - غربی F9 است (شکل ۴-الف). نقطه های اشتراک این محل های قطع شدگی حاوی مس اکسیدی در زاویه تقریبی ۴۵ درجه یکسان در محل تلاقی این گسل هایی است که شرایط یکسانی از نظر امتدادی و سازوکاری نیز دارند (شکل ۶-ب) و در آخر این موضوع حائز اهمیت است که در این سه نقطه همه کانه سازی در راستای گسل های شرقی - غربی متمرکز شده است.

با توجه به عدم وجود اطلاعات مطالعات عمقی در این محدوده معدنی، که به تازگی در حال انجام پذیرفتن است، بر اساس نتایج مطالعات سطحی ارائه شده در این پژوهش اینگونه می توان پیشنهاد کرد که از عوامل احتمالی کنترل کننده گسترش مکانی کانه سازی مس اکسیدی پهنه های اصلی گسلی، فارغ از امتداد و سازوکار آن، دارا بودن آلتراسیون، عمیق و عریض بودن آن است که فضا و شرایط لازم و کافی را برای ایجاد مس اکسیدی فراهم آورده است. این موضوع نیز شایان ذکر است که در درجه اول محل تلاقی پهنه های گسلی، به موازات درجه اولویت پهنه های گسلی اصلی، از مستعدترین مکان های کانه سازی



مدل دوم: در این مدل، شکستگی‌ها و گسل‌های مترکم سبب شده اند فضاهای خالی ایجاد شوند تا کاتیون‌های پراکنده مس که در بطن توالی واحدهای ولکانیکی سطحی وجود دارند به مرور زمان توسط انحلال سیالات جوی شسته شده و در فضای کم فشار شکستگی‌ها و گسل‌ها (در حضور کرنات‌های سطحی در دسترس) در غالب کانه زایی مس اکسیدی تشکیل شوند (شکل ۷-ب) (Wiprut and Zoback, 2000; Rossetti et al., 2011).

مس اکسیدی در محدوده دوگان و معادن مس اطراف معرفی کرد و به رسمیت شمرد. به صورت خلاصه می‌توان بیان کرد که امتدادهای گسلی اصلی دارای کانه سازی مس در منطقه تروود- چاه شیرین به ترتیب فراوانی عبارتند از شرقی- غربی، شمال شرقی- جنوب غربی و در درجه بعدی شمالی- جنوبی تا شمال غربی- جنوب شرقی است. در اصل امتداد های شمال شرقی- جنوب غربی همراستای امتداد اصلی گسل‌های پی سنگی و ساختارهای منطقه همچون گسل تروود در جنوب و گسل‌های انجیلو و باغو در شمال است (شکل ۲-الف) از سوی دیگر گسل‌های شرقی- غربی همچون گسل‌های جنوب دوگان و آستانه- امرو هستند که در امتداد پهنه‌های خود میزبانی کانسارهای مس را به عهده دارند.

بر اساس نتایج حاصل از مطالعات صحرائی انجام گرفته و بررسی مدل‌های ارائه شده برای محدوده‌های مشابه در دیگر محدوده‌های معدنی مس دنیا، در اینجا به ارائه دو مدل احتمالی در مورد نقش و چگونگی ارتباط ساختارهای شکنا و کانی سازی مس اکسیدی در محدوده معدنی دوگان می‌پردازیم.

مدل اول: شکستگی‌ها و گسل‌های مترکم سطحی که در عمق به گسل‌های اصلی و ریشه دار (پی سنگی) متصل هستند فضاهای خالی و کم فشار مناسبی را برای صعود کانه سازی مس سولفیدی عمقی مرتبط به توده پورفیری حاوی کاتیون‌های مس توسط حرکات موئینه رو به بالای سیالات غنی از کاتیون‌ها فراهم آورده اند (Sibson, 1996; Chi and Xue, 2011) (شکل ۷-الف). در این مدل، کانه زایی در بالاتر از سطح آب زیر زمینی از نوع مس اکسیدی در گسل‌ها و شکستگی‌ها و معمولاً در عمق (پائین تر از سطح آب زیر زمینی منطقه) کانه‌زایی مس سولفیدی مشاهده می‌شود (Li et al., 2019; Tosdal and Richards, 2001).



## نتیجه گیری

نتایج حاصل از این پژوهش به صورت خلاصه در زیر ارائه شده است.

۱- مطالعات تکتونیکی در منطقه دوگان در شمال گسل ترود منجر به شناسایی و معرفی پهنه گسلی ۱۸ کیلومتری فعال جنوب دوگان با امتداد شرقی- غربی و سازوکار امتداد لغز راستگرد و همچنین گسل طویل شمال شرقی- جنوب غربی شمال دوگان با سازوکار معکوس شد.

۲- نتایج برگردان تنش مسبب گسل ها و چین خوردگی های اندازه گیری شده در منطقه نشانگر جهت تنش بیشینه افقی در راستای شمال غرب- جنوب شرق (N131)، تنش میانگین تقریبا قائم و جهت تنش کمینه تقریبا افقی در راستای شمال شرق- جنوب غرب (N221) است.

