



فصلنامه زمین ساخت

بهار ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۳

مطالعه ارتباط بین کانی‌زایی، گسلش و میدان تنش محلی در منطقه تروود

علی جعفری^{۱*}، احد نوری مخوری^۲، محسن مؤید^۳

۱- دانشجوی دکتری پترولوژی، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

۲- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه زمین شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه فردوسی مشهد

۳- استاد گروه زمین شناسی، دانشکده علوم طبیعی، دانشگاه تبریز

تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۹/۰۹/۲۶

چکیده

مطالعات صحرایی و تحلیل بیش از ۱۷۰ ساخت صفحه‌ای (شکستگی، گسل، دایک) برای بررسی ارتباط بین کانی‌زایی و ساختارهای شکننده در منطقه تروود انجام شد. این مطالعات نشان می‌دهد در این منطقه ارتباط بین جریان سیالات کانه‌دار و شکستگی‌های با جهت گیری خاص و همچنین پهنه‌های با شدت شکستگی بالا (زون‌های آسیب دیده گسلی) بوسیله رسوب کانی‌های مس‌دار در این شکستگی‌ها به خوبی نمایان است. نتایج نشان می‌دهند، جهت گیری ترجیحی شکستگی‌های شمال شرق-جنوب غرب که در آن‌ها کانی‌زایی رخ داده است در ارتباط با میدان تنش محلی امتدادلغزی با جهت کوتاه شدگی شمال شرق-جنوب غربی هستند. همچنین این نتایج نشان می‌دهند که کانه‌زایی نه تنها در ارتباط با شکستگی‌های حاصل از میدان تنش محلی بوده است بلکه بوسیله پهنه‌های آسیب دیده گسلی نیز کنترل شده است.

واژه‌های کلیدی: پهنه آسیب دیده گسلی، شکستگی، کانی‌زایی، منطقه تروود.



Study of relationship among mineralization, faulting and local stress field in Torud area

Jafari .A^{1,*}; Nouri Mokhoori .A²; Moayyed .M³

1- PhD Student of Petrology, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz
2- PhD Student of Tectonics, Department of Geology, Faculty of Sciences, Ferdowsi University of Mashhad
3- Professor, Department of Geology, Faculty of Natural Sciences, University of Tabriz

Abstract

To study of relationship between mineralization and brittle structures in Torud area field studies and analysis of more than 170 planar structures (fracture, fault and dyke) were carried out. These studies show relationship between mineralising fluid flow and fractures with special orientation, as well as densely fractured zones (fault damage zones) is clearly visible in form of the precipitation of Cu-bearing minerals in the fractures. Results show preferred orientation of the NE–SW trending fractures, which are mineralized, is related to strike–slip stress field with NE–SW trending shortening axis. Also, these results show the mineralization is controlled not only by fractures as a function of local stress field but also is controlled by fault damage zones.

Keywords: Fault damage zone, Fracture, Mineralization, Torud area.

است (نبوی، ۱۳۵۵). سنگ‌های ولکانیکی این پهنه عمدتاً شامل داسیت، آندزیت، تراکی-آندزیت، توف، ریوداسیت، ریولیت و آندزیت بازالتی به همراه سنگ‌های پلوتونیک گرانیت، گرانودیوریت تا دیوریت است (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ ب). توالی سنگی این منطقه متأثر از تعدادی گسل‌های کواترنری است و به طور کلی گسل‌ها اصلی‌ترین عامل چهره‌ساز توپوگرافی منطقه هستند. سازوکار جنبشی این گسل‌ها بیشتر دارای سازوکار فشاری یا مولفه مهم فشاری هستند (بربریان و همکاران، ۱۳۷۵). گسل ترود با راستای تقریبی ENE-WSW بارزترین ساختار منطقه است که در دوره‌های مختلف زمین‌شناسی، نقش مهمی در تکامل منطقه داشته است (خادمی و شهریاری، ۱۳۸۵). آخرین حرکت آن بر اساس سازوکار کانونی زلزله (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) و آثار سطحی آن (خادمی و شهریاری، ۱۳۸۵) امتداد دلغز راستگرد با مولفه معکوس معرفی شده است.

