

بررسی تاثیر الگوی ساختاری منطقه شمال شرق ایران بر مدل کانی زایی آهن در آنومالی C شمالی سنگ آهن سنگان

علی رضایی^۱، حسین حسینی^۲، پرویز معارفوند^۲، عباس گل محمدی^۳

۱- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۲- دانشیار، گروه مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران

۳- استادیار، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی ایران

(دریافت ۱۳۹۷/۱۰/۱۲، پذیرش ۱۳۹۸/۰۱/۰۶)

چکیده

سیستم‌های ساختاری مرتبط با کانی‌سازی آهن در محدوده ذخایر معدنی سنگان واقع در شمال شرق ایران، رابطه مستقیمی با هندسه تغییر شکل‌ها، شکستگی‌ها و گسل‌ها، سایر ساخت‌های صفحه‌ای و خطی و نفوذ توده‌های آذرین به عنوان منشا و منبع حرکت سیالات نهایی ماگماتیسیم موثر در کانی‌سازی دارد. هدف از این مطالعه، بررسی و شناسایی ساختارهای تکتونیکی در ذخیره C شمالی سنگان و تحلیل آن‌ها، تعیین مدل ساختار ناحیه‌ای، مدل الگوی ساختاری ذخیره و در نهایت ارایه مدل تشکیل آن ذخیره است. با توجه به قرارگیری منطقه معدنی سنگان در انتهای یکی از پایانه‌های انشعابی بزرگ مقیاس از گسل درونه، این بلوک از لحاظ زمین‌ساخت ناحیه‌ای، به عنوان بخشی از فرار تکتونیکی مطرح است و می‌توان بسیاری از عملکردهای ساختاری در ناحیه معدنی سنگان را ناشی از فعالیت این پدیده دانست. با بررسی گسل‌های موجود در محدوده ذخیره و انجام تحلیل تراکم فضایی هر سری گسل، نقشه چگالی گسل تهیه شده که نشانگر سه سیستم گسلی در ذخیره C شمالی است. بر اساس مطالعات توده‌های نفوذی، مدل شماتیک که نشان‌دهنده نوع تحرک احتمالی، سازوکار ساختمان بیرونی و خروج سیالات ماگمایی در هنگام جان‌نشینی ماگما است، به همراه مدل تشکیل ذخیره C شمالی ارایه شد. تشکیل ذخیره C شمالی مرتبط با ساختار است که پایه‌ای برای کاربرد روش تکتونوژئوشیمیایی است. نتایج مطالعه اسکارن‌ها و توده معدنی در ذخایر سنگان (به ویژه C شمالی)، اهمیت زیادی دارد و می‌تواند به صورت محلی برای مطالعه ذخایر اسکارن دیگر که در کنناکت سنگ‌های کربناته با نفوذی‌های گرانیتی در این نوار معدنی‌اند، مورد استفاده قرار گیرد.

کلمات کلیدی

مدل ساختاری، فرار تکتونیکی، کانی‌زایی، ذخیره C شمالی، سنگان.

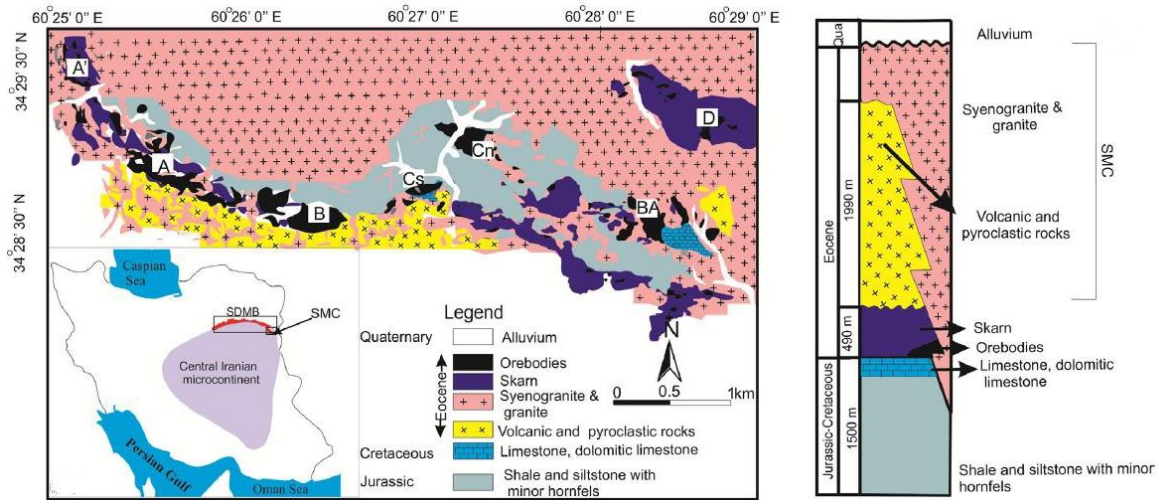
۱- مقدمه

ذخایر سنگ آهن سنگان در استان خراسان رضوی در فاصله ۴۰ کیلومتری جنوب شرقی خواف، ۶۸ کیلومتری جنوب غربی تایباد، ۱۸ کیلومتری شمال شرقی سنگان و ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرق مشهد و نزدیک مرز افغانستان قرار دارد. این ذخایر معدنی، در گستره‌ای بین طول‌های جغرافیایی ۲۴' ۶۰° و ۴۵' ۶۰° و عرض‌های جغرافیایی ۲۶' ۳۴° و ۳۳' ۳۴° واقع شده است و به دلیل عیار بالای آهن، پایین بودن میزان فسفر و گوگرد و همچنین ذخیره زیاد، از مهم‌ترین ذخایر آهن ایران محسوب می‌شوند. این ذخیره در تقسیم‌بندی جدید نیز جزو ذخایر مگنتیت (اکسید آهن) قرار گرفته است. ذخایر مگنتیت سنگان از نوع اسکارنی است و زون‌بندی اسکارن در آن به خوبی قابل مشاهده است. امتداد ذخایر سنگ آهن سنگان، غربی- شرقی است و عوامل چینه‌شناسی و تکتونیکی باعث شده که مواد معدنی در منطقه به طور یکسان پراکندگی نشان ندهند. به همین دلیل در این منطقه آنومالی‌های زیادی از آهن وجود دارد. این ذخایر شامل سه بخش غربی (توده‌های A، A'، B و C شمالی و جنوبی)، مرکزی (توده‌های دردوی (D) و باغک) و بخش شرقی (آنومالی‌های رهنه (R) و فرزنه) است. در این پژوهش، ذخیره C شمالی مورد بررسی قرار گرفته است (شکل ۱).

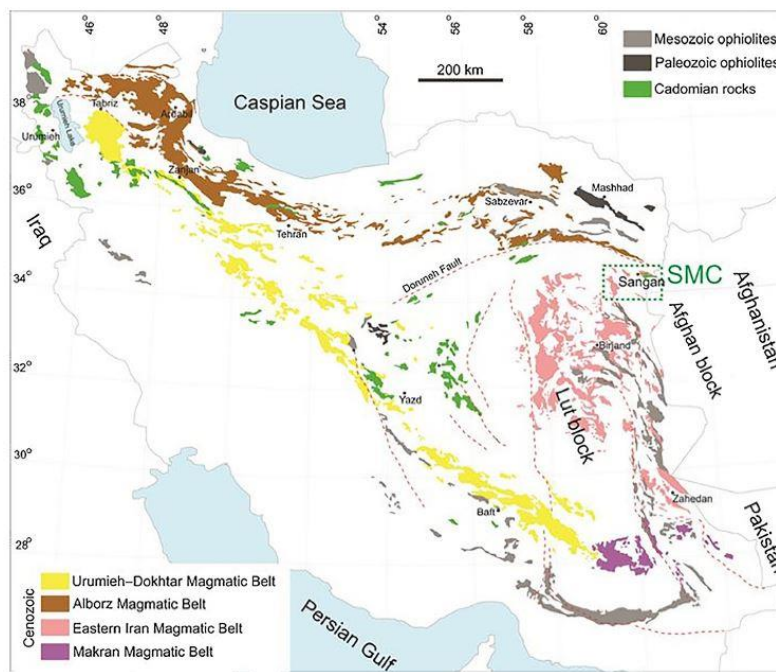
۲- زمین‌شناسی ذخایر معدنی سنگان

از دیدگاه زمین‌شناسی ناحیه‌ای، ذخایر سنگ آهن ناحیه سنگان در چهارگوش تایباد قرار دارند. با مطالعه انجام شده، کمپلکس ماگمایی سنگان (SMC)، یک کمپلکس ماگمایی بزرگ تیپ I است که در شمال شرق ایران قرار دارد (شکل ۲) [۲۴]. کمپلکس ماگمایی سنگان، با گسترش غربی- شرقی در شمال گسل درونه قرار دارد و به طور عمده از سنگ‌های آتشفشانی اسیدی تا حدواسط و تا حدی مافیک با سن ترشیاری تشکیل شده که توده‌های گرانیتوئیدی با ترکیبی از گرانیت تا مونزونیت در آن‌ها نفوذ کرده‌اند [۲۵]. قدیمی‌ترین سنگ‌های ناحیه که در رشته اصلی برونزد دارند شامل سنگ‌های دگرگونی شده آتشفشانی و رسوبی‌اند و به زمان پرکامبرین نسبت داده شده‌اند. قدیمی‌ترین واحدهای موجود در منطقه سنگان، کنگلومراهای برشی‌اند که سن آن‌ها به پیش از پرکامبرین نسبت داده شده است که با شیست‌ها و ماسه‌سنگ‌های دگرگون شده پرکامبرین پوشیده می‌شوند [۲۶]. سنگ‌های دوران دوم شامل؛ مجموعه‌ای از سنگ‌های

مگنتیت کانه اصلی تعداد زیادی از کانسارهای آهن (مانند سازنده‌های آهن نواری، ذخایر مگنتیت- آپاتیت، اکسیدهای آهن- تیتان ماگمایی و اسکارن‌های آهن)، ذخایر مس- طلا همراه با اکسید آهن و سیستم‌های مس- طلا پورفیری است [۵-۱]. ذخایر اسکارن آهن، از بزرگ‌ترین ذخایر اسکارن‌اند که اغلب آن‌ها از کبالت، نیکل، کروم و طلا غنی شده‌اند [۶]. این ذخایر آهن می‌توانند در امتداد گسل‌ها تشکیل شوند و ممکن است شامل پتانسیل چند فلزی باشند [۷]. فرآیند تکتونیک و کانی‌زایی ارتباط تنگاتنگی از لحاظ اکتشاف و بهره‌برداری با یکدیگر دارند. تعیین ساز و کار گسل‌ها و شکستگی‌ها می‌تواند ادامه فعالیت معدنی را از لحاظ اکتشاف و بهره‌برداری آسان سازد. بسیاری از زمین‌شناسان اقتصادی معتقدند که به طور معمول در ذخایر هیدروترمال و ماگمایی، یک ارتباط فضایی میان کانی‌سازی و ساختارهای پوسته‌ای به ویژه گسل‌ها وجود دارد [۸-۱۲]. همچنین گسل‌ها، اغلب دارای ویژگی‌های کنترل‌کننده در جایگیری و گستردگی ذخایر معدنی‌اند [۹، ۱۳]. نقش رژیم تکتونیکی در تغییرات رخساره‌ای و شکل کانی‌سازی به طور گسترده در بسیاری از ذخایر معدنی شناخته شده است. در همه مدل‌های ساختاری، فعالیت ساختارهای اصلی، مهم‌ترین کنترل‌کننده ناحیه‌ای برای منشا و تمرکز سیالات هیدروترمال و همچنین جایگاه‌های کانی‌سازی به شمار می‌روند [۱۴]. بنابراین توزیع فضایی برای انواع گوناگون ذخایر معدنی هیدروترمال و ماگمایی با الگوهای ساختاری به وسیله محل کانی‌سازی مشخص می‌شوند، چرا که شکستگی‌ها، از مهم‌ترین ساختارها در مهیا کردن مکان‌های مناسب برای تشکیل مواد معدنی‌اند و در هدایت سیالات گرمایی یا غیرگرمایی و ته‌نشست آن‌ها در فضاهای ایجاد شده در بین سنگ‌ها نقش بسزایی ایفا می‌کنند. به طور کلی محل برخورد گسل‌ها و همچنین محل برخورد شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های برشی می‌تواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلول‌های کانه‌دار و کانی‌زایی باشد [۲۱-۱۵]. جایگیری ماده معدنی در ذخایر اسکارنی، اغلب با ساختارهای موجود در توده سنگ مرتبط است. اعمال شرایط تکتونیکی عمومی به این ذخایر به دلیل انواع روش‌های جایگیری و تاریخچه زمین‌شناسی در هر ذخیره به صورت محلی و نیز تاثیر بالقوه گسل‌های پس از تشکیل ذخیره بسیار دشوار است، با این حال وجود سنگ‌های گسل‌خورده در نزدیکی ذخایر، اغلب رایج است [۲۳-۲۲].