۳- چیدمان گسل های منطقه نشانگر انطباق خوب آنها با مدل ساختاری برشی امتداد لغز ساده راستگرد برای منطقه دوگان است.

۴- محل تقاطع سیستم های گسله با امتداد های شرقی- غربی و شمال شرقی- جنوب غربی که کم فشارترین مناطق هستند، به عنوان بهترین محل های مساعد برای تجمع کانه سازی مس های اکسیدی است که باید در اولویت اکتشافی در محدوده دوگان قرار بگیرد.

۵- برای طول پهنه پتانسیل دار معدنی ترود-چاه شیرین در شمال پهنه گسل ترود- معلمان، در امتداد پهنه ها و سیستم های گسلی اصلی و تقاطع آنها مناطق پرتانسسیل برای اکتشافات فلزی معرفی می شوند.



## قردانی

این مقاله بخشی از نتایج پروژه مشترک دانشگاه اصفهان و گروه اکتشافات شرکت توسعه منابع انرژی است، لذا از دانشگاه اصفهان جهت حمایت های به عمل آمده سپاسگزاری می شود. از گروه اکتشافات شرکت توسعه منابع انرژی که تمامی شرایط دسترسی به رخنمون های معدنی و بازدیدهای زمین شناسی را میسر و از نظر لوژستیک پوشش دادند تشکر ویژه می شود. از مسئولان مجموعه معدنی دوگان که با کمال محبت شرایط را جهت انجام این پژوهش تسهیل کردند کمال سپاس را داریم.

## منابع

ابراهیمی، س.، ۱۳۹۸. ویژگی های کانی سازی و سیالات درگیر ذخیره مس چینه کران (نوع مانتو) پیرمردان، جنوب غرب شاهرود، مجله زمین شناسی اقتصادی، شماره ۳، صفحه ۴۵۷ تا ۴۷۱.

امام جمعه، ا.، راستا، ابراهیم، بوذری، ف.، رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۸۷. معرفی سامانه واحد کانه زایی افشان - رگچه ای و رگه ای مس (سرب، روی) در محدوده معدنی چاه موسی - قله کفتران، بخش خاوری کمان ماگمایی تروود - چاه شیرین، فصل نامه علوم زمین، شماره ۷۰، صفحه ۱۱۲ تا ۱۲۵.

امامی، م. ه. ۱۳۷۹. ماگماتیسزم در ایران، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

تدین، م.، ناکینی، ع.، محجل.، رشیدنژاد عمران، ن.، ۱۳۹۴. تحلیل ساختاری و نقش آن در جایگاه ماده معدنی در معادن فلئوریت مازندران، مطالعه موردی: معادن کمرپشت و شش رودبار، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۶، صفحه ۱۲ تا ۲۲.

حقیقی، ا.، علیرضایی، س.، اشرف پور، ا.، ۱۳۹۲. کانه زایی، دگرسانی و ویژگی های سیال کانه زا در کانسار فلزات پایه و گرانبهای چشمه حافظ، رشته کوه تروود - چاه شیرین، شمال ایران مرکزی، فصلنامه علوم زمین، شماره ۸۸، صفحه ۹۹ تا ۱۱۰.

خادمی، م.، ۱۳۸۶. ویژگی های ساختاری و وضعیت زمین ساختی منطقه تروود، جنوب دامغان، رساله دکتری تکنیک، دانشگاه شهید بهشتی.

شکری، م. ع.، فروتن، م.، نعمت، م.، بلورچی، م. ج.، جوادی پور، ش.، اویسی، ب.، ۱۳۹۵. بررسی ویژگی های زمین شناختی و لرزه ای رخداد زمین لرزه ۵ شهریور ماه ۱۳۸۹ خورشیدی توچاهی (جنوب دامغان) با بزرگای ۵٫۹، فصل نامه علوم زمین، شماره ۹۵، صفحه ۲۸۱ تا ۲۹۲.

علوی، م.، هوشمندزاده، ع.، اطمینان، ه.، حقی پور، ا.، ۱۳۵۵. نقشه زمین شناسی تروود ۱:۲۵۰۰۰۰، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کریمپور، م. ح.، سعادت، س.، ۱۳۸۱. زمین شناسی اقتصادی کاربردی، انتشارات ارسلان.

کی نژاد، آ.، پور کرمانی، م.، آزرین، م.، سعیدی، ع.، لطفی، م.، ۱۳۸۹ الف. بررسی شکستگی های شمال منطقه تروود - معلمان (ایران مرکزی - جنوب خاور دامغان) و ارتباط آن با کانی زایی منطقه، فصل نامه زمین، شماره ۲، صفحه ۸۱ تا ۹۷.