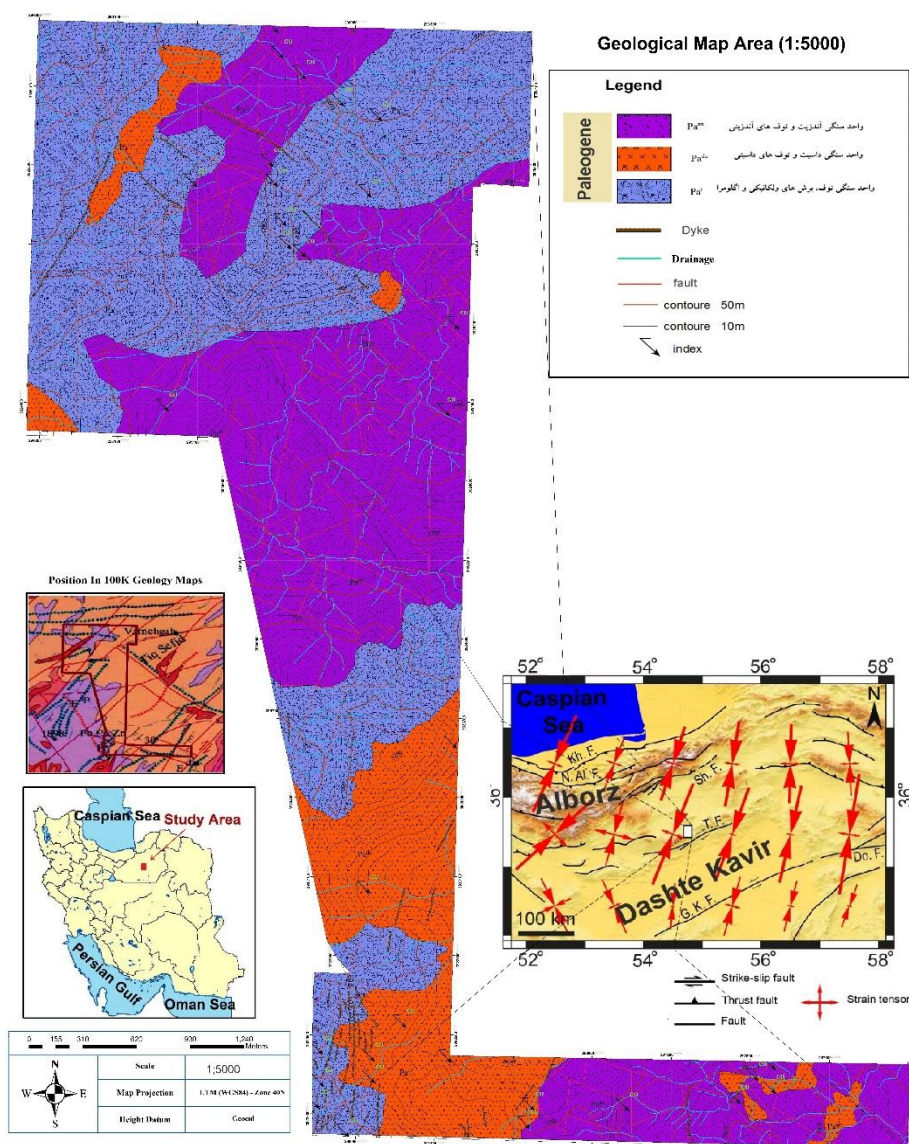
سنگ میزبان و فرم کانی زایی

هم سنگ میزبان و هم پهنه‌های کانی زایی شده به خوبی در سطح رخنمون یافته‌اند. واحدهای آذرین پالئوژن با سنگ شناسی آندزیت، توف آندزیتی، داسیت، توف داسیتی و واحدهای سنگی توف، برش‌های ولکانیکی و آگلومرا به عنوان سنگ میزبان برای کانی زایی مس عمل کرده‌اند. این واحدها با دایک‌های آندزیتی جوانتر با شیب زیاد و روند عمدتاً شمال غرب-جنوب شرق قطع شده‌اند. در مقیاس محلی، شکستگی‌ها و گسل‌ها در اندازه‌ها و جهت‌گیری‌های متفاوت این واحدها را تحت تاثیر قرار داده‌اند. کانی زایی در این محدوده عمدتاً به صورت مالاکیت و کالکوسیت در خلل و فرج توف‌ها، پهنه‌های آسیب دیده گسلی، سطح گسل و به فرم رگه‌ای در شکستگی‌ها دیده می‌شود (شکل ۲).

گسل‌ها و شکستگی‌ها از عناصر مهم ساختاری هستند که تشکیل و تمرکز آن‌ها در محیط‌های نفوذناپذیر، تعیین کننده مسیرهای سیال است. از این رو مناطق با شدت شکستگی بالا محیط‌هایی مستعد برای جریان سیالات هیدروترمال و ایجاد ذخایر کانیایی می‌باشند. شکستگی‌های باز و سطوح لغزشی در پهنه‌های گسلی با توزیع فضاهای باز در نتیجه جهت‌گیری مطلوب نسبت به جهت تنش‌های اصلی (Faulkner et al., 2010) و اتصال آن‌ها (Micarelli et al., 2006; Sanderson and Nixon, 2000) و همچنین فضاهای باز حاصل از شکستگی‌های کششی یا در نتیجه چرخش بلوک‌های مابین شکستگی‌ها (Kim et al., 2004)، نفوذپذیری محیط و در نتیجه چرخش سیال را کنترل می‌کنند. در صورتی که میدان تنش بتواند به مقاومت سنگ غلبه کند، شکستگی‌های مختلفی می‌تواند با جهت‌گیری‌های متفاوت (معیار شکست مور-گریفیت-کلمب) تشکیل شوند. شکستگی‌های کششی یا شکستگی‌های دارای مولفه کششی (Fossen, 2010; Nelson, 2001) و همچنین میزان اتصال انواع شکستگی‌ها به همدیگر (Sanderson and Nixon, 2015) می‌توانند محیط‌های نفوذپذیر تشکیل دهند. تاثیر شکستگی و گسلش روی نفوذپذیری و کانی‌زایی به ترتیب توسط Sanderson and Nixon (2015) و Tripp and Vearncomb (2004) به طور مفصل مورد بحث قرار گرفته است.

موقعیت زمین‌شناسی و چهارچوب ساختاری

منطقه مورد مطالعه در شمال دشت کویر، بخشی از نوار ماگمایی چاه شیرین است (کی‌نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ آ) که در فاصله بین گسل ترود در جنوب و انجیلو در شمال قرار گرفته است (شکل ۱). حرکات ترکیبی این گسل‌ها باعث بوجود آمدن روندهای شمالی-جنوبی شده



شکل ۱: موقعیت منطقه مورد مطالعه. نقشه واحدهای سنگ شناسی براساس مطالعات صحرایی. گسل‌ها برگرفته از حسامی و همکاران (۱۳۸۲) و نقشه گسل‌های لرزه‌ای و خطواره‌های ایران^۱.

Kh. F: گسل خزر، N. Al. F: گسل شمال البرز،

SH. F: گسل شاهرود،

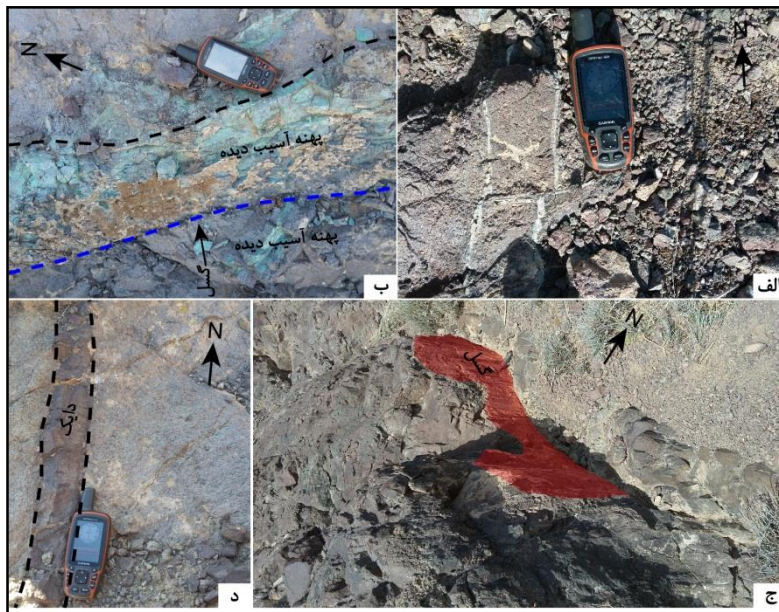
T. F: گسل تروود،

G. K. F: گسل کویر بزرگ،

Do. F: گسل درونه.

پیکان‌های قرمز رنگ نشانگر تنسور استرین هستند (Masson et al., 2014)

^۱ Seismicity Fault and Magnetic lineaments of Iran



شکل ۲. نمونه‌ای از تصاویر صحرائی.