شکل ۱: موقعیت ذخایر مرکزی و غربی به همراه ستون چینه‌شناسی ناحیه معدنی سنگان [۲۴]



شکل ۲: موقعیت بلوک‌های ساختاری و کمپلکس ماگمایی (SMC) ناحیه معدنی سنگان [۲۴]

رویت است و می‌توان به سنگ‌های آتشفشانی مانند بازالت، آندزیت-بازالت، تراکی‌آندزیت، ایگنمبریت، برش ولکانیکی و توف که به طور دگرشیب بر روی سنگ‌های قدیمی‌تر قرار گرفته‌اند، اشاره کرد. ستون چینه‌شناسی ذخایر معدنی سنگان در شکل ۱ نشان داده است [۲۴].

بر اساس زمین‌شناسی ساختاری، ذخایر سنگ آهن

رسوبی دگرگون شده از جمله؛ آهک، دولومیت و همچنین؛ شامل سازند پادها دربردارنده ماسه‌سنگ کوارتزیتی و ماسه‌سنگ قرمز می‌شود. از سنگ‌های دوران سوم زمین‌شناسی تنها دو دوره ژوراسیک و کرتاسه در ناحیه چهارگوش تایباد (ماسه‌سنگ، آهک، کنگلومرا، سیلت‌استون و شیل‌ها) و از دوران چهارم زمین‌شناسی، سنگ‌های دوره ترشیاری و کواترنری قابل

سنگان، بخشی از کمر بند آتشفشانی- نفوذی، خواف- کاشمر- برداسکن‌اند که با روند شرقی- غربی در شمال گسل درونه و در انتهای یکی از پایانه‌های انشعابی بزرگ مقیاس از این گسل، قرار گرفته‌اند (شکل ۲) [۲۵]. بارزترین ساختار موجود در ناحیه سنگان، گسلی موسوم به گسل دردوی است که به صورت خطواره‌ای بزرگ در تصویرهای ماهواره‌ای با روند تقریبی $N30^{\circ}W$ به صورت خطی طویل تا خارج از منطقه معدنی ادامه دارد. به نظر می‌رسد این گسل در جهت‌گیری ساختاری ذخایر سنگان نقش ویژه‌ای داشته است.

۳- روش مطالعه

اهمیت و تشخیص مدل تکتونیکی برای تشکیل یک ذخیره معدنی در مطالعات ذخایر معدنی امری بسیار مهم محسوب می‌شود. درک کنترل‌کننده‌های ساختاری در مقیاس معدنی نیز ممکن است منجر به بهبود چشمگیری در احتمال کشف در منطقه نزدیک به آن شود. با استفاده از اطلاعات کلیدی ذخایر معدنی می‌توان، زمان کانی‌سازی و حرکت گسل، سینماتیک گسل در هنگام کانی‌سازی و هندسه ساختارهای معدنی را ارایه داد. از آن‌جا که سیستم‌های گسلی و زون‌های گسلی نقش بسیار مهمی در مهاجرت سیالات و تشکیل ذخایر معدنی دارند، در ابتدا به بررسی مدل ساختار ناحیه‌ای، سیستم‌های ساختاری موجود در ذخیره C شمالی بر اساس برداشت‌های صحرائی و مشخص کردن موقعیت زون‌های گسلی با استناد به اطلاعات زیرسطحی پرداخته می‌شود تا الگوی ساختاری حاکم بر ذخیره معدنی تعیین شود، سپس تحلیل روند کانی‌زایی در منطقه مورد مطالعه انجام و مدل تشکیل ذخیره معدنی C شمالی سنگان بر اساس اطلاعات میدانی ارایه می‌شود.

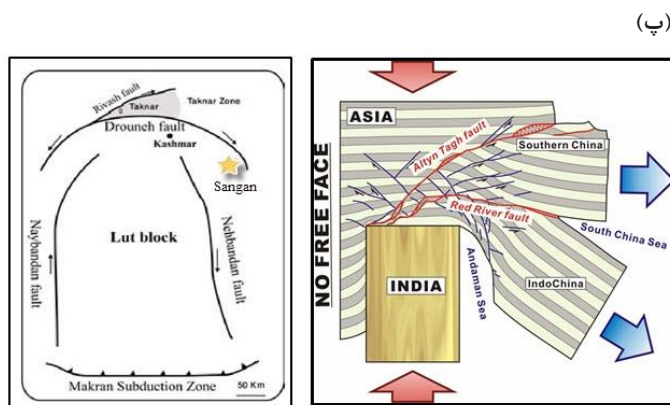
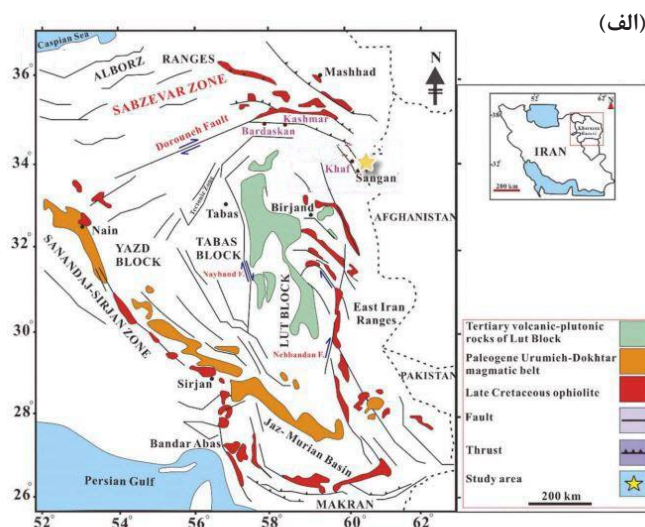
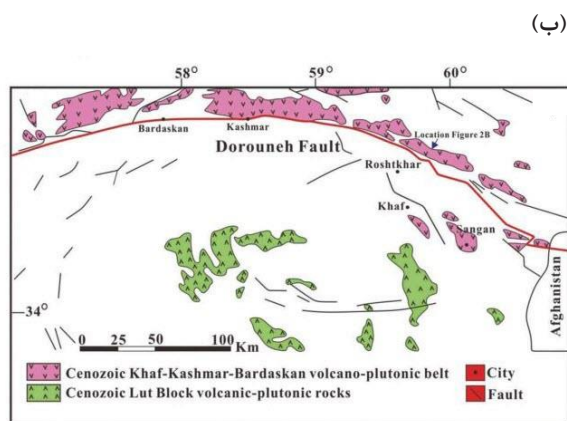
۳-۱- مدل ساختار ناحیه‌ای

منطقه گسلی درونه یکی از گسل‌های امتدادلغز درون قاره‌ای شناخته شده در ایران است و اهمیت قابل توجهی برای تکتونیک فعال در شمال شرق ایران دارد. کمر بند شرق ایران به طول ۱۰۰۰ کیلومتر در جهت شمالی- جنوبی داخل بلوک لوت گسترش یافته است. این بلوک از شرق به گسل نهبندان و به سمت شمال با گسل درونه (زون سبزوار) و در سمت غرب به گسل نایبند محدود می‌شود (شکل ۳، الف). کمر بند متالوژنی و آتشفشانی- نفوذی، خواف- کاشمر- برداسکن از شمال شرق ایران عبور می‌کند که به عنوان جزو اصلی از

حاشیه همگرایی آندی پالئوژن در نظر گرفته می‌شود [۲۷]. این کمر بند متالوژنی شامل سنگ‌های ولکانیکی سیلیسی تا مافیک سنوزوییک است که با توده‌های گرانیتی تا دیوریتی نفوذ کرده است. این کمر بند یک کمان است و در روندهای شرقی- غربی تا شمال غرب- جنوب شرق به عرض ۵۰ کیلومتر و طول تقریبی ۴۰۰ کیلومتر در شمال گسل درونه گسترش یافته، به طوری که این کمر بند از بلوک لوت جدا شده است (شکل ۲، ب). این شکل، دو بلوک سبزوار در شمال و لوت در جنوب گسل درونه، حرکات راست‌گرد و چپ‌گرد در دوره‌های متفاوت با حرکت راست‌گرد که آخرین حرکت است را نشان می‌دهد [۲۸]. شمال لوت تحت تاثیر فرآیندهای تکتونیکی چرخش لوت و فرورانش شرق ایران قرار گرفته است، به طوری که ماگماتیسم لوت از ژوراسیک به بعد آغاز شده و در ترشیاری (اؤسن) به اوج خود رسیده است [۲۹]. در شمال لوت، راست‌گرد بودن گسل تکنار در شمال و چپ‌گرد بودن گسل درونه در جنوب، سبب رخداد سامانه زون برشی ساده بین آن‌ها شده است (شکل ۳، ج) [۳۰].

فرار تکتونیکی^۲ شاخه‌ای از تکتونیک امتدادلغز است که شامل برخورد و تغییرشکل دو صفحه قاره می‌شود که در ارتباط با دگرگونی درجه بالا و جابه‌جایی جانبی گسترده‌ای از لایه در طول گسل‌های امتدادلغز مورب است [۳۱]. گسل درونه در طول زمان، دو حرکت راست‌گرد و چپ‌گرد داشته است. حرکت راست‌گرد آن مربوط به کوتاه شدگی در جهت شمال غرب- جنوب شرق (NW-SE) است که ناشی از چرخش در خلاف جهت عقربه‌های ساعت ایران مرکزی و حرکت چپ‌گرد آن مربوط به همگرایی صفحات ایران و عربستان است [۳۲] که شاهدهی برای فرار تکتونیکی در ناحیه است. این گسل از ابتدای اؤسن شروع به فعالیت کرده است و جوان‌ترین واحدهایی که حرکت راست‌گرد دارند، سن میوسن میانی را نشان داده‌اند، بنابراین می‌توان زمان برگشتی جهت لغزش را به زمان بعد از میوسن میانی مربوط دانست و به این دلیل حرکت چپ‌گردی آن جوان‌تر است [۳۲].

اطلاعات به دست آمده از مطالعات قبلی و حال حاضر (بررسی‌های میدانی ساختاری) در بخش شمالی بلوک لوت نشان می‌دهد که حرکت بلوک آندهای شمالی در جهت شمال شرق- جنوب غرب تا همگرایی نسبی شرقی- غربی میان بلوک لوت و صفحات شمالی آن است و این حرکت ممکن است در ارتباط با فرار جانبی بلوک آندهای شمالی به سمت شرق باشد که یک مرز آزاد را تشکیل داده است، بنابراین



شکل ۳: الف) نقشه ساختاری شرق ایران نشان‌دهنده موقعیت ناحیه سنگان در انتهای گسل درونه، ب) کمر بند آتشفشانی - نفوذی خواف - کاشمر - برداسکن و سنگ‌های آتشفشانی - نفوذی سنوزویک بلوک لوت، پ) مدل فرار تکتونیکی در بلوک‌های ناحیه‌ای شمال شرق ایران و مطابقت آن با مدل ارایه شده توسط روبرت و همکاران [۳۳]

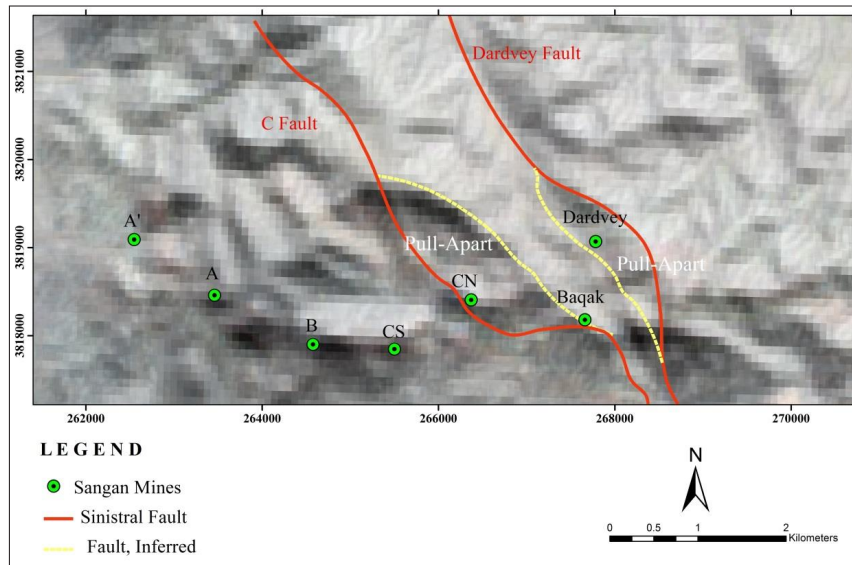
از عملکردهای ساختاری در ناحیه معدنی سنگان را ناشی از فعالیت این پدیده دانست (شکل ۳، ج). اطلاعات ساختاری در ناحیه سنگان نشان می‌دهد که جابه‌جایی اصلی در سیستم‌های گسلی روند شرقی - غربی وجود دارد.