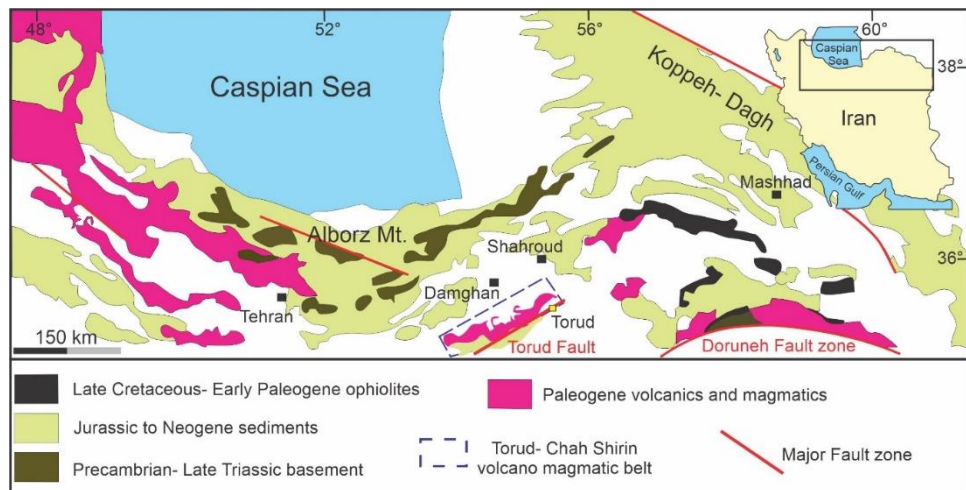
کی نژاد، آ.، پور کرمانی، م.، آزرین، م.، سعیدی، ع.، لطفی، م.، ۱۳۸۹ ب. تحلیل دینامیکی شکستگی های شمال منطقه تروود - معلمان (ایران مرکزی، جنوب خاور دامغان)، فصل نامه علوم زمین، شماره ۷۸، صفحه ۳ تا ۱۶.

محمدی، س.، ندیمی، ع.، اعلمی نیا، ز.، ۱۳۹۷. بررسی ارتباط کانی سازی و پهنه های دگرسانی با ساختارهای زمین ساختی با کمک مطالعات دور سنجی در جنوب منطقه اردستان (شمال شرق اصفهان)، فصلنامه زمین ساخت، شماره ۷، صفحه ۲۹ تا ۴۹.