الف) رگه‌های آغشته به مالاکیت.

ب) مالاکیت ته نشست شده در پهنه آسیب دیده گسلی.

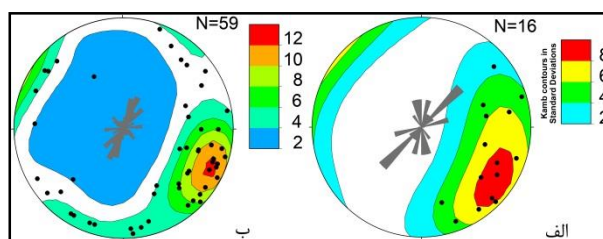
ج) رخنمون سطح گسل (راستگرد نرمال) با مشخصات گسل N330/68NE و مشخصات خش لغزش S39E/20.

د) دایک تزریق شده در واحدهای نفوذی

مطالعه و تحلیل

روی کانی‌زایی دیده می‌شود به عنوان گسل‌های بعداز کانه زایی در نظر گرفته شدند. در مجموع تعداد ۱۴ دایک، ۱۶ گسل-خش لغزش قبل از کانه‌زایی، ۵۹ گسل-خش لغزش بعداز کانه‌زایی و ۸۸ شکستگی پر شده از کانی‌های مس دار برداشت شد (شکل ۳). علاوه براینکه کانه زایی در شکستگی‌ها تمرکز یافته است، بررسی‌ها نشان می‌دهد پراکندگی کانی‌زایی بطور یکنواخت نبوده بلکه در قسمت‌هایی از منطقه تمرکز یافته‌اند. براین اساس منطقه مورد مطالعه به ۵ زیر منطقه تقسیم شد (شکل ۴)

این مطالعه براساس مشاهدات ساختاری و اندازه‌گیری-های صورت گرفته در مقیاس رخنمون می‌باشد. به طور کلی تمرکز اصلی در این مطالعه بر روی گسل‌های دارای خش لغزش، پهنه آسیب دیده و بویژه شکستگی‌های پر شده از کانی‌های مس دار بوده است. محدوده مورد مطالعه به شدت تکتونیزه بوده و رخنمون‌های سنگی دارای گسل و شکستگی‌های متعددی است که در بسیاری از نقاط دایک-ها نیز در آن نفوذ کرده‌اند. نخست به اندازه‌گیری موقعیت گسل‌ها، شکستگی‌ها و دایک‌ها پرداخته شده است. سپس برای تحلیل جنبشی، با توجه به رابطه کانه‌زایی با گسلش، گسل‌های خش دار به دو دسته تقسیم شده‌اند. گسل‌هایی که خش لغزش دارند و کانه‌زایی بر روی سطح خش صورت گرفته است به عنوان گسل‌های قبل از کانه‌زایی در نظر گرفته شدند و گسل‌هایی که اثری از حرکت گسل بر



شکل ۳: موقعیت هندسی قطب صفحات گسل‌های دارای خش لغزش و جهت گیری آن‌ها برای گسل‌های خش داری که در سطح آن‌ها همراه با کانی‌زایی (الف) است و موقعیت صفحات گسل‌هایی که فاقد کانی‌زایی در سطح گسل هستند (ب). نقاط روی استریونوت نشانگر قطب گسل‌ها و نمودارهای گل سرخی نشانگر امتداد گسل‌ها هستند.

زیر منطقه A

در این زیر پهنه دایک-020/70/NW گسترده شده است. در این زیر پهنه دایک-هایی با مشخصه کلی 053/70/NW تزریق شده‌اند که نشانگر کشش با روند عمود بر دایک‌ها در زمان تزریق هستند. شکستگی‌های کانه دار این زیر پهنه شیب زیاد و جهت گیری NE-SW دارند (شکل ۵).

این زیر پهنه بزرگ‌ترین پهنه کانی سازی شده در منطقه مورد مطالعه است. در این زیر منطقه دو پهنه کانی‌زایی قابل مشاهده است که با امتداد S30W به پهنای ۸ متر در شمال شروع شده و تا ۲۰ متر در جنوب تغییر می‌کند. این پهنه کانی زایی شده مرتبط با پهنه آسیب دیده گسلی با مشخصات 205/65NW است. پهنه دوم کانی‌زایی شده در فاصله بین چندین گسل قرار دارد. بیشتر این گسل‌ها دارای روند NNW-SSE و NW-SE هستند. کانی‌زایی در این پهنه به طور عمده با پهنه گسلی با مشخصات 250/80NW در ارتباط است. این پهنه با طول بیشتر از ۵۰۰ متر و پهنای ۵۰ تا ۱۲۰ متر دیده می‌شود (شکل ۵). شکستگی‌های پر شده از کانی مالاکیت با شیب زیاد و جهت گیری کلی NE-SW در این زیر منطقه قرار دارند (شکل ۲).

زیر منطقه C

در این زیر پهنه نیز علاوه بر اینکه کانه‌زایی در شکستگی‌هایی با شیب زیاد و روند کلی NE-SW متمرکز شده است، در پهنه‌هایی در امتداد بعضی از گسل‌ها صورت گرفته است. وجود دایک‌های طویل همراه با کانی‌سازی مس که عمدتاً به صورت کالکوسیت است از ویژگی‌های این زیر منطقه می‌باشد. در قسمت شمالی این منطقه دایکی با مشخصات 220/70SE بوسیله دایکی دیگر (310/75NW) قطع شده است. چون دایک‌ها حاصل تزریق ماگما در شکستگی‌های کشش هستند پس با استناد بر Twiss and Moores (2007) عدم عبور دایک اول از دایک دوم احتمالاً نشانگر این است که دایک دوم قدیمی‌تر است. دایک دوم، به طرف شرق به دو دایک انحنادار منشعب می‌شود که به سمت قسمت جنوبی منطقه دوباره بهم‌دیگر متصل شده و به صوت دایکی منفرد ادامه می‌یابند. در جنوب این زیر منطقه نیز دایکی با مشخصات 053/70NW دیده می‌شود (شکل ۵).