یکی از اجزای فرار تکتونیکی، حوضه‌های جدایشی - کششی^۶ به صورت فروافتادگی‌های توپوگرافی‌اند که طرفین آن‌ها با دو یا چند گسل امتدادلغز و انتهای آن‌ها با گسل‌های انتقالی مورب محدود می‌شود [۳۴]. این محیط‌ها، تنش‌های ناحیه‌ای را در بر می‌گیرند که شامل اجزای برشی و نرمال می‌شوند. کشش در این حوضه‌ها، مقداری جابه‌جایی امتدادلغز را دربر دارد که آن‌ها را تشکیل داده است. این حوضه‌ها در نهایت منجر به جداسازی صفحه در امتداد یک سیستم از مراکز گسترش به صورت جانبی

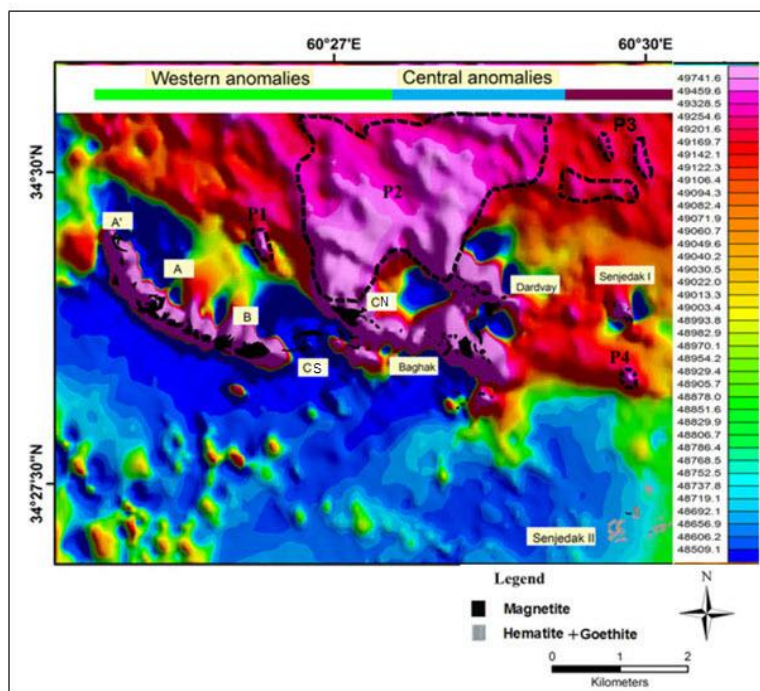
بلوک آندهای شمالی به عنوان یک بلوک فرار فشرده شده در یک ناحیه از همگرایی داخل بلوکی تفسیر می‌شوند. در واقع این فرار تکتونیکی به حرکت جانبی واحدهای ساختاری به سمت یک مرز آزاد در پاسخ به نازک‌شدگی برخوردی^۴ اشاره دارد. شمال بلوک لوت به یک سری از گوه‌های مثلثی کوچک‌تر تقسیم شده است که با گسل‌های امتدادلغز محدود شده و این مشابه مدل ارایه شده توسط روبرت^۵ و همکاران است (شکل ۳، ج) [۳۳]. بنابراین با توجه به قرارگیری ناحیه معدنی سنگان در انتهای یکی از پایانه‌های انشعابی بزرگ مقیاس از گسل درونه، آنالیز تکتونیکی این بلوک و مقایسه شواهد آن با نمونه‌های مشابه در دنیا، فرار تکتونیکی در ناحیه سنگان را نشان می‌دهد و می‌توان بسیاری

(شکل ۴). بر اساس مطالعه تصویر ماهواره‌ای، بررسی مغناطیس هوابرد و مشاهدات صحرایی از دید ویژگی‌های ساختاری، یک سری جابه‌جایی بزرگ در ناحیه سنگان قابل مشاهده‌اند که در ارتباط با پایانه شرقی گسل درونه است (شکل‌های ۴ و ۵).

می‌شوند. بر اساس شواهد صحرایی و مطالعه تکتونیکی انجام شده در ناحیه معدنی سنگان، چندین حوضه جدایشی- کششی، در میان ذخایر مشاهده می‌شود که از جمله آن، می‌توان به ذخیره C شمالی و دردوی اشاره کرد که در مجاورت یکدیگر قرار گرفته‌اند



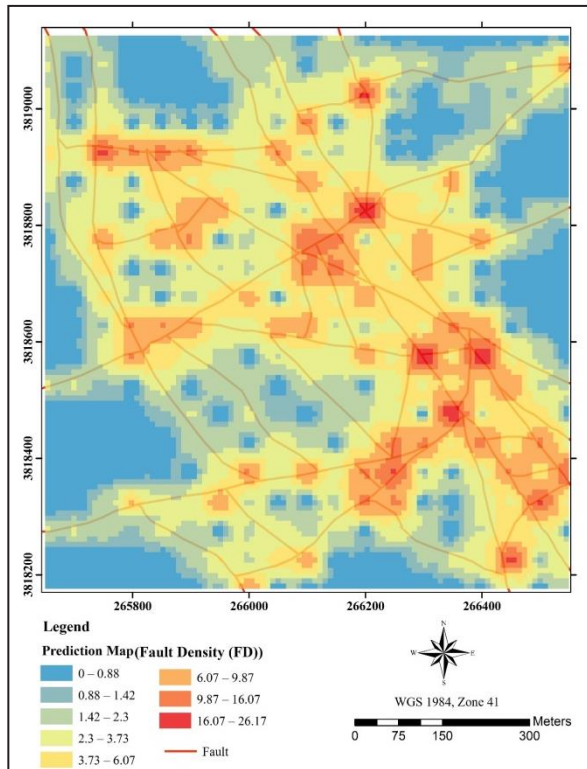
شکل ۴: تشکیل حوضه‌های جدایشی- کششی در ناحیه مورد مطالعه



شکل ۵: نقشه ژئوفیزیکي هوابرد برگردان به قطب ناحیه مورد مطالعه و همخوانی آن با ساختارهای اصلی منطقه [۴۲]

۲-۳- شناسایی ساختارهای اصلی در ناحیه مورد مطالعه

ذخیره معدنی C شمالی سنگان به عنوان بخشی از منطقه تحت اعمال تنش‌های حاصل از حرکت انتهایی پایانه شرقی گسل درونه مورد توجه است. برای آرایه مدل ساختاری در ذخیره C شمالی سنگان، برداشت‌های صحرایی در محدوده این ذخیره انجام شده است. بر این اساس، گسل‌های ذخیره C شمالی بر مبنای سازوکار، اغلب گسل‌های نرمال و امتدادلغزند، که از نظر تعداد و فراوانی، بیشترین نوع گسل‌ها را در محدوده مورد مطالعه به خود اختصاص داده‌اند. تشکیل این گسل‌ها را می‌توان به فعالیت نسل‌های مختلف حرکات گسل بزرگ درونه نسبت داد. پراکندگی آماری وضعیت گسل‌های موجود در ذخیره C شمالی سنگان بر اساس برداشت‌های صحرایی در شکل ۶، نشان داده شده است. در محدوده مورد مطالعه، صفحات گسلی با شیب‌های زیادی مشاهده می‌شود که دارای آثار خش‌لغزی با مولفه شیبی غالب و در برخی به همراه حرکت امتدادلغزی بودند. با توجه به کشیدگی‌هایی که در طی زمان‌های مختلف بر منطقه اثر کرده است باید انتظار گسل‌های نرمال را به فراوان داشت. با بررسی گسل‌های موجود در ناحیه مورد مطالعه و انجام تحلیل تراکم فضایی هر سری گسل، نقشه چگالی گسل تهیه شده است (شکل ۷). بر اساس مطالعه



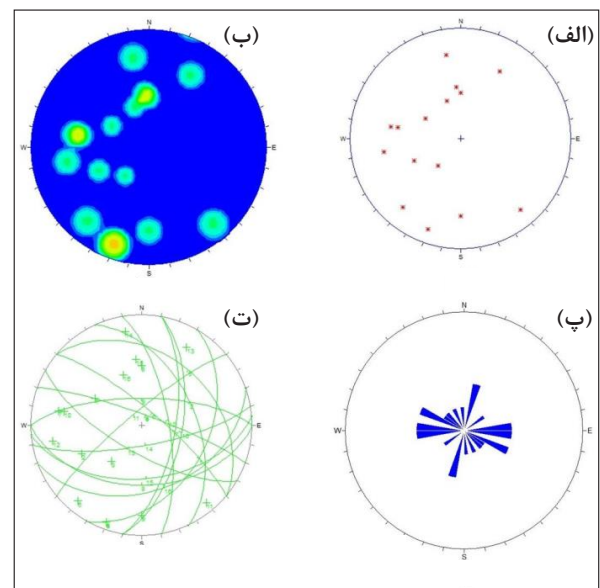
شکل ۷: نقشه چگالی گسل در ذخیره C شمالی سنگان

ساختاری انجام شده و نقشه‌های حاصل در ذخیره C شمالی سنگان، سیستم‌های گسلی در این ذخیره معدنی به سه گروه اصلی تقسیم‌بندی می‌شود.

الف- سیستم گسلی با امتداد شرقی- غربی: این نوع از گسل‌ها در این ذخیره قدیمی‌ترند. گسل‌ها در جنوب ناحیه سنگ‌های آذرین را نزدیک به سنگ‌های کربناته جابه‌جا کرده‌اند. علاوه بر این، رخنمون این سنگ‌ها در این سیستم گسلی انطباق دارد.

ب- سیستم گسلی با امتداد شمال شرقی- جنوب غربی: این نوع گسل‌ها جوان‌تر از نوع اول‌اند. در بسیاری از مناطق، یک سری جابه‌جایی ممکن است در شکستگی‌های منطقه مشاهده شود که به سمت راست جابه‌جا شده‌اند.

پ- سیستم گسلی با امتداد شمال غربی- جنوب شرقی: این گسل‌ها به سمت شمال و شرق منطقه تمایل دارند که منجر به جابه‌جایی بر اساس روند گسل‌ها در غرب شده‌اند. نتایج اولیه مطالعه نشان می‌دهد که ذخیره معدنی با ساختار منطقه جابه‌جا شده است. گسل‌های بزرگ چپ‌گرد که سنی جوان‌تر دارند باعث ایجاد برشی ساده و چرخش ساختارها شده‌اند. مهم‌ترین ساختار در ذخیره C شمالی، گسلی با



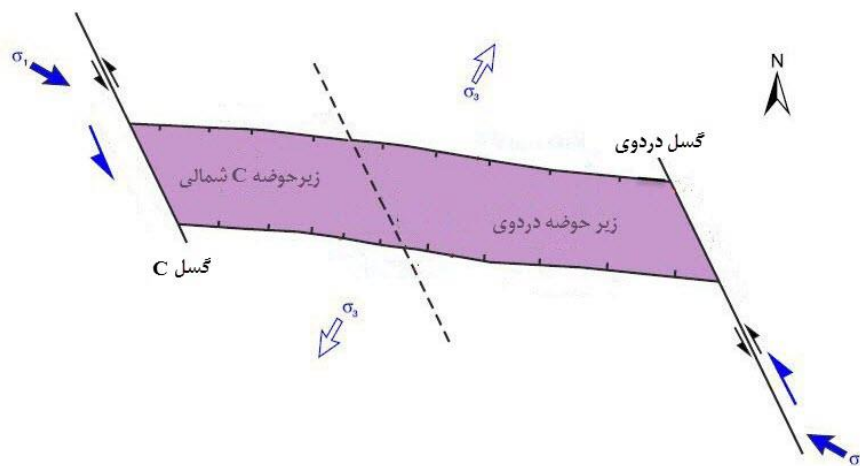
شکل ۶: تحلیل آماری گسل‌ها در ذخیره C شمالی سنگان، (الف) نمودار پلات قطب گسل‌ها، (ب) نمودار هم‌تراز قطب گسل‌ها، (پ) نمودار گل‌سرخ پراکندگی آماری گسل‌ها، (ت) نمودار صفحات گسل‌ها