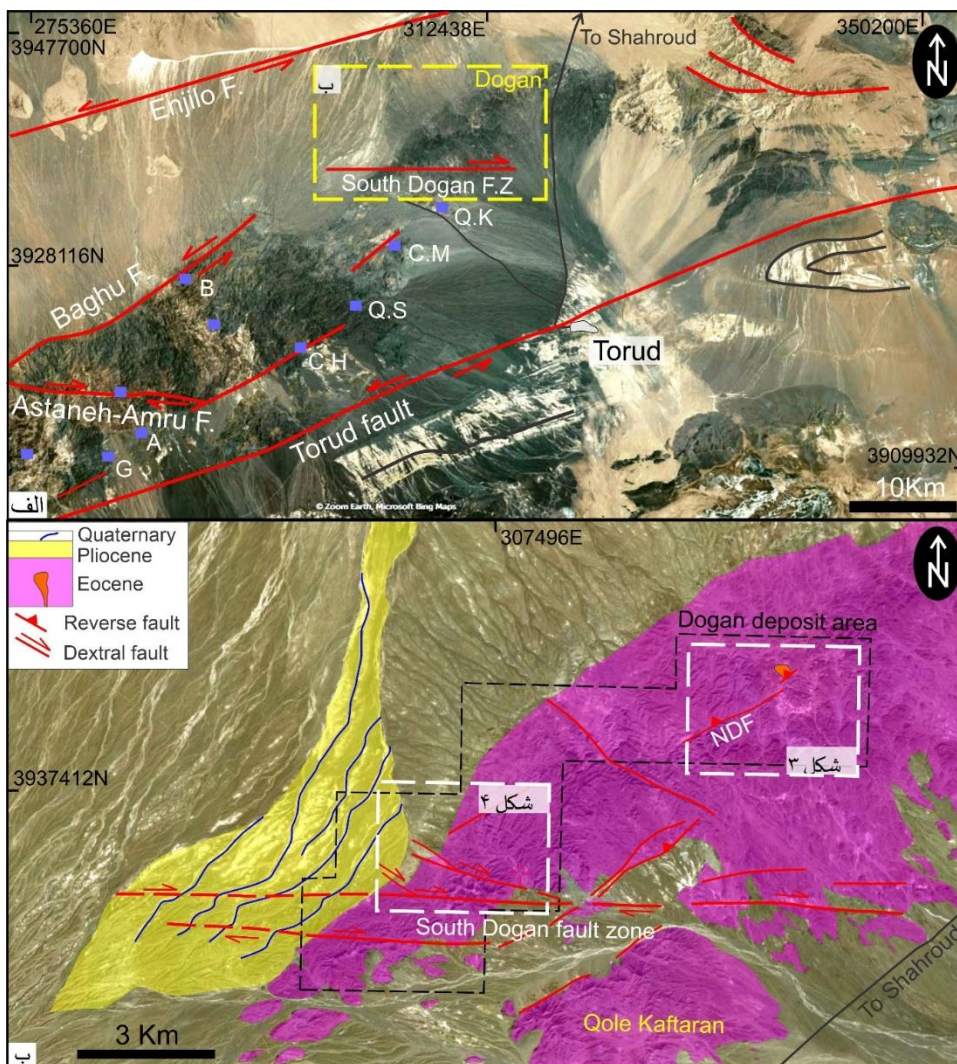


- Salvini, F., Billi, A. and Wise, D.U., 1999. Strike-slip fault-propagation cleavage in carbonate rocks: the Mattinata Fault Zone, Southern Apennines, Italy. *Journal of Structural Geology*, 21(12), 1731-1749.
- Shahvar, M.P. and Zaré, M., 2013. The 27 August 2010 Mw 5.7 Kuh-Zar earthquake (Iran): field investigation and strong-motion evidence. *Natural hazards*, 66(2), 689-706.
- Sibson, R.H., 1996. Structural permeability of fluid-driven fault-fracture meshes. *Journal of Structural Geology*, 18(8), 1031-1042.
- Storti, F., Rossetti, F., Läufer, A.L. and Salvini, F., 2006. Consistent kinematic architecture in the damage zones of intraplate strike-slip fault systems in North Victoria Land, Antarctica and implications for fault zone evolution. *Journal of Structural Geology*, 28(1), 50-63.
- Tadayon, M., Rossetti, F., Zattin, M., Calzolari, G., Nozaem, R., Salvini, F., Faccenna, C. and Khodabakhshi, P., 2019. The long-term evolution of the Doruneh Fault region (Central Iran): A key to understanding the spatio-temporal tectonic evolution in the hinterland of the Zagros convergence zone. *Geological Journal*, 54(3), 1454-1479.
- TaleFazel, E., Mehrabi, B. and GhasemiSiani, M., 2019. Epithermal systems of the Torud-Chah Shirin district, northern Iran: Ore-fluid evolution and geodynamic setting. *Ore Geology Reviews*, 109, 253-275.
- Tosdal, R. M. and Richards, J. P., 2001. Magmatic and structural controls on the development of porphyry Cu+ Mo+ Au deposits in Richards, J.P., and Tosdal, R.M., eds., *Structural controls on ore genesis: Reviews in Economic Geology*, 14, 157-181.
- Verdel, C., Wernicke, B.P., Hassanzadeh, J. and Guest, B., 2011. A Paleogene extensional arc flare-up in Iran. *Tectonics*, 30(3), 1-20.
- Wiprut, D. and Zoback, M.D., 2000. Fault reactivation and fluid flow along a previously dormant normal fault in the northern North Sea. *Geology*, 28(7), 595-598.
- Yousefi, F., Sadeghian, M., Wanhainen, C., Ghasemi, H., Lambrini, P., Bark, G., Rezaei-Meeri, M., موسوی، س. ح.، ۱۳۸۷. بررسی و تحلیل آثار ژئومورفولوژی گسل ترود، مجله مطالعات برنامه ریزی سکونتگاههای انسانی، شماره ۷، صفحه ۱۵۹ تا ۱۷۶.
- ناکینی، ع.، محجل، م.، تدین، م.، ۱۳۹۴. ارتباط کانه زایی سرب و روی با ساختار گسلش در معدن دره زنجیر، جنوب باختر یزد، مجله زمین شناسی کاربردی پیشرفته، شماره ۱۶، صفحه ۱۳ تا ۲۳.
- 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.
- Berger, B.R., and Drew, L.J., 1997. Role of strike-slip duplexes in localization of volcanoes, related intrusions, and epizonal ore deposits [abs.]. In *Geological Society of America Abstracts* 29(6), 359-360.
- Beygi, S., Talovina, I., Tadayon, M. and Nadimi, A., 2018. Tectonics and mineralization in the Urumieh-Dokhtar magmatic arc of Iran. In *Topical Issues of Rational Use of Natural Resources: Proceedings of the International Forum-Contest of Young Researchers*, Taylor and Francis Group Press, 9-16.
- Chi, G. and Xue, C., 2011. An overview of hydrodynamic studies of mineralization. *Geoscience frontiers*, 2(3), pp.423-438.
- Li, S., Zhang, X. and Gao, L., 2019. Ore Genesis at the Jinchang Gold-Copper Deposit in Heilongjiang Province, Northeastern China: Evidence from Geology, Fluid Inclusions, and H-O-S Isotopes. *Minerals*, 9(2), 1-23.
- Niroomand, S., Lentz, D.R., Sepidbar, F., Tajeddin, H.A., Hassanzadeh, J. and Mirnejad, H., 2020. Geochemical characteristics of igneous rocks associated with Baghu gold deposit in the Neotethyan Torud-Chah Shirin segment, Northern Iran. *Geological Journal*, 55(1), 299-316.
- Rossetti, F., Aldega, L., Tecce, F., Balsamo, F., Billi, A. and Brilli, M., 2011. Fluid flow within the damage zone of the Boccheggiano extensional fault (Larderello-Travale geothermal field, central Italy): structures, alteration and implications for hydrothermal mineralization in extensional settings. *Geological Magazine*, 148(4), 558-579.