زیر منطقه B

در این زیر پهنه علاوه بر شکستگی‌های کانه‌دار، دو پهنه کانی‌زا قابل مشاهده است. پهنه اول با امتداد کلی N81W که در طرفین گسلی با مشخصات 279/60NE قرار گرفته است. طول این پهنه کانه‌دار بیش از ۵۰ متر و پهنای آن بیش از ۲۰ متر می‌باشد. پهنه دوم کانی‌زا با امتداد کلی N20-40E در حد فاصل و داخل پهنه آسیب دیده گسل‌هایی با مشخصات 040/60NW، 032/70NW و

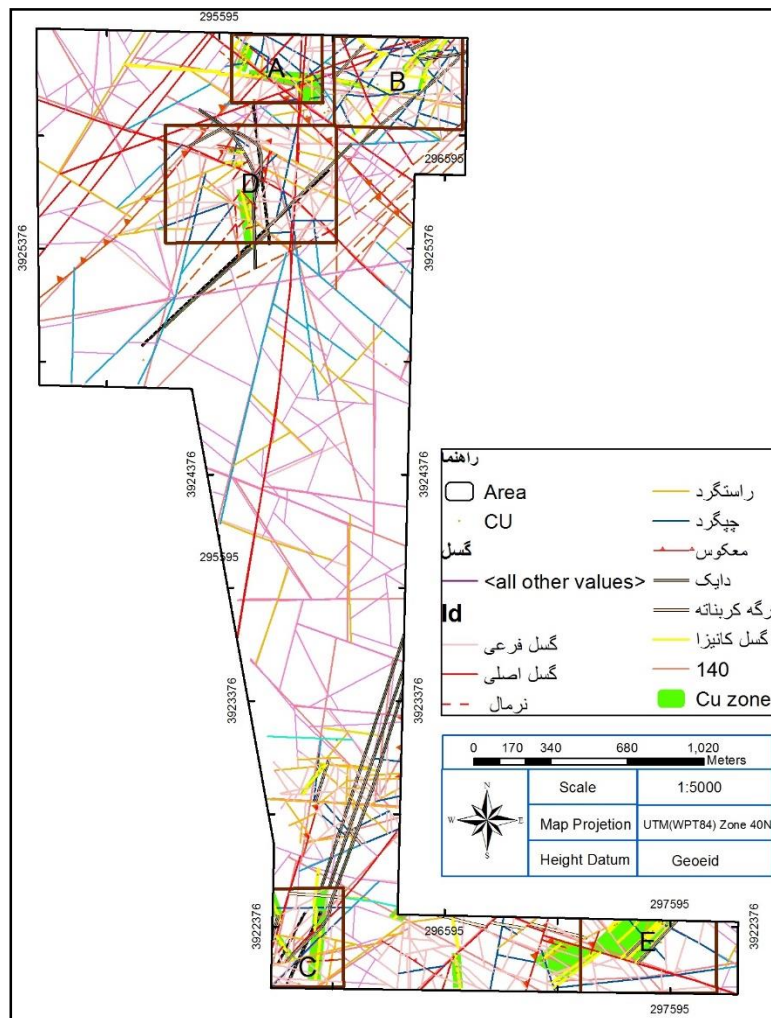


زیر منطقه D

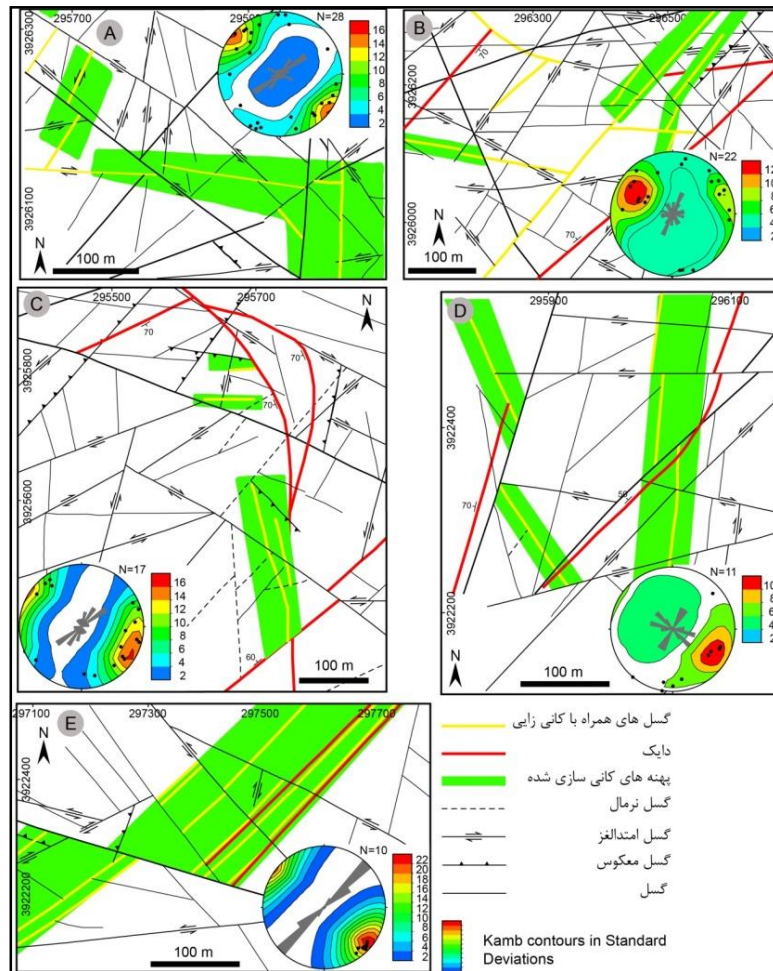
دو پهنه کانیزا در این زیر منطقه دیده می‌شود. پهنه اول به طول ۲۰۰ متر و عرض ۲۰ متر که در طول گسل 140/75SW کشیده شده و موثر از گسل با مشخصات 200/75NW است. پهنه دوم کانیزا به طول بیش از ۳۰۰ متر و عرض ۴۰ متر در طول گسلی با مشخصات 190/70W تشکیل شده است. شکستگی‌های پر شده از کانی شیب زیاد دارند ولی جهت گیری غالب و مشخصی نشان نمی‌دهند (شکل ۵).

زیر منطقه E

در این زیر پهنه کانی زایی به صورت پهنایی با امتداد کلی S40W تا S55W در اطراف و حدفاصل گسل‌های امتداد لغز چپگرد تشکیل شده است. طول این پهنه بیش از ۲۵۰ متر و پهنای آن ۱۰۰ متر بوده و کل پهنه تحت تاثیر گسلی جابجایی راستگرد قابل توجهی را نشان می‌دهد. به طور کلی در این زیر منطقه گسل‌های با ویژگی‌های S40- کانی دار جهت گیری NE-SW با شیب نزدیک به قائم دارند. دو دایک آندزیتی همراه با کانیزایی به موازات پهنه کانیزا تزریق شده‌اند (شکل ۵).