درونه شناسایی شود. بر اساس مطالعات ساختاری ناحیه‌ای و منطقه‌ای پیشین [۳۷،۳۶،۳۲] و جدید [۳۸] بر روی این منطقه، نحوه عملکرد دو گسل اصلی درون و تکنار سبب شده است تا راستای محور σ_1 (تنش میانگین ناحیه‌ای) شمال‌شرقی - جنوب‌غربی باشد و زون برشی ایجاد شود. ناحیه سنگان، به وسیله گسل امتدادلغز درون، تحولاتی در زمینه تشکیل کانسار و جابه‌جایی کانسارهای تشکیل شده به وسیله این گسل را سبب شده است. جکسون و والکر^۷ به حرکت چرخشی گسل درون اشاره کرده‌اند [۳۹]. با توجه به وجود جابه‌جایی واحدهای زمین‌شناسی وابسته به کوترنری در اطراف گسل درون، می‌توان بر چپ‌بر بودن حرکت این گسل تاکید کرد. با توجه به فرارگیری ذخایر سنگان در جنوب گسل درون و همچنین انشعابات شرقی پایانه این گسل که جهت آن به سمت جنوب است، استنباط می‌شود که با در نظر گرفتن حرکات راست‌لغز گسل درون که از حرکات قدیمی این گسل است، بر ذخیره C شمالی سنگان، رژیم کششی حاکم است. همانند سایر حوضه‌های پشت قوسی، گوشته فوقانی ضمن حرکت به سمت بالا و تولید مذاب بازالتی باعث ذوب بخشی گسترده پوسته شده است. حوضه جدایشی - کششی ایجاد شده ابتدا با یک ماگماتیسزم بازالت از منشا گوشته و سپس به دنبال رسوب از واحد رسوبی کمپلکس حدواسط، با سنگ‌های ولکانیکی ریوداسیتی از منشا پوسته پر شده است. در مرحله اولیه با توسعه یک ساختار جدایشی - کششی با زیرحوضه‌های مختلفی آغاز شده است که با زون‌های گسلی با روند شمال‌شرق - جنوب‌غرب و زون‌های گسلی امتدادلغز راست‌گرد در جهت

امتداد شمال‌غرب - جنوب‌شرق در مابین توده‌های آنومالی C است که از قسمت جنوبی مگنتیت‌های بخش شمالی و نیز بخش شمالی مگنتیت‌های بخش جنوبی توده C عبور می‌کند (شکل ۸). این گسل به عنوان گسل اصلی موجود در منطقه در جابه‌جایی توده C شناخته می‌شود. بیشتر تغییرات موجود در آنومالی C شمالی، متأثر از فعالیت این گسل است. این گسل دارای پهنه گسلی بسیار بزرگ است که در اثر نفوذ محلول‌های گرمایی، سبب دگرسانی شدید در سنگ‌های موجود در پهنه گسلی خود شده و به رنگ زرد تا کرم در منطقه تغییر پیدا کرده است. این گسل امتداد ۲۹۰ درجه نسبت به شمال با شیب ۷۰ درجه به سمت شمال و شمال‌شرق دارد و دارای حرکت نرمال همراه با اندکی مولفه امتدادی چپ‌لغز است که باعث جابه‌جایی دو توده آنومالی C شده است، بنابراین این فرضیه وجود دارد که توده آنومالی C شمالی قبل از عملکرد گسل در قسمت شرقی توده مگنتیتی C جنوبی قرار داشته است و با عملکرد گسل، توده مگنتیت C شمالی را بر روی بلوک فرادیواره خود به مکان کنونی جابه‌جا کرده است.

۴- بحث و تحلیل نتایج

در این بخش، تفسیری از تکامل ساختاری ذخایر معدنی سنگان ارائه می‌شود. بر اساس اطلاعات سطحی و زیرسطحی، مقاطع زمین‌شناسی برای ذخیره C شمالی سنگان تهیه شده است. این امر کمک می‌کند تا هندسه و روابط میان کانی‌سازی و تکتونیک‌های ناحیه از طریق توسعه یک حوضه جدایشی - کششی با حوضه‌های جدا شده به وسیله فعالیت‌های گسل

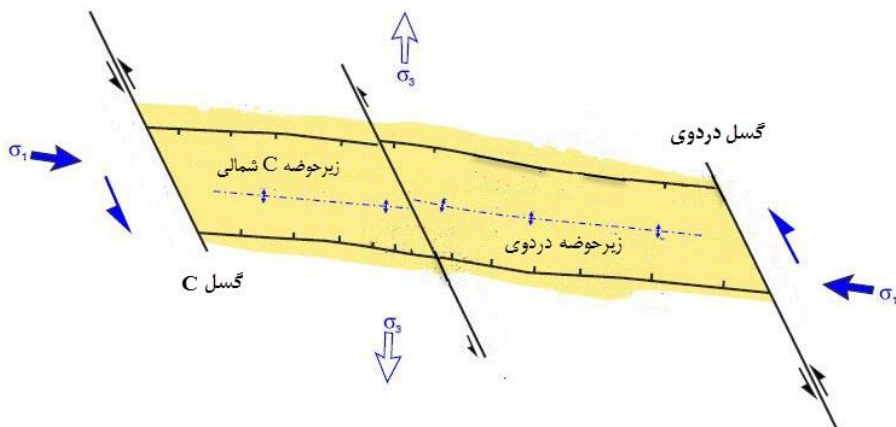


شکل ۸: زیرحوضه‌های جدایشی - کششی، دردوی و C شمالی سنگان در ناحیه مورد مطالعه و نحوه توزیع تنش‌ها

حاوی جریان‌های بازالیتی - آندزیتی، پیروکلاستیک‌های اسیدی و یک گرانیته جایگزین شده در مرکز است، قابل مقایسه است. در این ناحیه چندین کالدرای درهم که با پوششی از سنگ‌های پیروکلاستیک پوشیده شده است، وجود دارد. گرانیته سرنوسر و سنگ‌های آذرین اطراف آن مربوط به یکی از این کالدرها است [۳۹]. محدوده‌های شرقی - غربی، مناطق مناسبی برای افزایش جریان سیال هیدروترمال بودند و راه را برای تمرکز زیاد کانی‌سازی اسکارن در نزدیکی محدوده‌ها هموار کردند. به این ترتیب، گسل‌های کششی شرقی - غربی، مناطق کانالی مناسب برای تغذیه و تجمع مواد معدنی (به طور عمده آهن) می‌شوند. گسل‌های با روند شمال شرقی - جنوب غربی، به ویژه در ذخیره C شمالی، زمانی که با گسل‌های کششی با روند شرقی - غربی در ارتباط بوده‌اند، باعث ایجاد مناطق انشعابی^{۱۰} مطلوب برای تجمع مواد معدنی شده‌اند، بنابراین دوره‌های کانی‌سازی اصلی مربوط به این مرحله است. پس از آن، در طول فاز انتقالی، گسل‌های کششی شرقی - غربی به عنوان گسل‌های معکوس، تحت تاثیر توالی ولکانیکی از ترکیب مافیک تا فلسیک و واحد رسوبی کمپلکس حدواسط، دوباره فعال شده‌اند.

کانی‌سازی اسکارنی تحت تاثیر سری‌های ولکانیکی و همچنین فعال شدن مجدد گسل‌های راست‌گرد شمال شرقی - جنوب غربی توسعه یافته است و در ادامه با گسل‌های چپ‌گرد شمال غربی - جنوب شرقی از یکدیگر جدا شده‌اند. بر اساس نتایج تحلیل دینامیکی، شکستگی‌های دارای مولفه حرکتی ناحیه سنگان، با قرار گرفتن محور تنش ماکزیمم σ_1 با شیب زیاد و

مشابه در منطقه مورد مطالعه از غرب تا شرق محدود شده‌اند. این گسل‌ها همپوشانی دارند و باعث ایجاد یک زون انتقالی^۸ ناشی از فعل و انفعالات به وسیله گسل‌های کششی با روند شرقی - غربی شده‌اند که به ساختار جدایشی - کششی محدود شده است. این الگوی هندسی را می‌توان با فرآیند نازک‌شدگی^۹ بر اثر گسلش امتداد لغز شمال غرب - جنوب شرق (σ_1) و یک برآیند کششی شمال شرقی - جنوب غرب (σ_2) توجیه کرد (شکل ۸). علاوه بر این، همان‌طور که در ساختار جدایشی - کششی انتقالی نشان داده شده است، مناطق بسیار مطلوب برای افزایش جریان سیال و بیشترین تمرکز کانی‌سازی در نزدیکی مرزها، قرار دارد. بعدها، به عنوان یک نتیجه از چرخش در جهت پادساعتگرد محور تنش، نازک‌شدگی (σ_1) غرب شمال غرب - شرق جنوب شرق (WNW-ESE) و کشش (σ_2) تقریباً به صورت شمالی - جنوبی (N-S) است (شکل ۹). در واقع نازک‌شدگی در نتیجه رژیم فشارشی و فعالیت ولکانیکی گسترده با این فشارش همراه بوده است. از طرف دیگر، تکامل حوضه‌های فرونشست سبب توسعه بلوک‌های هورست و نیمه‌گرا بن چرخشی در جهت شرقی - غربی می‌شود که بر این سنگ‌های پرکننده تاثیر می‌گذارد. در نتیجه چرخش در جهت پادساعتگرد محورهای تنش، حوضه جدایشی - کششی اولیه، به حوضه‌ای تبدیل می‌شود که به وسیله برش راست‌بر شمالی - جنوبی تحت تاثیر قرار می‌گیرد. در نتیجه یک کمربند آتشفشانی، به طور تقریبی به موازات مدارات ایجاد می‌شود. اغلب این حوضه‌های آتشفشانی به صورت کالدرها توسعه یافته‌اند. این کالدرها با ریفیت ریوگراند در نیومکزیکو که

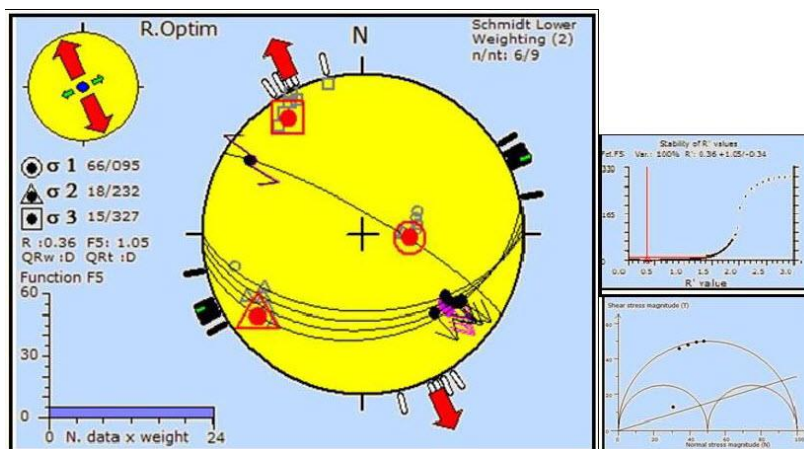


شکل ۹: فاز انتقالی طولانی مدت. به عنوان یک نتیجه چرخش پادساعتگرد، جهت نازک‌شدگی (σ_1) به صورت WNW-ESE و کشش (σ_2) تقریباً N-S

این فاز کششی که ممکن است حاصل قرارگیری منطقه در یک حوضه پشت قوسی نیز باشد، اثر سازنده‌ای را در جایگیری توده معدنی و کانی‌سازی محدوده کانسار سنگان داشته است که به طور عمده این کانی‌سازی در امتداد شکستگی‌های با روند شرقی- غربی رخ داده است ولی با تغییر جهت حرکت گسل درونه از راست‌لغزی به چپ‌لغزی و وارون‌شدگی جهت تنش موثر، در منطقه فاز مخربی ایجاد شده است که نقش حایز اهمیتی در شکل‌گیری ساختارهای حال حاضر ناحیه سنگان داشته است. جابه‌جایی عدسی‌های آهن را می‌توان از اثرات مخرب این فاز به شمار آورد که بیشتر به وسیله شکستگی‌های با روند شمالی- جنوبی رخ داده است. این تغییر الگوی تکتونیکی باعث به هم خوردگی وضعیت قرارگیری ساختارهای موجود شده است. گسل دردوی در نتیجه این تغییر سازوکار تشکیل شده است. گسل‌های دیگری نیز با روندی موازی گسل دردوی همچون گسل C، بر اساس همین سازوکار تشکیل شده‌اند.