Kahkhaei, M. and Koroneos, A., 2017. Mineral chemistry and PT conditions of the adakitic rocks from Torud–Ahmad Abad magmatic belt, S-SE Shahrood, NE Iran. *Journal of Geochemical Exploration*, 182, 110-120.

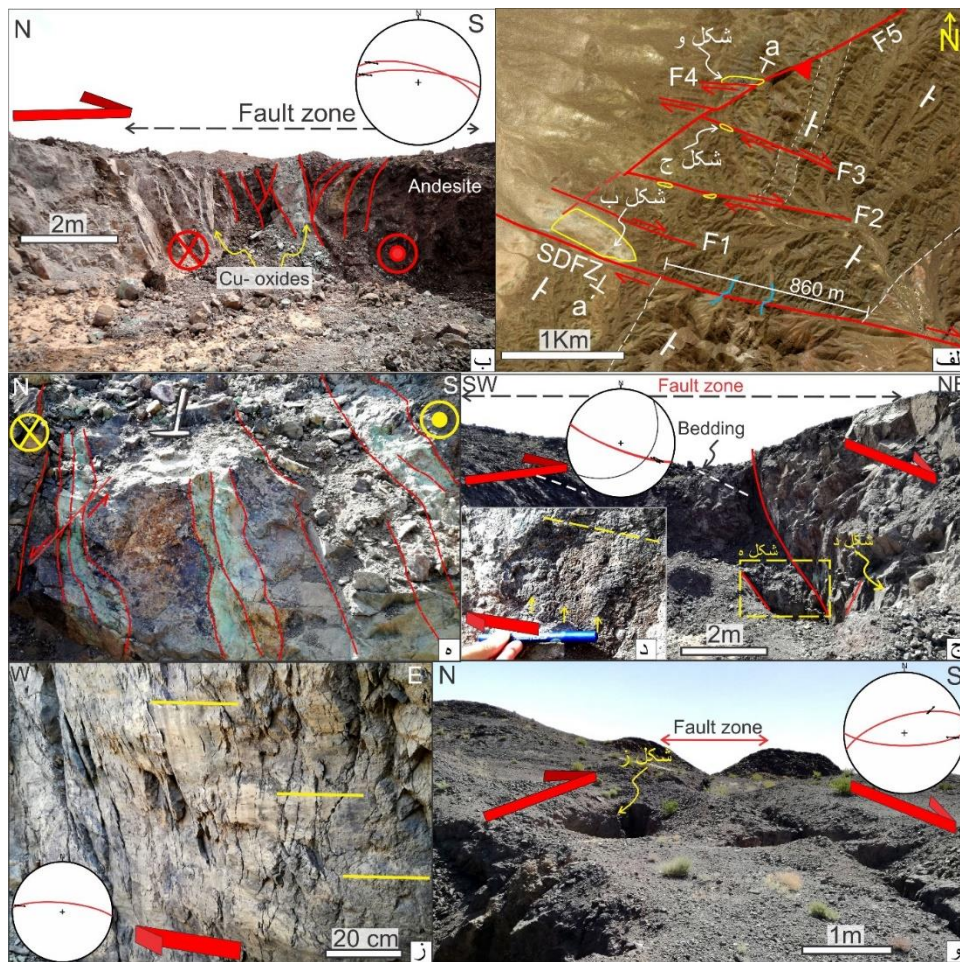


شکل ۱: نمایش موقعیت ترود و غسل ترود در شرق کمان ماگمایی- ولکانیکی ترود- چاه شیرین با سن پالئوژن در نقشه زمین شناسی محدوده شمالی ایران (اصلاح شده از (Niroomand et al, 2019)).