شکل ۴. نقشه ساختاری منطقه و زون‌های کانی‌زا



شکل ۵: نقشه گسل ها، دایک ها و پهنه های کانن زایی شده مربوط به هر زیر منطقه براساس مطالعات صحرایی. استریونت نشانگر قطب شکستگی های کششی که در آن ها کانن زایی شده است. نمودارهای گل سرخی نشانگر امتداد شکستگی هایی که در آن ها کانن زایی شده است.



تحلیل جنبش شناختی

شمالی-جنوبی است. امتداد این گسل‌ها از شمال غرب-جنوب شرق تا شمال شرق-جنوب غرب تغییر نشان می‌دهند. بعضی از این گسل‌ها جهت گیری مشابه ولی سوی برش مخالف نشان می‌دهند (شکل ۶ ب). این پدیده احتمالاً نشانه دوباره فعال شدگی گسل‌ها است. لذا برای تعیین میدان تنش واقعی تر، داده‌های با ناسازگاری بالا با مجموعه داده‌ها، از کل مجموعه کنار گذاشته شدند. نتایج تحلیل نشان می‌دهد گسل‌ها و شکستگی‌های همراه با کانه‌زایی متاثر از میدان تنشی امتداد لغزی است (Delvaux and Sperner, 2003) که در آن موقعیت محورهای بیشنه، متوسط و کمینه تنش اصلی به ترتیب با $221/22$ ، $16/67$ و $120/06$ است. برای تعیین میدان تنش بعد از کانه‌زایی، همین روش روی داده‌ها اعمال شد. نتایج نشان می‌دهد میدان تنش قبل و بعد از کانه‌زایی متفاوت هستند. بطوریکه میدان تنش بعد از کانه‌زایی، با سازوکار تراستی-امتداد لغزی مشخص می‌شود. محورهای بیشنه، میانه و کمینه اصلی برای این تنسور تنش به ترتیب در موقعیت $168/12$ ، $068/41$ و $270/46$ هستند. بیشینه کوتاه شدگی حاصل از این میدان دارای جهت گیری NNW-SSE است (شکل ۷ و جدول ۱). این دوگانگی میدان تنش می‌تواند در ارتباط با تغییرات میدان تنش و سازوکار ساختارها در اواخر نئوژن-کواترنری باشد که از قسمت‌های مختلف ایران گزارش شده است (برای مثال Hollingsworth et al., 2010; Javidfakhr et al., 2011; Jentzer et al., 2017; Navabpour et al., 2007; Dolati and Burg, 2013). هر چند که می‌تواند نتیجه آشفستگی میدان تنش در نتیجه عکس‌العمل گسل‌ها مجاور نسبت بهم دیگر نیز باشد (Aydin and Berryman, 2010). میدان تنش با رژیم

قسمت عمده‌ای از دگر شکلی حاصل از تنش تحمیل شده به منطقه مورد مطالعه در مقیاس رخنمون به صورت شکستگی و گسلش جایگیر شده است. دایک‌های تزریق شده در محدوده مورد مطالعه به عنوان شکستگی‌های کششی پر شده از ماگما (Bons et al., 2012) دارای شیب زیاد و جهت گیری NE-SW هستند (شکل ۶ الف). دایک‌ها عمود بر جهت کمترین تنش اصلی یا در طول شکستگی از قبل موجود که دارای جهت گیری مناسب نسبت به کمترین تنش اصلی هستند انتشار می‌یابند (Valentine and Krogh, 2006). ولی چون ساخت‌های کششی نمی‌توانند در تعیین میدان تنش دیرین بکار برده شوند (Delvaux and Sperner, 2003)، لذا ویژگی‌های جنبش شناختی منطقه با استفاده از علائم ثبت شده در سطح گسل (Doblas, 1998) به عنوان قابل اطمینان‌ترین علائم، مورد استفاده قرار گرفت. تحلیل جنبش شناختی با استفاده از محورهای بینگام مرتبط^۱ (Marret and Allmendinger, 1990) و فیلتر کردن داده‌های ناهم‌خوان با مجموعه داده‌ها با استفاده از معیار زاویه عدم انطباق^۲ (Delvaux and Barth, 2010) و بهینه سازی چرخشی تنش^۳ برای دست یابی به تنسور تنش تقلیل یافته^۴ (Delvaux and Sperner, 2003) انجام گرفت. همانطور که در بالا توضیح داده شد، گسل‌های دارای علائم سطحی سوی برش (خش لغزش)، براساس این که گسل‌های دارای خش لغزش روی سطح گسل با کانه‌زایی همراه باشند یا نه، به دو دسته بعد از کانه‌زایی و قبل از کانه‌زایی تفکیک شد. LBa حاصل از تحلیل، نشانگر کوتاه شدگی

^۲Reduced stress tensor

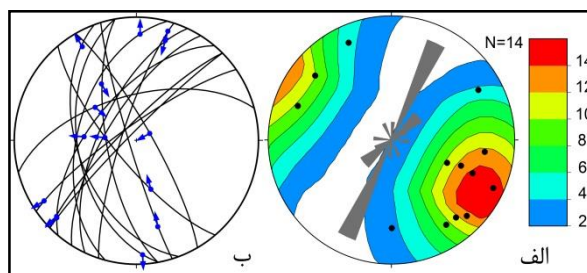
^۱Linked Bingham axes

^۳Misfit angle

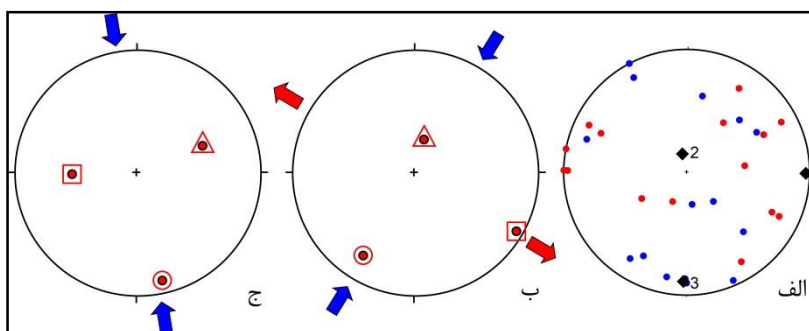
^۴Rotational optimization



تکتونیکی مایل لغزی در این منطقه همخوان با حرکات مایل لغزی گسل (حسامی و همکاران، ۱۳۸۲) است.