دسته‌بندی ساختارها بر اساس مطالعه تصویر ماهواره‌ای و مشاهدات صحرایی و همچنین جابه‌جایی‌های بزرگ در ناحیه سنگان، مکانیزم ریدلی را در ذخیره C شمالی نشان می‌دهد (شکل ۶). بر اساس مدل ارائه شده توسط دیویس و رینولد^{۱۲} [۴۱]، مدل و الگوی ساختاری ذخیره C شمالی را بدین صورت می‌توان تشریح کرد. در این مدل می‌توان، گسل C که چپ‌لغز است را به عنوان سطح اصلی، گسل‌های امتدادلغز چپ‌گرد در راستاهای شمال شمال‌شرق- جنوب جنوب‌غرب را به عنوان ریدل‌های این سطح (R) و گسل‌های امتدادلغز راست‌گرد که در جهت شرقی- غربی امتداد دارند را به عنوان آنتی‌ریدل‌های این

همچنین قرار گرفتن دو محور σ_1 و σ_2 به صورت تقریباً افقی و یا با شیب کم، این نتیجه حاصل می‌شود که بر ناحیه مورد مطالعه، سازوکار کششی حکمفرماست (شکل ۱۰). این منطقه تحت تاثیر چندین مرحله زمین‌ساختی قوی قرار گرفته است و محور اصلی تنش افقی موثر بر شکستگی‌های منطقه شمالی- جنوبی با مکانیزم کششی است. این جهت با مکانیزم ساختارهای منطقه هم‌خوانی دارد. جهت تنش بیشینه افقی در ناحیه که در این جا، تنش σ_2 نقش آن را بازی می‌کند، از شمال‌شرق- جنوب‌غرب برای ساختارهای جنوبی تا شمال‌غرب- جنوب‌شرق برای ساختارهای شمالی منطقه به دست آمده است و بر اساس نظریه اندرسون^{۱۱} [۴۰]، انتظار می‌رود ساختارهای غالب از نوع شکستگی‌های کششی و گسل‌های نرمال باشند. با توجه به تحلیل‌های انجام شده در مقیاس محلی، جهات تنش به صورت شمال‌شرق- جنوب‌غرب، شمالی- جنوبی تا شمال‌غرب- جنوب‌شرق تغییر روند دارد. از دو جهت تنش افقی کششی، تنش با امتداد شمال‌غرب- جنوب‌شرق در زمان‌های جدیدتری از تنش با امتداد شمال‌شرق- جنوب‌غرب بر ناحیه اعمال شده است که با توجه به حرکات چپ‌لغزی گسل درونه قابل توجیه است. این قضیه را می‌توان با وضعیت قرارگیری محور σ_1 تنش به وجود آورنده دایک‌های جدید تشکیل شده در شمال ناحیه مورد مطالعه، اثبات کرد. فاز کششی حاصل از حرکت راست‌لغزی گسل درونه باعث شده است که در کل ناحیه سنگان تنش کششی با جهت افقی شمال‌شرق- جنوب‌غرب اعمال شود. بلوک‌های هورست و نیمه‌گرا بن تشکیل شده با امتداد تقریبی شرقی- غربی در منطقه شاهد این مطلب است.

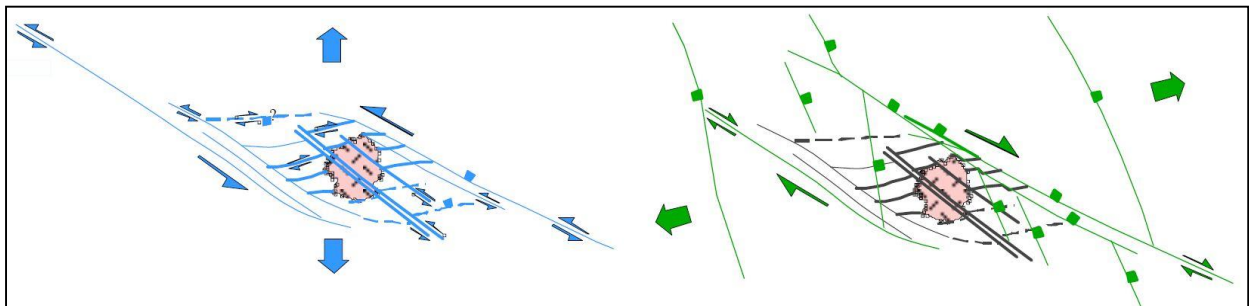


شکل ۱۰: استریونت برای تنسورهای تنش برای ذخیره C شمالی (محورهای σ_1 ، σ_2 ، σ_3 به ترتیب با اشکال دایره، مثلث و مربع نشان داده شده‌اند. دایره کوچک گوشه بالا سمت چپ بیانگر رژیم تکتونیکی اعمال شده بر منطقه است.)

روند شمالی- جنوبی به صورت گسل‌های نرمال شکل گرفته و محلول‌های هیدروترمال باقی مانده سبب ایجاد کانی‌زایی شده است. در مراحل بعدی فعالیت گسل‌های جوان‌تر (شمال‌غرب- جنوب‌شرق)، شرایط را برای جابه‌جایی زون‌های غنی شده فراهم ساخته است. در شکستگی‌های با روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق، عملکرد تنش به صورت برشی بوده است. روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق، غالب‌ترین روند است که بعد از کانی‌زایی^{۱۳} رخ داده است (شکل ۱۱). نتایج مطالعه ساختاری در ذخیره C شمالی نشان داده است که گسل‌های قبل از کانی‌سازی که در طول کانی‌سازی دوباره فعال شده‌اند، بخش مهمی از کنترل‌کننده‌های ساختاری ناحیه‌ای به محلی‌اند. این بدین دلیل است که بی‌قاعدگی‌های جانیشینی آن‌ها به طور کلی برای سینماتیک‌های دوباره فعال شده، با توجه به تخریب و گسترش آن نامناسب است. همچنین گسل‌های قدیمی‌تر با گسل‌های جوان‌تر که در قبل و هم‌زمان با کانی‌سازی ایجاد شده‌اند، قطع شده‌اند و بی‌قاعدگی‌هایی را برای تمرکز انشعابی فراهم کرده‌اند. سنگ‌های ناحیه سنگان، بر اثر این عوامل، دگرسانی هیدروترمال شدیدی را با یک توزیع نامنظم نشان می‌دهند که با سنگ‌شناسی میزبان و گسل‌های هم‌زمان با رسوبگذاری کنترل شده‌اند. در اثر عملکرد سیستم‌های گسلی حاکم بر منطقه، واحدهای سنگی به شدت خرد شده و در اثر برقراری چرخه سیالات هیدروترمال به درجات مختلف دگرسان شده‌اند (به ویژه در قسمت شمالی و غربی ذخیره مورد مطالعه). گسل‌های موجود در این ذخیره بر مبنای ارتباط با کانی‌زایی به دو دسته تقسیم‌بندی شدند: اول، گسل‌هایی که هم‌زمان با کانی‌زایی عمل کرده و زون‌های کانی‌سازی از آن‌ها پیروی می‌کند (شرقی- غربی) و دوم، گسل‌هایی که بعد از کانی‌زایی عمل کرده و زون‌های کانی‌سازی و گسل‌های قدیمی

سطح (R')، در نظر گرفت. این مدل بر اساس جهت‌های میدان تنش در اطراف گسل C و با جهت تنش بیشینه شمال‌غرب- جنوب‌شرق و جهت کمینه شمال‌شرق- جنوب‌غرب بنا نهاده شده است. بنابراین منطقه مورد مطالعه در زمان‌های مختلف نسل‌های مختلفی از رژیم‌های تکتونیکی را متاثر شده به طوری که در ابتدا تحت تاثیر فازهای کششی بوده و کانی‌زایی انجام گرفته است و در طی رخداد‌های بعدی تحت تاثیر گسل‌های امتدادلغز قرار گرفته و سازوکار برش ساده را شامل شده است. برش ساده باعث ایجاد چرخش در ساختارها شده است.

الگوی گسل‌ها و شکستگی‌ها و تنش‌های متفاوت سبب متمرکز شدن ماگما و یا حرکت آن در نواحی کم‌عمق پوسته می‌شود. بنابراین هندسه و سازوکار گسل‌های مرتبط با کانی‌سازی بسیار با اهمیت است. در ذخیره C شمالی سنگان نقش گسل‌ها، ایجاد راهروهایی برای جریان سیالات با منشا جوی و نیز ماگمایی است که زمینه را برای چرخش سیالات گرمایی فراهم کرده است. این مساله هم باعث ایجاد دگرسانی در سنگ‌های نفوذی و هم باعث انتقال فلزات به صورت کمپلکس‌های فلزی در سیالات مزبور و انتقال و ته‌نشست در نقاط مستعد و ایجاد کانسار شده است. گسل‌های اصلی با روند شرقی- غربی نیز وجود دارند که نسبت به سایر گسل‌های اشاره شده، طول زیادی دارند و نقش مهمی در جایگیری توده معدنی داشته‌اند. قدیمی‌ترین شکستگی‌ها روند شرقی- غربی دارند که با ماگما پر شده و در سیستم فشارشی ایجاد شده‌اند. گسل‌های با روند شمال‌شرق- جنوب‌غرب و حرکت آن‌ها بعد از شکستگی‌های ایجاد شده در اثر فعالیت این گسل و همچنین تجدید فعالیت گسل‌های قدیمی (شرقی- غربی)، باعث ایجاد سیستم‌های شکستگی در تشکیل ذخیره شده است. این فعالیت‌ها ادامه داشته و سپس شکستگی‌های با



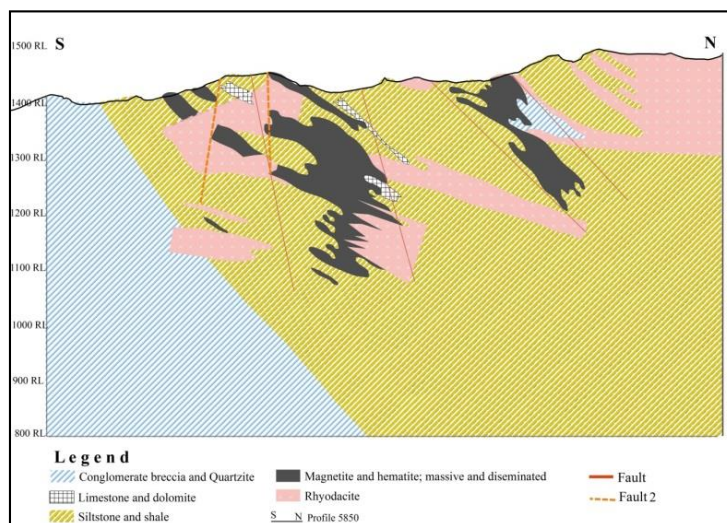
شکل ۱۱: ارایه مدل ساختاری هم‌زمان با کانی‌سازی (تصویر سمت راست) و بعد از کانی‌سازی (تصویر سمت چپ) در ذخیره C شمالی سنگان

صحرائی، گسل‌ها از مهم‌ترین ساختارها در ذخیره C شمالی بوده‌اند، به گونه‌ای که علاوه بر تاثیر در برهم ریختگی و جابه‌جایی‌های واحدهای سنگی در منطقه، بر روند و تمرکز کانی‌زایی هم نقش مهمی ایفا کرده‌اند. در ادامه، بر اساس اطلاعات زیرسطحی از ذخیره C شمالی، نمونه‌ای از مقطع زمین‌شناسی تهیه شده که به نحوه جایگیری توده معدنی در گسل‌های قدیمی شرقی- غربی و جابه‌جایی توده‌های معدنی اشاره می‌شود (شکل ۱۲). بررسی نقشه زمین‌شناسی و سایر شواهد صحرائی موجود در منطقه (سطحی و زیرسطحی)، روند کانی‌زایی خاص به صورت تقریبی جنوب‌شرقی- شمال‌غربی را نشان می‌دهد که موازی و در حاشیه توده‌های نفوذی گرانیتوئیدی شمال آن است. برداشت داده‌های ساختاری و تهیه نقشه زمین‌شناسی ساختاری نشان داده است که پستی و بلندی‌های منطقه به طور عمده از ساختارهای گسلی منطقه پیروی می‌کند و مناطق پست به طور عمده بر کف دره‌های حاوی شیل و سیلت‌استون مطابقت دارد و ارتفاعات نیز بر سنگ‌های آتشفشانی، نفوذی، کربناتی و سنگ آهن هماتیته و مگنتیتی منطبق است (شکل ۵).