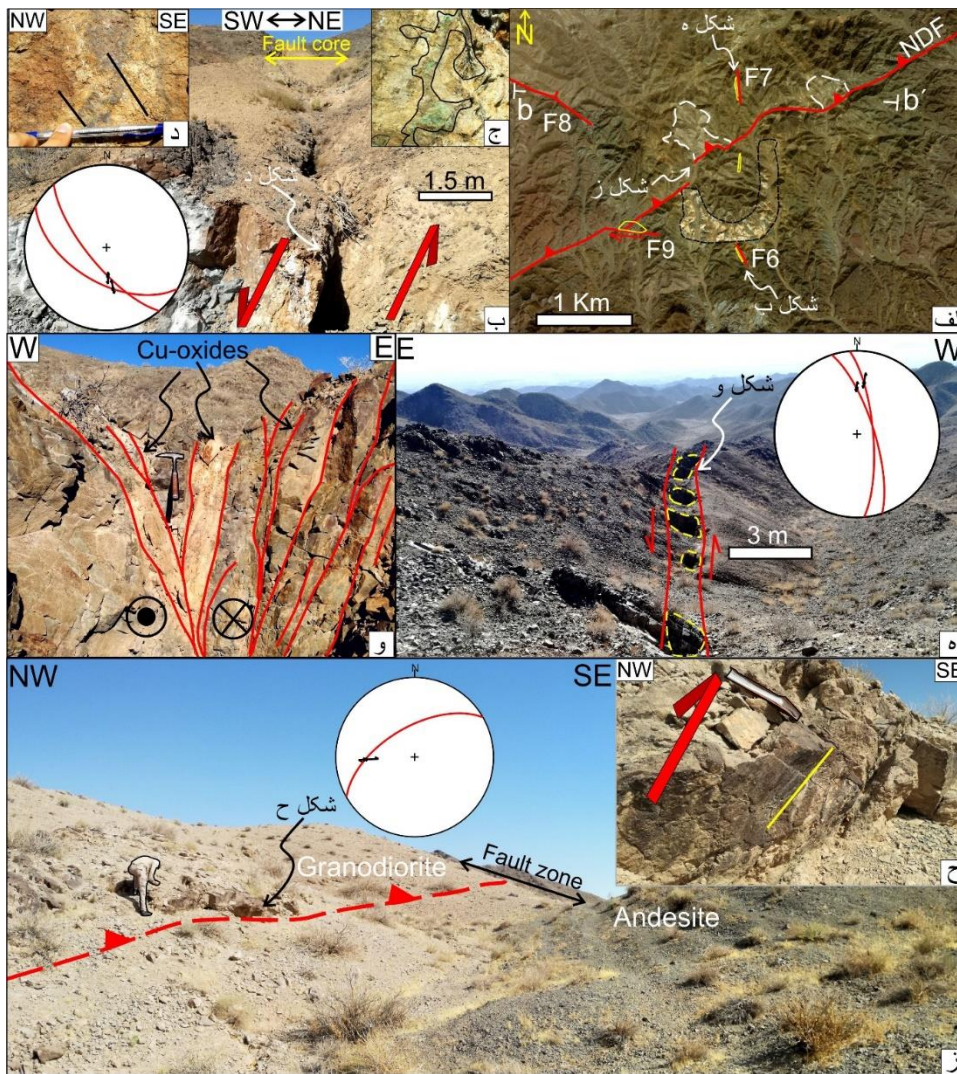


شکل ۲: الف تصویر ماهواره‌ای منطقه در شمال ترود به همراه گسل‌ها و چین خوردگی‌های اصلی و موقعیت محدوده مورد مطالعه با کادر زرد رنگ منقطع مشخص شده. همچنین کانسارهای مس فعال در شمال پهنه گسلی ترود در طول کمربند ترود-چاه شیرین با مربع‌های آبی مشخص شده است که به ترتیب فاصله از معدن دوگان عبارتند از: Q.K: قله کفتران، C.M: چاه موسی، Q.S: قله سوخته، C.H: چاه حافظ، A: ابوالحسنی، G: گندی، B: باغو، ب- ستون سنگ چینه‌ای منطقه (گوشه بالا سمت چپ)، محدوده معدنی دوگان (کادر سیاه منقطع) به همراه گسل‌های اصلی و سازوکار آنها (خطوط قرمز رنگ) بر روی تصویر ماهواره‌ای نمایش داده شده است (علوی و همکاران، ۱۳۵۵). چند ضلعی منقطع سیاه رنگ مشخص کننده محدوده معدنی دوگان است. موقعیت شکل‌ها ۳ و ۴ با کادرهای منقطع سفید رنگ مشخص شده است.