شکل ۶: الف) موقعیت قطب دایک‌ها. نمودار گل سرخی، نشانگر امتداد دایک‌ها است. ب) موقعیت صفحات گسلی قبل از کانه‌زایی. پیکان‌ها نشانگر جهت حرکت فرادایواره نسبت به فرودایواره گسل هستند.



شکل ۷: تحلیل جنبشی منطقه مورد مطالعه.

الف) تحلیل جنبش شناسی با استفاده از محورهای یینگام براساس گسل-خش‌داری که روی آن‌ها کانه‌زایی صورت گرفته است. نقاط آبی و قرمز رنگ به ترتیب نشانگر موقعیت محورهای فشارش و کشش هستند. مربع‌های مشخص شده با اعداد ۱، ۲ و ۳، نشانگر محورهای LBA. عدد ۱ نشانگر موقعیت محور طولیل‌شدگی و عدد ۳ نشانگر موقعیت کوتاه‌شدگی است. ب) تحلیل تنش براساس گسل-خش‌هایی که روی آن‌ها کانه‌زایی شده است. دایره، مثلث و مربع به ترتیب نشانگر موقعیت محورهای بیشینه، میانه و کمترین تنش است. پیکان‌های آبی و قرمز رنگ به ترتیب نشانگر جهات فشارش و کشش افقی هستند. ج) تحلیل تنش براساس گسل-خش‌هایی که روی آن‌ها کانه‌زایی نشده است.

جدول ۱: نتایج تحلیل تنش.

Regime 1 و Regime 2 به ترتیب نشانگر رژیم تنش قبل و بعد از کانه‌زایی. σ_1 ، σ_2 و σ_3 به ترتیب نشانگر موقعیت محورهای اصلی تنش فشارشی، خنثی و کششی هستند که موقعیت آنها به صورت میل (دو رقم) و روند (سه رقم) نشان داده شده. α : زاویه عدم انطباق. R: نسبت شکلی تنش $R = (\sigma_2 - \sigma_3) / (\sigma_1 - \sigma_3)$. تعداد داده‌های شرکت کننده در میدان تنش تعیین شده نسبت به کل داده‌های استفاده شده. Stress regime: رژیم تنش. SS: رژیم تنش امتدادلغزی و TS: رژیم تنش فشارشی مایل یا تراستی-امتدادلغزی هستند.

Regime	σ_1	σ_2	σ_3	α	R	n/nt	Stress regime
Regime 1	22/221	67/019	06/120	23.8	0.49	0.81	SS
Regime 2	12/168	41/068	46/270	29.4	0.23	0.54	TS



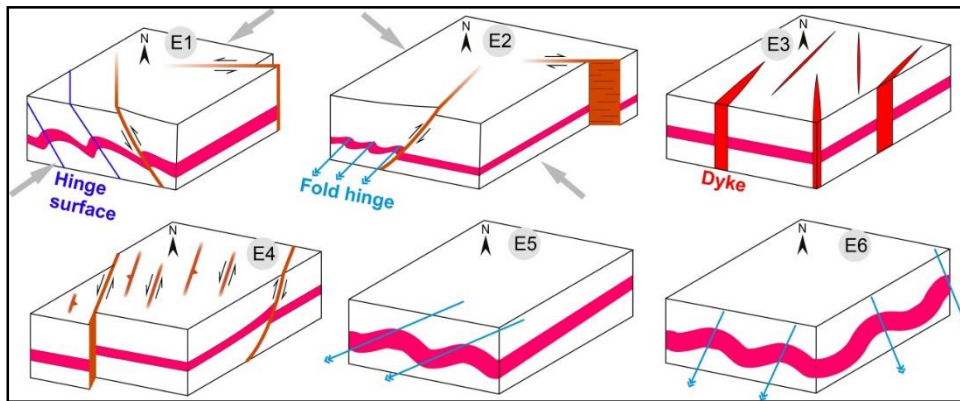
تاریخچه دگرشکلی منطقه

فشارش شمالی-جنوبی در این منطقه شده است (Mattei et al., 2012). سازند قرمز بالایی میوسن موثر از حرکاتی بوده که آثار آن به صورت تاقدیس و ناودیس‌های ملایم با روند شرق شمال شرق-غرب جنوب غرب ثبت شده است (Mattei et al., 2012) (E5). نهشته‌های نئوژن تحت کوتاه شدگی با روند NNE-SSW تا NNW-SSE دچار چین خوردگی شده‌اند (Berberian, 1976) (E6). این منطقه امروزه نیز تحت فشارش کلی NNE-SSW و کشش NNW-SSE دگرریختی را تحمل می‌کند (Zarifi et al., 2013) که این دگرریختی از شمال به جنوب و از غرب به شرق پیشروی می‌کند (خادمی، ۱۳۸۹).

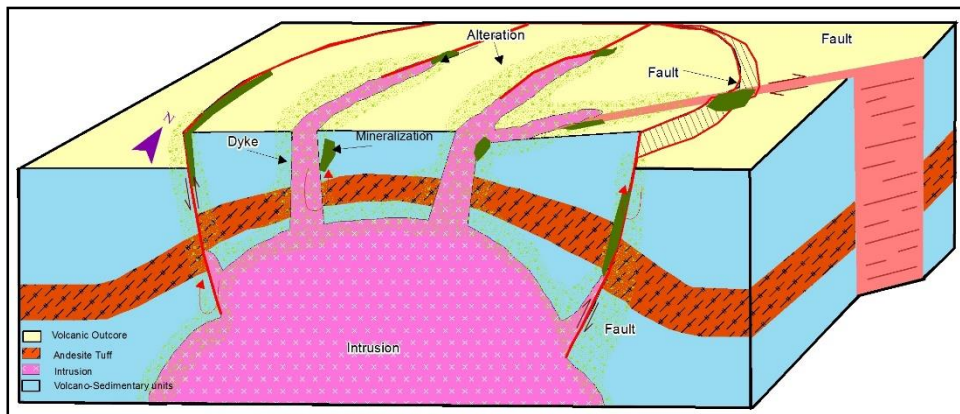
این منطقه همگام با تحولات و تکامل تکتونیکی بخش‌های دیگر ایران، متأثر از فازهای مختلف تکتونیکی، دگرشکلی را به صورت گسلش و چین خوردگی متحمل شده است. این منطقه حداقل تا اوایل کرتاسه، متأثر از فشارش کلی شمال شرقی-جنوب غربی، دارای