در ناحیه مورد مطالعه، تحولات ساختاری بسیاری به چشم می‌خورد که اساسی‌ترین عامل این تحولات، نفوذ توده‌های بزرگ گرانیتی سرنوسر و برمانی به ترتیب در شمال و جنوب منطقه است که با فشارهای حاصل از نفوذ، باعث ساخت‌های مهم تکتونیکی در منطقه شده‌اند. بیشتر گسل‌های مهم منطقه سنگان در قسمت شرقی، روند شمالی- جنوبی به

را قطع کرده‌اند (بیشتر شمال‌غرب- جنوب‌شرق). همچنین بررسی‌های صحرائی نشان داده است که ذخیره C شمالی شکستگی‌های فراوانی دارد که در هنگام کانی‌سازی و بعد از کانی‌زایی رخ داده‌اند.

در ذخیره C شمالی، واحدهای سنگی اصلی در محدوده مورد مطالعه از قدیم به جدید شامل شیل، ماسه‌سنگ و سیلت‌استون سیلیسی شده، اسکارن حرارت پایین، توف سبز، گارنت اسکارن، کانی‌سازی مگنتیت و توده‌های نفوذی است. واحدهای رسوبی ژوراسیک بخش‌های وسیعی از شمال و شرق محدوده را می‌پوشانند و در برخی قسمت‌ها به سبب جانشینی متاسوماتیسم در اثر محلول کانه‌دار، کانی‌مگنتیت در آن‌ها تشکیل شده است. مگنتیت مهم‌ترین کانه آهن ذخیره C شمالی سنگان است. رخنمون‌هایی از توده مگنتیت متوسط تا پرعیار (بیش از ۴۵ درصد) و کم‌عیار (کمتر از ۳۵ درصد) با روند تقریبی شرقی- غربی و با شیب به سمت شمال به طور عمده در امتداد لایه‌بندی گارنت اسکارن و کمتر همراه با اسکارن حرارت پایین در جنوب‌غرب و مرکز محدوده مشاهده می‌شود. مگنتیت به صورت جانشینی با بافت متراکم و توده‌ای، پراکنده در متن سنگ، گاهی تکتونیکی و به موازات لایه‌بندی اسکارن است. بر اساس مشاهدات صحرائی، محلول کانه‌دار در امتداد گسل با روند شرقی- غربی در سنگ کربناته موجب متاسوماتیسم شده و در نهایت اسکارن آهن تشکیل شده است و گسل‌های جوان‌تر موجب جابه‌جایی و قطع امتداد کانی‌سازی شده‌اند. بر اساس مطالعات انجام شده و نتایج برداشت‌های



شکل ۱۲: نمونه‌ای از مقطع زمین‌شناسی در راستای شمال- جنوب به همراه موقعیت گسل‌ها و توده‌های معدنی در ذخیره C شمالی سنگان

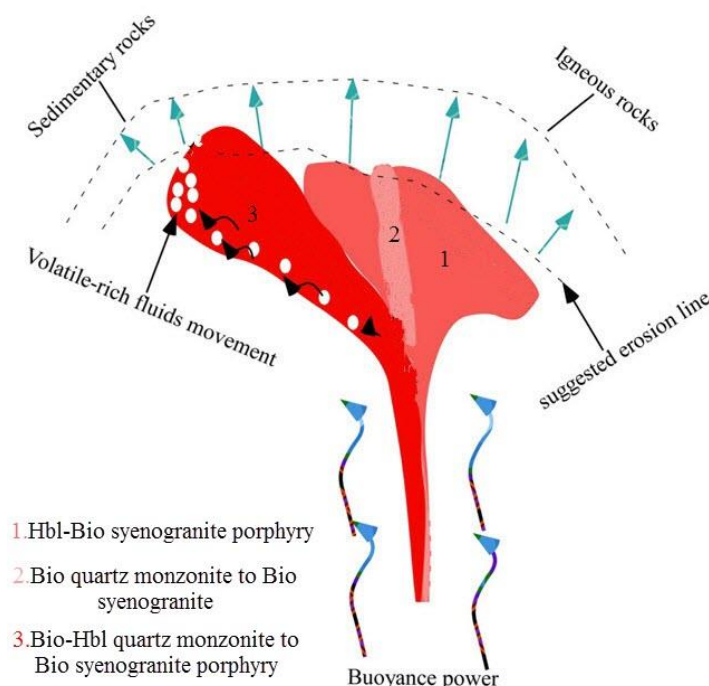
می‌بخشد. در ذخیره C شمالی سنگان، بسیاری از شکستگی‌ها تحت تاثیر گسل‌ها و زون‌های گسلی، ایجاد شده‌اند. سیالات متاسوماتیت در امتداد گسل با روند شرقی- غربی انتقال یافته و فرآیند اسکارنی‌شدن گسترده‌ای که منجر به ذخیره مگنتیت می‌شود، را ایجاد کرده است. گردش CO_2 ناشی از سنگ آهک به احتمال زیاد، باعث متاسوماتیسم شده است. مدل تشکیل ذخیره C شمالی سنگان در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۵- نتیجه‌گیری

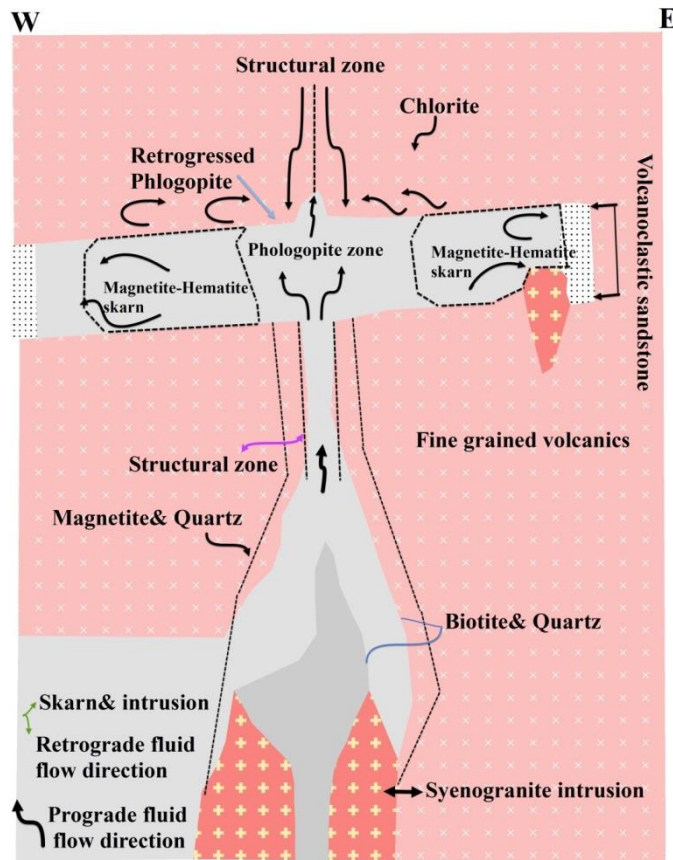
شناسایی عناصر ساختاری به ویژه گسل‌ها در بررسی‌های ساختاری و کانی‌زایی اهمیت بسزایی دارد زیرا محل برخورد گسل‌ها می‌تواند ناحیه مناسبی برای نفوذ ماگما و کانی‌زایی به ویژه برای اسکارن‌ها باشد. بر اساس مطالعه انجام شده، مدل ساختار ناحیه‌ای سنگان به صورت فرار تکتونیکی و تشکیل حوضه‌های جدایشی- کششی مطرح شده است. ویژگی‌های ساختاری ناحیه مورد مطالعه مانند گسل‌ها و چین‌خوردگی‌ها و همچنین امتداد سازندها از روند شمال‌غرب- جنوب‌شرق تا شرقی- غربی پیروی می‌کند. حوضه‌های رسوبی در محیط امتدادلغز توسعه یافته و به صورت لوزی شکل‌اند، به

خود گرفته‌اند و دلیل آن فشارهای ناشی از تزریق توده‌های نفوذی بوده که باعث جابه‌جایی شده است. بنابراین بررسی ترکیب توده‌های نفوذی، برای مدل تشکیل ذخیره ضروری است. بر اساس مطالعات انجام شده در محدوده ذخیره C شمالی سنگان، توده‌های نیمه‌عمیق شناسایی شده شامل سه گروه، بیوتیت- هورنبلند کوارتز مونزونیت پورفیری تا بیوتیت سینوگرانیت پورفیری، بیوتیت- کوارتز مونزونیت پورفیری تا بیوتیت سینوگرانیت پورفیری و هورنبلند- بیوتیت سینوگرانیت پورفیری می‌شود. این توده‌ها با سن ترشیاری در واحدهای رسوبی منطقه نفوذ پیدا کرده‌اند. بر اساس مطالعات سن‌سنجی توسط ملک‌زاده و همکاران، توده‌های نفوذی در این محدوده معدنی قدیمی‌تر از فرآیند اسکارنی‌شدن‌اند و توده‌های نفوذی نسبت به کانی‌سازی و اسکارن به علت قدیمی بودن دچار دگرسانی شده‌اند [۴۲]. مدل شماتیک که نشان‌دهنده نوع تحرک احتمالی، سازوکار ساختمان بیرونی و خروج سیالات ماگمایی در هنگام جاننشینی ماگما برای ذخیره C شمالی سنگان است، در شکل ۱۳، ارایه شده است.

شناسایی فرآیندهای مهم تشکیل‌دهنده ذخایر معدنی که کنترل‌کننده کانی‌سازی‌اند، کارایی مدل‌سازی معدنی را بهبود



شکل ۱۳: مدل شماتیک نشان‌دهنده نوع تحرک احتمالی، سازوکار ساختمان بیرونی و خروج سیالات ماگمایی در هنگام جاننشینی ماگما برای ذخیره C شمالی سنگان



شکل ۱۴: مدل تشکیل ذخیره C شمالی سنگان بر اساس شواهد زمین شناسی موجود

غربی، شمال شرق- جنوب غرب و شمال غرب- جنوب شرق تقسیم بندی شد. کانی سازی آهن در ذخیره C شمالی سنگان، به طور عمده با ساختارهای تکتونیکی کنترل و بر اساس مطالعات انجام شده، فعالیت کششی و فعالیت فشارشی در فرآیندهای تشکیل ذخیره معدنی سنگان، نقش عمده ای را ایفا کرده اند. رژیم تکتونیکی کششی ایجاد شده، علاوه بر تغییر شکل شکننده سنگ ها، سبب ایجاد فضای مناسب برای کانی سازی به ویژه در شکستگی های با روند شرقی- غربی شده است که نشان از ارتباط تکتونیک منطقه با فرآیند کانی زایی است. بر اساس مشاهدات صحرائی، محلول کانه دار در امتداد گسل با روند شرقی- غربی در سنگ کربناته موجب متاسوماتیزم شده و در نهایت اسکارن آهن تشکیل شده است و گسل های جوان تر موجب جابه جایی و قطع امتداد کانی سازی شده اند. بررسی نقشه زمین شناسی و کانی زایی در ذخیره C شمالی سنگان، روند کانی زایی را به صورت جنوب شرقی- شمال غرب نشان می دهد که موازی سایر واحدهای سنگی آتشفشانی و

طوری که فرورفتگی های جدایشی- کششی محدود به گسل در محیط های انتقالی تشکیل شده است. محل تشکیل ذخیره C شمالی نشان دهنده یک حوضه جدایشی- کششی، واقع در پایانه گسلی درونه است. منطقه مورد مطالعه به دلیل واقع شدن در موقعیت خاص زمین ساختی دارای تراکم زیادی از شکستگی هاست و عامل گسلش باعث جابه جایی عدسی های کانه دار در عمق شده است. با در نظر گرفتن حرکات گسل درونه در زمان های مختلف، رژیم کششی بر منطقه حکمفرما شده است. بر اساس مطالعه صحرائی ساختاری انجام شده و اطلاعات زیرسطحی، مهم ترین ساختار در ذخیره C سنگان، گسلی با امتداد شمال غرب- جنوب شرق در مابین توده های آنومالی C بوده است که از قسمت جنوبی مگنتیت های بخش شمالی و نیز بخش شمالی مگنتیت های بخش جنوبی توده C عبور می کند. با استناد به مطالعه انجام شده و نقشه های تهیه شده در ذخیره C شمالی سنگان، سیستم های گسلی در این ذخیره معدنی به سه گروه اصلی از قدیم به جدید، شرقی-

Geology Review, 21: 127–155.

رسویی در جنوب و شمال آن است.

- [9] Sillitoe, R. H. (2010). "Porphyry copper systems". Economic Geology, 105: 3-41.

۶- سپاس‌گزاری

- [10] Mohebi, A., Mirnejad, H., Lentz, D., Behzadi, M., Dolati, A., Kani, A., and Taghizadeh, H. (2015). "Controls on porphyry Cu mineralization around Hanza Mountain, south-east of Iran: an analysis of structural evolution from remote sensing, geophysical, geochemical and geological data". Ore Geology Review, 69: 187–198.