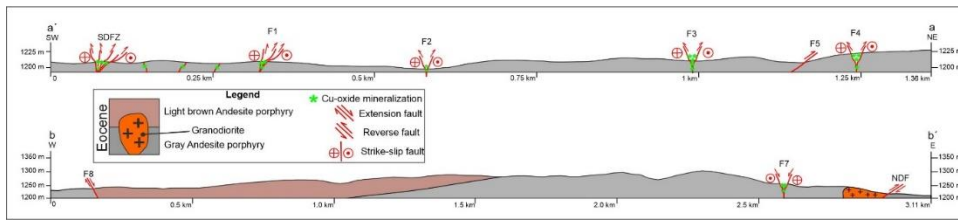




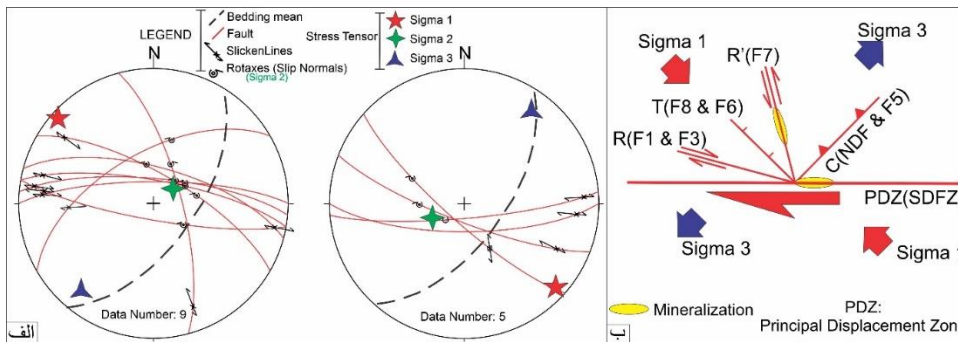
شکل ۳: الف تصویر ماهواره ای از بخش جنوب-جنوب غربی محدوده معدنی دوگان به همراه گسل های اصلی و مناطق دارای کانه سازی مس اکسیدی که با هاله های زرد رنگ نشان داده شده است. SDFZ پهنه گسلی جنوب دوگان که جابجایی راستگرد ۸۶۰ متری را بر اساس جابجایی واحد اذر آوری ائوسن در طول خود نشان می دهد. روی تصویر ماهواره ای موقعیت شکل های دیگر نیز با پیکان های سفید نشان داده شده است. ب- نمایی از سینه کار فعال استخراجی در بخش انتهایی غربی پهنه گسلی جنوب دوگان با سازوکار امتدادلغز راستگرد به همراه استریوگرام گسل های اصلی که حاوی مالاکیت و آزوریت و مقادیر جزئی پیرولوسیت است که در ساختار گلواره مثبت محدود شده اند. ج- نمایی نزدیک از بخش انتهایی غربی گسل F3 با سازوکار امتدادلغز راستگرد در واحدهای آندزیت خاکستری تیره حاوی کانه زایی مس اکسیدی به همراه استریوگرام لایه بندی و گسل اصلی. د- نمایی نزدیک از صفحه گسلی F3 به همراه خشلغزهای تقریباً افقی آن (خط منقطع زرد رنگ). ه- کانه سازی مس اکسیدی (مالاکیت و مقداری آزوریت) به صورت نواری که در پهنه های گسلی امتدادلغز راستگرد از گسل F3 به صورت متوالی تشکیل شده اند. و- پهنه گسلی شرقی-غربی F4 با سازوکار امتدادلغز را ستگرد و آثار حفاری های شدادی در امتداد صفحه های گسلی به همراه استریوگرام آنها. ز- نمایی نزدیک از صفحه آینه ای گسل F4 به همراه خشلغزهای افقی (خطوط زرد رنگ) و شکستگی های ریدل (R: Riedel shears) روی صفحه گسل و استریوگرام آن.



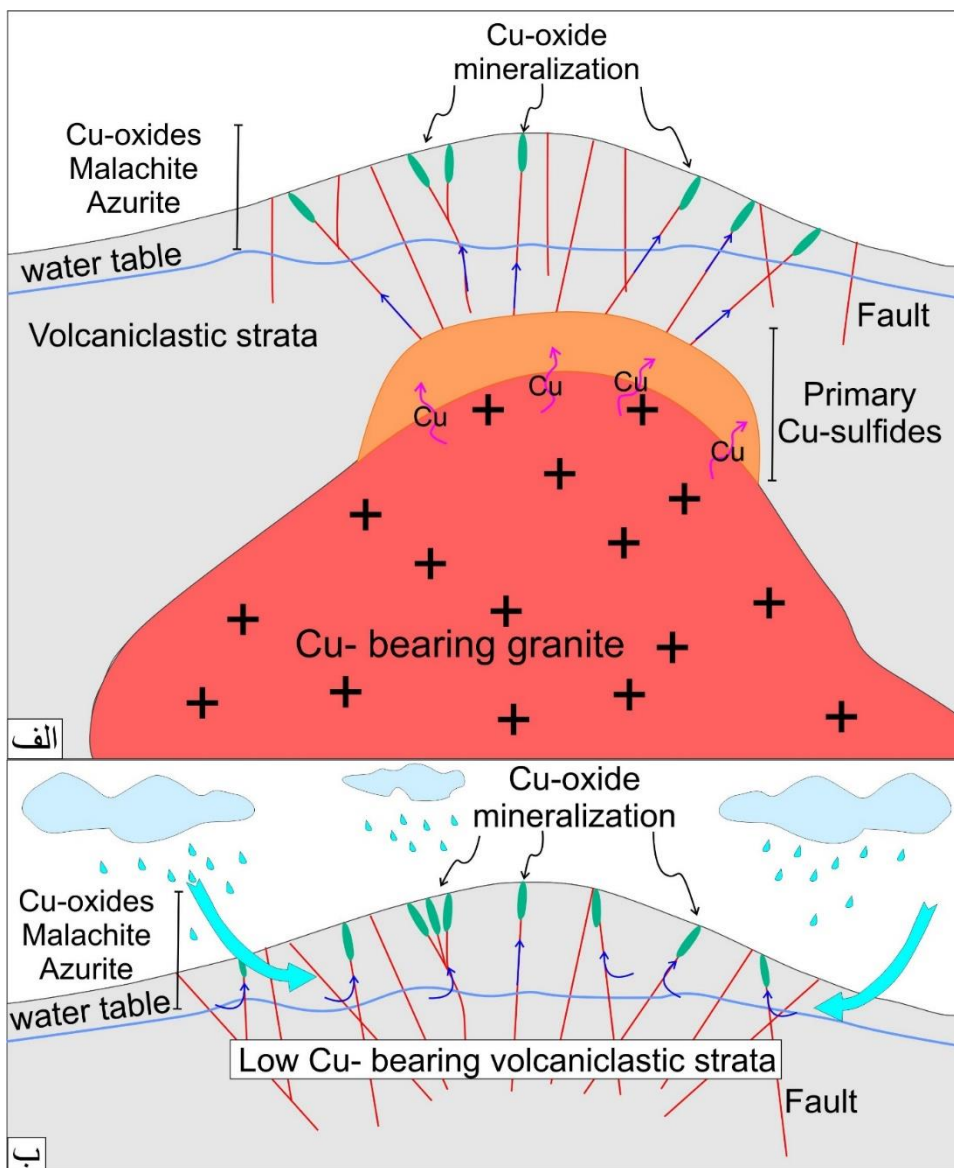
شکل ۴: الف- تصویر ماهواره‌ای بخش شمال شرقی محدوده معدنی دوگان به همراه گسل‌های اصلی، کانه زایی مس اکسیدی (هاله‌های زرد رنگ)، هاله دگرسانی فعلی شکل (سیاه رنگ) و دو رخنمون از توده‌های گرانیتوئیدی (خطوط منقطع سفید رنگ) که توسط گسل شمال دوگان قطع شده‌اند. NDF: North Dogan Fault گسل شمال دوگان  
 ب- نمایی رو به شمال غرب از گسل F6 با امتداد شمال غربی - جنوب شرقی و سازوکار نرمال چپگرد به همراه استریوگرام آن. این گسل میزبان کانه سازی مس اکسیدی (مالاکیت و آزوریت) با عرض حدوداً ۷۰ سانتیمتر بوده است.  
 ج- نمایی نزدیک از مالاکیت بر روی صفحه گسل F6.  
 د- نمایی نزدیک از صفحه آینه ای گسل F6 به همراه خش لغزهای مایل روی آن (خطوط سیاه).  
 ه- نمایی عریض رو به جنوب از آثار استخراج شدادی (خطوط منقطع زرد رنگ) مس اکسیدی در طول گسل چپگرد F7 با طول بیش از ۴۰ متر به همراه نمایش آن توسط استریوگرام.  
 و- نمایی نزدیک از ساختار گلواره منفی از گسل چپگرد F7 و دگرسانی و کانه سازی مالاکیت در تراشه‌های محدود بین صفحات گسلی.  
 ز- نمایی عریض از پهنه گسل معکوس راستگرد شمال دوگان (NDF) که واحد روشن گرانودیوریتی را بر روی واحد آندزیتی تیره رنگ رانده است به همراه استریوگرام آن. ح- شکلی از صفحه آینه ای گسل شمال دوگان به همراه خشلغز مایل آن (خط زرد رنگ).