رانندگی‌هایی با گرایش به سمت غرب، چین خوردگی‌هایی با گرایش سطح محوری به سمت غرب و ساخت‌هایی با سوی برش چپبر هستند (خادمی و شهریاری، ۱۳۸۵) (E1). از کرتاسه به بعد تحت تاثیر فشارش شمال غرب-جنوب شرق، متحمل گسلش معکوس و چین خوردگی شمال شرقی-جنوب غربی و گسلش راستالغز شده است (خادمی و شهریاری، ۱۳۸۵) (E2). این تغییر میدان تنش می‌تواند نتیجه‌ای از تغییرات جنبشی دریای خزر و مناطق پیرامون آن در زمان‌های گذشته (Djamour et al., 2011) باشد. به علاوه اینکه چرخش ایران مرکزی در زمان‌های گذشته (Soffel and Forster, 1982; Soffel et al., 1996) و چرخش بلوک‌های محدود به گسل‌ها نیز می‌تواند میدان تنشی

متفاوت تر از میدان تنش قبلی اعمال کند (Mattei et al., 2012). تعدادی دایک بازیک واحدهای ولکانیک-پیرو کلاستیک ائوسن را با روند شمالی-جنوبی و شمال شرق-جنوب غرب قطع کرده‌اند (کی نژاد و همکاران، ۱۳۸۹ ب) (E3) به علاوه وجود ساخت‌های کششی نشانگر کشش تقریباً شرقی-غربی در منطقه است (خادمی و شهریاری، ۱۳۸۵). در طول زمان الیگو-میوسن، گسلش راستالغز چپگرد و تراستی با روند شرق شمال شرق-غرب جنوب غرب عمل کرده‌اند (E4). چرخش احتمالی ساعتگرد بلوک‌های محدود به گسل‌های با حرکات چپگرد در الیگو-میوسن باعث



شکل ۸: تصویر فرضی سه بعدی از تکامل ساختاری منطقه مورد مطالعه. E1: ساختارهای غالب تا اوایل کرتاسه. E2: ساختارهای غالب از کرتاسه به بعد. E3: دایک‌های تزریق شده در واحدهای آذین ائوسن. E4: ساختارهای تشکیل شده در الیگومیوسن. E5: چین خوردگی ملاپیم به صورت تاقدیس و ناودیس در سازند قرمز بالای. E6: چین خوردگی نهشته‌های نئوزن در نتیجه کوتاه شدگی با روند NNE-SSW تا NNW-SSE



شکل ۹: تصویری از مدل سه بعدی کانی‌زایی در منطقه



بحث و نتیجه گیری

ته نشین شده است. قسمت اعظم این مواد کانیایی در پهنه‌های آسیب دیده گسلی و مناطقی که این گسل‌ها به همدیگر نزدیک می‌شوند تشکیل شده‌اند. این نشان می‌دهد که نفوذپذیری منطقه مورد مطالعه متأثر از شکستگی‌ها، گسلش و پهنه‌های گسلی است.

گسل‌های قبل از کانه‌زایی آثاری از دوباره فعال شدگی را نشان می‌دهند. تحلیل تنش قبل و بعد از کانه‌زایی به علاوه تعداد داده‌های شرکت کننده در میدان تنش بازسازی شده بعد از کانه‌زایی نشان می‌دهد ویژگی جنبشی این منطقه متأثر چندین فاز مختلف تنش بوده است (E3, E4, E5, E6). کانه‌زایی در این منطقه در ارتباط با ته‌نشینی از سیالات هیدروترمال، در شکستگی‌های باز و پهنه‌های آسیب دیده گسلی است که تحت تاثیر کوتاه‌شدگی با روند کلی NE-SW تشکیل شده‌اند.

دگرشکلی به عنوان تاثیری از تنش‌ها در منطقه، به صورت ساختارهای متفاوت در واحدهای مختلف این منطقه ثبت شده است. گسلش و کانیزایی در منطقه بعد از پالئوژن اتفاق افتاده است. میدان تنش بازسازی شده در ارتباط با کانه‌زایی نشانگر جهت فشارش شمال‌شرق-جنوب‌غرب است. عدم وجود اطلاع از سن کانیزایی باعث می‌شود نتوانیم سن میدان تنش مرتبط با شکستگی‌ها و گسل‌های همراه با کانیزایی را بحث و محدود کنیم. از این رو E3, E5 و E6 را در ارتباط با این میدان تنش در نظر می‌گیریم.

از انواع مختلف شکستگی‌ها در نمودار ترکیبی پوش شکستگی گریفیت-مور-کلمب نسبت به جهت بیشینه تنش اعمالی، شکستگی‌های نوع کششی و هیبرید (Fossen, 2010; Bons et al, 2012) مستعد ایجاد فضای باز و ته‌نشینی مواد کانیایی از محلول‌های هیدروترمال هستند. همچنین شکستگی‌های کششی می‌توانند در ارتباط با ساختارهای شبکه‌ای^۱ (Sibson, 1996) یا زلزله‌ها (Nuriel et al., 2012; Hill, 1977) ایجاد شوند.

فشار سیالی بالا نیز می‌تواند سبب گسلش و شکستگی شود (du Rouchet, 1981; Secor, 1965). پهنه‌های آسیب دیده با ویژگی‌های نفوذپذیری خود می‌توانند در اطراف انواع گسل‌های امتدادلغز و شیب‌لغز تشکیل شوند (Kim et al., 2004) و موقعیت هندسی فضایی شکستگی‌ها و ارتباط آن‌ها با همدیگر نفوذپذیری محیط را تحت تاثیر قرار دهد (Sanderson and Nixon, 2015). این پژوهش نشان می‌دهد مواد کانیایی در شکستگی‌های کششی