این پژوهش بخشی از رساله دکترای نگارنده اول در دانشگاه صنعتی امیرکبیر تهران است. همچنین این پژوهش در ارتباط با طرح پژوهشی شماره ۹۳۷۲-۳-۹۵، در تاریخ ۱۳۹۵/۱۰/۰۵ مابین دانشگاه صنعتی امیرکبیر و سازمان توسعه و نوسازی صنایع معدنی ایران (ایمیدرو) منعقد شده است. نگارندگان مقاله از مدیریت عملیات اکتشاف مجتمع سنگ آهن سنگان به خاطر فراهم کردن هماهنگی‌های لازم سپاسگزاری می‌کنند.

- [11] Berger, B. R., Ayuso, R. A., Wynn, J. C., and Seal, R. R. (2008). "Preliminary Model of Porphyry Copper Deposits". USGS (Open-File Report), pp. 1321.

- [12] Bierlein, F. P., Reynolds, N., Arne, D., Bargmann, C., McKeag, S., Bullen, W., Al-Athbah, H., McKnight, S., and Maas, R. (2016). "Petrogenesis of a Neoproterozoic magmatic arc hosting porphyry Cu-Au mineralization at Jebel Ohier in the Gebeit Terrane, NE Sudan". Ore Geology Review, 79: 133–154.

۷- مراجع

- [13] Cooke, D. R., Hollings, P., and Walshe, J. L. (2005). "Giant porphyry deposits: Characteristics, distribution, and tectonic controls". Economic Geology, 100: 801–818.

- [1] Groves, D. I., Bierlein, F. P., Meinert, L. D., and Hitzman, M. W. (2010). "Iron Oxide Copper Gold (IOCG) deposits through Earth history: implications for origin, lithospheric setting, and distinction from other epigenetic iron oxide deposits". Economic Geology, 105: 641–654.

- [14] Belousov, V. I., Belousova, I. V., and Filippov, Y. A. (2012). "The formation of hydrothermal-magmatic systems of skarn type". proceedings, Thirty-Seventh Workshop on Geothermal Reservoir Engineering Stanford University, Stanford, California, January 30 - February 1, SGP-TR-194.

- [2] Liang, H. Y., Sun, W., Su, W. C., and Zartman, R. E. (2009). "Porphyry copper-gold mineralization at Yulong, China, promoted by decreasing redox potential during magnetite alteration". Economic Geology, 104: 587–596.

- [15] Sawkins, F. J. (1990). "Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics". second ed. Springer-Verlag, pp. 351.

- [3] Klein, C. (2005). "Some Precambrian banded iron formations (BIFs) from around the world: their age, geologic setting, mineralogy, metamorphism, geochemistry, and origins". American Mineralogist, 90: 1473–1499.

- [16] Tittley, S. R. (1982). "Advances in Geology of the Porphyry Cu Deposits". University of Arizona Press, pp. 560.

- [4] Liu, L., Wan, C., and Zhao, Y. (2011). "Geodynamic constraints on orebody localization in the Anqing orefield, China: computational modeling and facilitating predictive exploration of deep deposits". Ore Geology Review, 43: 249–263.

- [17] Niemeyer, H., and Munizaga, R. (2008). "Structural control of the emplacement of the Portrerillos porphyry copper, central Andes of Chile". J. S. Am. Earth Science, 26: 261–270.

- [5] Nadoll, P., Mauk, J. L., Hayes, T. S., Koenig, A. E., and Box, S. E. (2012). "Geochemistry of magnetite from hydrothermal ore deposits and host rocks of the Mesoproterozoic Belt Supergroup, United States". Economic Geology, 107: 1275–1292.

- [18] Richards, J. P. (2003). "Tectono-magmatic precursors for porphyry Cu-(Mo-Au) deposit formation". Economic Geology, 96: 1515–1533.

- [6] Meinert, L. D., Dipple, G. M., and Nicolescu, S. (2005). "World skarn deposits". Economic Geology.

- [19] Safari, H., Bagas, L., and Shafiei Bafti, B. (2015). "Structural controls on the localization of Cu deposits in the Kerman Cu metallogenic province of Iran using geoinformatic techniques". Ore Geology Review, 67: 43–56.

- [7] Ciobanu, C. L. and Cook, N. J. (2004). "Skarn textures and a case study: the Ocna de Fier-Dognecea orefield, Banat, Romania". Ore Geology Reviews, 24: 315-370.

- [20] Laznicka, P. (2010). "Giant Metallic Deposits Future Sources of Industrial Metals". second ed. Springer-Verlag, Berlin, pp. 949.

- [8] Chernicoff, C. J., Richards, J. P., and Zappettini, E. O. (2002). "Crustal lineament control on magmatism and mineralization in northwestern Argentina: Geological, geophysical, and remote sensing evidence". Ore

- Antarctic orogeny*". *Geology*, 32: 721-724.
- [34] Mann, P. (2007). "Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems". *The Geological Society of London, Spec. Publ.*, 290: 13–142.
- [35] Mazhari, N., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Ghaderi, M. (2017). "Detecting and mapping different types of iron mineralization in Sangam mining region, NE Iran, using satellite image and airborne geophysical data". *Geosciences Journal*, 21: 137-148.
- [36] Haji, E. (2009). "Structural and Fractal analysis of fractures systems of Taknar of central iran by use of remote sensing and field study data". M.Sc. Thesis, Damghan University, Damghan, Iran, pp. 145.
- [37] Walker, R., Jackson, J., and Baker, C. (2004). "Active faulting and seismicity of the Dasht-e-Bayaz region, eastern Iran". *Geophysical Journal International*, 157: 265-282.
- [38] Almasi, A. (2015). "Mineralizaion, Petrogenesis and geochemical-geophysical exploration in Uch Palang-Sarsefidal area (Northeast of Kashmar)". Ph.D. Thesis, University of Ferdowsi, Mashhad, Iran.
- [39] Forster, H. and Jafarzadeh, A. (1994). "The Bafq Mining District in Central Iran- a Highly Minerlized Infracambrian Volcanic Field". *Economic Geology*, 89: 1697-1721.
- [40] Anderson, E. M. (1951). "The dynamic of faulting and dyke information with application to Britain". Oliver and Boyd, Edinburg.
- [41] Davis, G. H., and Reynolds, S. (1996). "Structural Geology of Rocks and Regions". Wiley.
- [42] Malekzadeh Shafaroudi, A., Karimpour, M. H., Golmohammadi, A. (2013). "Zircon U-Pb geochronology and petrology of intrusive rocks in the C-North and Baghak districts, Sangam iron mine, NE Iran". *Journal of Asian Earth Sciences*, 64: 256-271.
- [21] Pirajno, F. (2009). "Hydrothermal Processes and Mineral Systems". Springer Publication, pp. 1250.
- [22] Sibson, R. H. (2001). "Seismogenic framework for hydrothermal transport and ore deposition". *Reviews in Economic Geology*, 14: 25-50.
- [23] Cox, S. F., Knackstedt, M. A., and Braun, J. (2001). "Principles of structural control on permeability and fluid flow in hydrothermal systems". *Reviews in Economic Geology*, 14: 1-24.
- [24] Sepidbar, F., Mirnejad, H., and Mi, C. (2018). "Mineral chemistry and Ti in zircon thermometry: Insights into magmatic evolution of the Sangam igneous rocks, NE Iran". *Journal of Chemie der Erde*.
- [25] Karimpour, M. H. (2006). "Cu-Au mineralizaion accompany with magnetite- spicularite (IOCG) and examples in Iran". 9th Iranian geology society conference, University of Tarbiat Moallem, Tehran, Iran.
- [26] Golmohammadi, A., Karimpour, M. H., Malekzadeh Shafaroudi, A., and Mazaheri, S. A. (2014). "Alteration-mineralization, and radiometric ages of the source pluton at the Sangam iron skarn deposit, northeastern Iran". *Ore Geology Review*, 65: 545–563.
- [27] Alizadeh, E., Ghadami, G., Esmaeily, D., Changqian, M., Lentz, D., Omrani, J., and Golmohammadi, A. (2017). "Origin of 1.8 Ga zircons in Post Eocene mafic dikes in the Roshtkhar area, NE Iran". *International Geology Review*, 60(15): 1855-1882. DOI: 10.1080/00206814.2017.1396259.
- [28] Aghanabati, A. (2004). "Geology of Iran. Geological Survey of Iran". Report No. 35, pp. 230.
- [29] Aghanabati, A. (1995). "Geology of Iran. Geological Survey of Iran". Iran, pp. 606.
- [30] Muller R., and Walter R. (1983). "Geology of the Precambrian- Paleozoic Taknar inlier northwest of Kashmar, Khorasan province, NE Iran". *GSI. Rep*, 51: 165-183.
- [31] Tapponnier, P., and Molnar, P. (1977). "Active faulting and tectonics in China". *Journal of Geophysical Research*, 82: 2905-2930.
- [32] Javadi, H. R., Ghassemi, M. R., Shahpasandzadeh, Guest, B., EsterabiAshtiani, M., Yassaghi, A., and Kouhpeyam, M. (2013). "History of faulting on the Doruneh Fault System: implication for the kinematic changes of the Central Iranian Microplate". *Geological Magazine*, 1-22.
- [33] Robert, J., and Jacobs, J. (2004). "Himalayan-type indenter-escape tectonics model for the southern part of the late Neoproterozoic–early Paleozoic East African–

¹ Sangam Magmatic Complex (SMC)

² Transcurrent

³ Tectonic escape

⁴ Collisional shortening

⁵ Robert

⁶ Pull-apart

⁷ Jackson and Walker

⁸ Transtensional

⁹ Shortening

¹⁰ Dilation

¹¹ Anderson

¹² Davis and Reynolds

¹³ Post-mineralization



Imam Khomeini International University
Vol. 4, No. 2, Summer 2019, pp. 1-5



نشریه مهندسی منابع معدنی
Journal of Mineral Resources Engineering
(JMRE)

DOI: 10.30479/jmre.2019.9885.1210

Investigation of Effect of Structural Pattern on Mineralization Model in the C- North Ore Deposit, Sangan, NE Iran

Rezaei A.¹, Hassani H.^{2*}, Moarefvand P.³, Golmohammadi A.⁴

1- Ph.D Student, Dept. of Mining and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
alirezaei2013@aut.ac.ir

2- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
hhassani@aut.ac.ir

3- Associate Professor, Dept. of Mining and Metallurgy Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
parvizz@aut.ac.ir

4- Assistant Professor, Geological Survey and Mineral Exploration of Iran, Tehran, Iran
agolmohammadi@sioc.ir

(Received: 02 Jan. 2019, Accepted: 26 Mar. 2019)

Abstract: Structural systems related to iron ore mineralization in the Sangan mining region, northeastern Iran, have a direct relationship with the geometry of deformations. Fractures and faults, linear and planar structures and the influence of igneous bodies as the source of the fluids have the final effect of magmatism on mineralization. The purpose of this study was to investigate and identify the tectonic structures in C-North ore deposit, including a regional structural model with a structural model of ore deposit, and deposit formation model. Due to the location of the Sangan mining area at the end of one of the large-scale branching terminals of the Dorouneh fault, Sangan region is considered as part of the tectonic escape, and many structural functions in the area can be found in the Sangan ore deposits is due to the activity of this phenomenon. By investigating the existing faults in the area and performing a spatial density analysis for each fault series, a fault density map is generated which indicates the three fault systems in the C-North ore deposit. Based on intrusive body studies, the schematic diagram showing the probable accretion style, mechanism of outward building and exsolution of magmatic fluids during the emplacement of magma was presented along with the C-North ore deposit formation model. The results of studying of skarns and C-North ore deposits have great applied scientific significance and can be used for the study of skarn deposits.

Keywords: Structural model, Mineralization, Tectonic escape, C-North deposit, Sangan.

INTRODUCTION

Economic geologists have long recognized that hydrothermal deposits have a spatial relationship with faults and structural breaks or discontinuities [1,2]. The empirical relationships between ore deposits and major structures play an important role by providing a pathway for fluids to be focused into the upper crust

due to its high permeability and low strengths.