شکل ۵: مقاطع عرضی ساختاری ترسیم شده برای بخش جنوب غربی محدوده دوگان (aa') با امتداد شمال شرق- جنوب غرب و برای بخش شمالی محدوده دوگان (bb') با امتداد شرقی- غربی به منظور بررسی آناتومی و روابط ساختاری منطقه به همراه نام گسل‌های اصلی نشان داده شده در شکل‌های ۳-الف و ۴-الف. محل مقاطع عرضی ساختاری (aa') و (bb') به ترتیب در شکل‌های ۳-الف و ۴-الف نشان داده شده است.



شکل ۶: الف- نتایج حاصل از عملیات برگردان تنش مسیب گسل خوردگی ساختارهای شکنای برداشت شده در منطقه دوگان که نشانگر جهت تنش بیشینه افقی در راستای شمال غرب- جنوب شرق است. (سیگما ۱ با ستاره پنج پر قرمز، سیگما ۲ با ستاره چهار پر سبز و سیگما ۳ با ستاره سه پر آبی نشان داده شده است). ب- مدل ساختاری روابط امتدادی و سازوکارهای مختلف گسلی اندازه گیری شده در منطقه دوگان و انطباق آن با مدل ایده آل در یک زون گسلی امتدادلغز برشی ساده راستگرد (Storti et al, 2006). هاله‌های زرد رنگ نشانگر محل تمرکز کانه سازی در محدوده دوگان است.



شکل ۷: الف- مدل پیشنهادی نشانگر ارتباط گسل‌ها و کانی‌سازی مس اکسیدی با میزبانی واحدهای حدواسط تا مافیک آذرین بیرونی، دارای شکستگی و گسل فراوان در سطح، و حضور توده آذرین پورفیری غنی از کاتیون‌های مس در عمق که توسط مایعات غنی از مس منشا گرفته از توده آبدار تغذیه‌کننده مس سیستم است. ب- مدل پیشنهادی نشانگر ارتباط گسل‌ها و کانی‌سازی مس اکسیدی با میزبانی واحدهای حدواسط تا مافیک آذرین بیرونی که در سطح گسلیده شده و این واحدها دارای مقادیر پائین تا متوسط از کاتیون‌های مس هستند. آب‌های جوی در انحلال و تمرکز این کاتیون‌ها در فضای گسل‌ها و شکستگی‌ها نقش اصلی را دارند (تغییر یافته از Li et al, 2019).