^۱Mesh structures



منابع

- Bons, P.D., Elburg, M.A. and Gomez-Rivas, E., 2012. A review of the formation of tectonic veins and their microstructures. *Journal of Structural Geology*, 43, 33-62.
- Delvaux, D. and Barth, A., 2010. African stress pattern from formal inversion of focal mechanism data. *Tectonophysics*, 482(1), 105-128.
- Delvaux, D. and Sperner, B., 2003. New aspects of tectonic stress inversion with reference to the TENSOR program. Geological Society, London, Special Publications, 212(1), 75-100.
- Djamour, Y., Vernant, P., Nankali, H.R. and Tavakoli, F., 2011. NW Iran-eastern Turkey present-day kinematics: results from the Iranian permanent GPS network. *Earth and Planetary Science Letters*, 307(1), 27-34.
- Doblas, M., 1998. Slickenside kinematic indicators. *Tectonophysics*, 295(1), pp.187-197.
- Dolati, A. and Burg, J.P., 2013. Preliminary fault analysis and paleostress evolution in the Makran Fold-and-Thrust Belt in Iran. In *Lithosphere dynamics and sedimentary basins: The Arabian Plate and analogues*. Springer, Berlin, Heidelberg, P: 261-277.
- Faulkner, D.R., Jackson, C.A.L., Lunn, R.J., Schlische, R.W., Shipton, Z.K., Wibberley, C.A.J. and Withjack, M.O., 2010. A review of recent developments concerning the structure, mechanics and fluid flow properties of fault zones. *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1557-1575.
- Fossen H., 2010, structural geology. Cambridge University Press. P: 463.
- Hollingsworth, J., Fattahi, M., Walker, R., Talebian, M., Bahroudi, A., Bolourchi, M.J., Jackson, J. and Copley, A., 2010. Oroclinal bending, distributed thrust and strike-slip faulting, and the accommodation of Arabia-Eurasia convergence in NE Iran since the Oligocene. *Geophysical Journal International*, 181(3), 1214-1246.
- Javidfakhr, B., Bellier, O., Shabanian, E., Ahmadian, S. and Saidi, A., 2011. Plio-Quaternary tectonic regime changes in the transition zone between Alborz and Kopeh Dagh mountain ranges (NE Iran). *Tectonophysics*, 506(1-4), 86-108.
- بربریان م.، قریشی م.، طالبیان م. و شجاع طاهری ج.، ۱۳۷۵. پژوهش و بررسی نوزمین ساخت و خطر زمین لرزه-گسلش در گستره سمنان. گزارش شماره ۶۳، سازمان زمین شناسی کشور، ۲۶۶ ص.
- حسامی خ.، جمالی ف. و طبسی ه.، ۱۳۸۲. نقشه گسل های فعال ایران، پژوهشگاه بین المللی زلزله شناسی و مهندسی زلزله.
- خادمی م. و شهرداری س.، ۱۳۸۵. پایانه باختری گسل تروود: مثالی کلاسیک از پایانه گسل های راستالغز. نشریه علوم دانشگاه تربیت معلم، ۶، ۷۵۶-۷۳۹.
- خادمی م. و محاسبه و تفسیر برخی شاخص های ریخت زمین ساختی پیرامون گسل تروود، جنوب دامغان. فصلنامه علوم زمین، ۷۵، ۵۶-۴۷.
- کی نژاد آ.، پورکرمانی م.، آراین م.، سعیدی ع. و لطفی م.، ۱۳۸۹. تحلیل دینامیکی شکستگی های شمال منطقه تروود-معلمان (ایران مرکزی، جنوب خاور دامغان). فصلنامه علوم زمین، ۷۸، ۱۶-۳.
- کی نژاد آ.، پورکرمانی م.، آراین م.، سعیدی ع. و لطفی م.، ۱۳۸۹. بررسی شکستگی های شمال منطقه تروود-معلمان (ایران مرکزی-جنوب خاور دامغان) و ارتباط آن با کانی‌زایی منطقه. فصلنامه زمین، ۲، ۹۷-۸۱.
- نبوی م. ح.، ۱۳۵۵. دیباچه‌ایی بر زمین‌شناسی ایران. سازمان زمین‌شناسی کشور، ۱۰۹ ص.
- Aydin, A. and Berryman, J.G., 2010. Analysis of the growth of strike-slip faults using effective medium theory. *Journal of Structural Geology*, 32(11), 1629-1642.
- Berberian M., 1976. Seismotectonic map of Iran. Scale: 1:2500000. Geological Survey of Iran.



- Soffel, H.C. and Förster, H.G., 1980. Apparent polar wander path of Central Iran and its geotectonic interpretation. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 32(3), 117-135.
- Soffel, H.C., Schmidt, S., Davoudzadeh, M. and Rolf, C., 1996. New palaeomagnetic data from Central Iran and a Triassic palaeoreconstruction. *Geologische Rundschau*, 85(2), 293-302.
- 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), 1087-1108.
- Twiss, R.J., Twiss, R.J. and Moores, E.M., 1992. *Structural geology*. Macmillan, P: 736p.
- Vearncombe, J. and Vearncombe, S., 1999. The spatial distribution of mineralization; applications of Fry analysis. *Economic Geology*, 94(4), 475-486.
- Zarifi, Z., Nilfouroushan, F. and Raeesi, M., 2014. Crustal stress map of Iran: insight from seismic and geodetic computations. *Pure and Applied Geophysics*, 171(7), 1219-1236.
- Jentzer, M., Fournier, M., Agard, P., Omrani, J., Khatib, M.M. and Whitechurch, H., 2017. Neogene to Present paleostress field in Eastern Iran (Sistan belt) and implications for regional geodynamics. *Tectonics*, 36(2), 321-339.
- Kim, Y.S., Peacock, D.C. and Sanderson, D.J., 2004. Fault damage zones. *Journal of structural geology*, 26(3), 503-517.
- Marrett, R. and Allmendinger, R.W., 1990. Kinematic analysis of fault-slip data. *Journal of structural geology*, 12(8), 973-986.
- Masson, F., Lehujeur, M., Ziegler, Y. and Doubre, C., 2014. Strain rate tensor in Iran from a new GPS velocity field. *Geophysical Journal International*, 197 (1), 10-21.
- Mattei, M., Cifelli, F., Muttoni, G., Zanchi, A., Berra, F., Mossavvari, F. and Eshraghi, S.A., 2012. Neogene block rotation in central Iran: Evidence from paleomagnetic data. *Geological Society of America Bulletin*, B30479-1.
- Micarelli, L., Benedicto, A. and Wibberley, C.A.J., 2006. Structural evolution and permeability of normal fault zones in highly porous carbonate rocks. *Journal of Structural Geology*, 28(7), 1214-1227.
- Navabpour, P., Angelier, J. and Barrier, E., 2007. Cenozoic post-collisional brittle tectonic history and stress reorientation in the High Zagros Belt (Iran, Fars Province). *Tectonophysics*, 432(1-4), 101-131.
- Nelson, R., 2001. *Geologic analysis of naturally fractured reservoirs*. Gulf Professional Publishing. P: 331.
- Ortega, O. and Marrett, R., 2000. Prediction of macrofracture properties using microfracture information, Mesaverde Group sandstones, San Juan basin, New Mexico. *Journal of Structural Geology*, 22(5), 571-588.
- Sanderson, D.J. and Nixon, C.W., 2015. The use of topology in fracture network characterization. *Journal of Structural Geology*, 72, 55-66.
- Seismicity Faults & Magnetic Lineaments of Iran. Scale: 1:2000000. Tehran Padir Consulting Engineers Company.