Mineralization occurs with several natural processes related to geological events such as structures, hydrothermal fluids, magmatism, and sedimentation, which are all essential for the exchange of mineralization characteristics, especially ore grade values and geometrical shapes [3-6]. Fault and fracture patterns also provide evidence of structural growth processes [7-9]. Main faults are important for the spatial distribution of ore deposit characteristics such as ore elements and geometrical shapes [4]. Structural features, specifically main strike-slip faults are important host structures of hydrothermal ore deposits in the world. Intraplate strike-slip fault systems can accommodate tens to hundreds of kilometres of horizontal displacement between adjacent lithospheric blocks [10,11]. They typically include almost straight belts alternated with bends and offsets in individual segments, each of them consisting of complex arrays of anastomosing fault strands [12]. The total stress field results from the interplay between the stress field produced by fault motion (i.e. the kinematically-induced stress) and the regional stress field [13]. Strike-slip, transpressional and transtensional fault segments typically coexists along intraplate strike-slip fault systems [10]. This may occur at different scales and may result in the development of very complex fault patterns (in space, time and kinematics; [14]). However, mineralization does not occur uniformly along individual strike-slip faults. In view of the expansion of the mining works, a better knowledge of the deposit is required and a detailed structural work was carried out, taking advantage of artificial outcrops in the open pits. Various researchers attempt to quantify ore distribution and its relationship to lithology, structural features, alteration, metamorphism and deformation. These relationships are of great importance and essential for the mining and exploration industry.

Pull-apart basins are prominent features along continental transform margins which form in extensional to transtensional environments along fault bends or between two adjacent left- lateral faults or two right-lateral faults [15]. The geometry and the sedimentary fill of these basins are key sources of

Information concerning the tectonic history of the transform [16]. Bends or stopovers in the fault paths due to inhomogeneity and structural complexity of the continental crust become favourable locations for extensional and compressional deformation if the shear motion is oblique. In fact, pull-apart basins are depressions bounded on their sides by two or more strike-slip faults and on their ends by diagonal transfer faults. Moreover, while pull-apart is one of the most explored features in strike-slip fault regimes and its structure has been documented in many tectonic environments [10,17].

This paper focuses on the structural control processes associated with the formation of the C-North skarn system. Field observations are correlated with the regional scale tectonic settings in an effort to further investigate the link between the structural control processes, the emplacement of the magmatic rocks, determination of regional structural model with a structural model of ore deposit, and deposit formation model.

METHODS

The study area is located in the SE of the Khorasan-e-Razavi Province, approximately 280 km from the City of Mashhad, and in the end part of the Khaf-Kashmar-Bardskan Tertiary magmatic belt of Central Iran blocks along the regional E-W trending and the eastern segment of large scale old Dorouneh fault passing near the area. The Sangan Magmatic Complex (SMC) at the NE edge of the Lut block includes a thick pile of volcanic rocks intruded by younger granitoid stocks [18]. One of the most prominent areas for ore mineralization associated with the Tertiary volcanic-plutonic magmatism in NE Iran is the C-North skarn system within the Sangan ore district. Understanding the relationship between iron mineralization and the structural history of the C-North deposit is essential in the development of a formation model for the deposit. Structural study typically pertains to the observation, description and interpretation of structures that can be mapped in the field [18]. Kinematic analysis is a technique for analysing fault data (e.g. [19]), which permits to define the overall strain pattern in an area as well as testing for kinematic compatibility of faults sets. Structural data of faults in the study area are displayed as pole to fault stereogram, statistical contours, and rose diagrams. This analysis can only be performed in faults with slickenside lineation and definite shear sense; in the study area. A study of field observation from the C-North deposit was carried out to evaluate the role of effective processes in ore deposit formation.

FINDINGS AND ARGUMENT

The most important segments hosting iron deposits in the Sangan mining region are pull-apart basins, splay structures, releasing bends, and fault intersections. Localization of fluid flow within these segments is a fundamental aspect of the crustal-scale hydrothermal system that produced the Fe deposits in the study area. The C-North ore deposit is structurally controlled, few structural data have been reported apart from the attitude of the main ore deposits and some major faults. Based on field observations and regional geological evidences, the tectonic escape mechanism has considered in the study area. These tectonic features are the result of the clockwise and the counter clockwise rotations of the Dorouneh fault in the study area. A structural-tectonic model was developed to assess the occurrence of C-North ore deposit (Figure 1). The close relationship between macro- and meso-scale structural features implies a strong structural control on the ore deposit and suggests that these structures played a significant role in the (re) mobilization and subsequent concentration of the metals. The C-North iron ore deposit is characterized by three groups of faults (often normal and strike-slip faults). These tectonic settings are represented by E-W, NW-SE, and NE-SW trending faults. Based on the analysis of the structural geological characteristics, geology setting of the typical iron ore-deposit and ore-controlling factors in the area, we argue that the distribution of the deposits that occur in the strike-slip faults is controlled by two ore-controlling factors, i.e., carbonate strata, and interstratified fault zone, whereas the Fe deposits that occur around the Sangan granite were restricted by the thick bedded skarn (Figure 2).

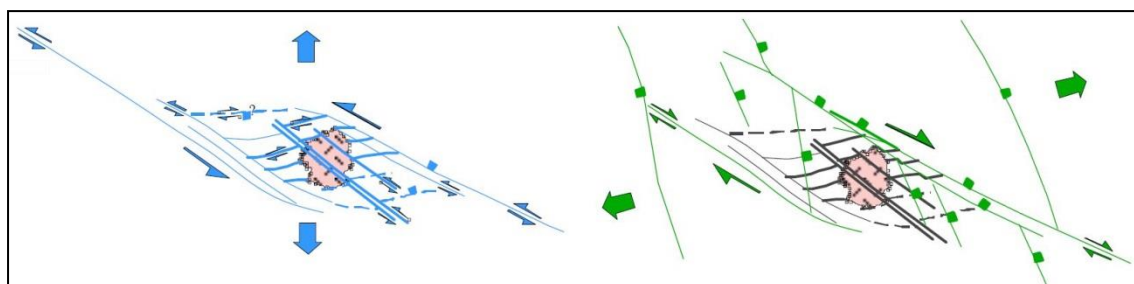


Figure 1. The map shows the control of structural style of the distribution of C-North iron ore deposit; Syn-mineralization (right side) and post-mineralization (left side)

CONCLUSIONS

Different ore types are associated with tectonic settings and structures, especially faults. The subvolcanic activity, hydrothermal alteration development, ore mineralization, and post-mineralization processes associated with the Sangan skarn system appear to be strongly controlled by the intersection of district and regional tectonic structures. Detailed structural data combined with field observations and structural analysis were used to define the main fault systems in the area, the relative age of faulting, as well as the role of the geological structures in the origin and the later evolution of the ore deposits. Based on comparisons with adjacent areas, a model for the tectonic evolution in the area was proposed. The proposed tectonic escape model could be useful in mining exploration in the region. It commenced as a pull-apart basin and developed as a natural response to tectonic escape-related strike-slip faulting subsequent to post-collisional intracontinental compressional tectonics during which sediments were intensely deformed. The tectonic regime in the Sangan region has changed from extension to shortening. Three phases of faulting were recognized and its relative ages defined based on crosscutting relationships, rock ages, field observations, and structural analyses. Faults of the first phase strike E-W, and host the main ore deposits in the area. This phase must have occurred prior to the age of the hydrothermal event. The inception of this phase as well as its regional tectonic significance remains to be precisely defined. The second extensional phase produced faults with NE-SW strikes, reactivating the F1 faults. We associate this phase with the formation of the Basin. The third phase produces faults with NW-SE strike. Geochemical features showed that the formation

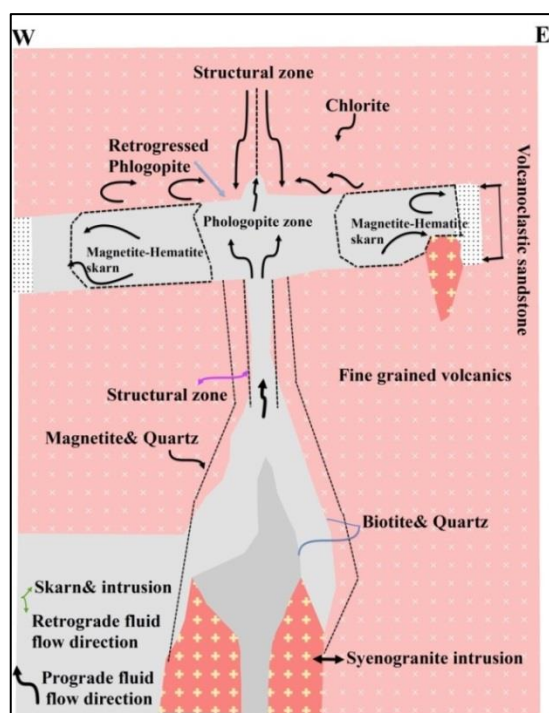


Figure 2. The ore-formation model and ore-controlling features of the C-North iron ore deposit

of most ore deposits in this district be associated with the faults and the formation process of these faults. These results contribute to further understanding of processes controlling the mineral deposit formation and investigate structural controls on ore deposition.

REFERENCES

- [1] Groves, D. I., Goldfarb, R. J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S. G., and Robert, F. (1998). "Orogenic gold deposits: A proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types". *Ore Geology Reviews*, 13:7-27.
- [2] Bierlien, F. P., Christie, A. B., and Smith, P. K. (2004). "A comparison of orogenic gold mineralization in central Victoria (AUS), western South Island (NZ) and Nova Scotia (CAN)-implications for variations in the endowment of Paleozoic metamorphic terrains". *Ore Geology Reviews*, 25: 125-16.
- [3] Sillitoe, R. H., and Perello, J. (2005). "Andean copper province: Tectonmagmatic settings, deposit types, metallogeny exploration and discovery". in Hedenquist, J., Goldfarb, R. and Thompson, J. (eds.), *Economic Geology 100th Anniversary Volume*, Society of Economic Geologists, 845-890.
- [4] Pirajno, F. (2009). "Hydrothermal Processes and Mineral Systems". Springer, pp. 1250.
- [5] Laznicka, P. (2010). "Giant metallic deposits Future sources of industrial metals". 2nd ed.: Berlin, Springer-Verlag, pp. 949.
- [6] Muto, J., Nakatani, T., Nishikawa, O., Nagahama, H. (2015). "Fractal particle size distribution of pulverized fault rocks as a function of distance from the fault core". *Geophysical Research Letters*, 42: 3811-3819.
- [7] Olson, J. E. (1993). "Joint pattern development: effects of subcritical crack growth and mechanical interaction". *Journal of Geophysical Research*, 98: 12251-12265.
- [8] Olson, J. E. (2004). "Predicting fracture swarms and the influence of subcritical crack growth and the crack-tip process zone on joint spacing in rock". In: Cosgrove, J.W., Engelder, T. (Eds.), *The Initiation, Propagation, and Arrest of Joints and Other Fractures*, Geological Society, London, Special Publication, 231: 73-87.

- [9] Gillespie, P., Casini, G., Iben, H., O'Brien, J. F. (2017). "Simulation of subseismic joint and fault networks using a heuristic mechanical model". In: Ashton, M., Dee, S. J., Wennberg, O. P. (Eds.), Subseismic-scale Reservoir Deformation, Geological Society, London, Special Publications, 459(1):177. <http://dx.doi.org/10.1144/SP459.6>.
- [10] Woodcock, N. H., and Schubert, C. (1994). "Continental strike-slip tectonics". In: Hancock, P. L. (Ed.), Continental Tectonics. Pergamon Press, Oxford, 251–263.
- [11] Storti, F., Holdsworth, R. E., and Salvini, F. (2003). "Intraplate strike-slip deformation belts". In: Storti, F., Holdsworth, R. E., Salvini, F. (Eds.), Intraplate Strike-slip Deformation Belts Geological Society, London, Special Publication, 210: 1–14.
- [12] Faulkner, D. R., Lewis, A. C., and Rutter, E. H. (2003). "On the internal structure and mechanics of large strike-slip fault zones: field observations of the Carboneras fault in southeastern Spain". Tectonophysics, 367: 235–251.
- [13] Mandl, G. (2003). "Faulting in Brittle Rocks. An Introduction to the Mechanics of Tectonic Faults". Springer, Berlin, pp. 434.
- [14] Sylvester, A. G. (1988). "Strike-slip faults". Geological Society of America Bulletin, 100: 1666–1703.
- [15] Smit, J., Brun, J. P., Cloetingh, S., and Ben-Avraham, Z. (2008). "Pull-apart basin formation and development in narrow transform zones with application to the Dead Sea basin". Tectonics, 27: 1-17. <https://doi.org/10.1029/2007TC002119>.
- [16] Hempton, M. R., and Dunne, L. A. (1984). "Sedimentation in pull-apart basins: active examples in eastern Turkey". Journal of Geology, 92: 513-530.
- [17] Mann, P. (2007). "Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining- and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems". The Geological Society, London, Special Publications, 290: 13–142.
- [18] Rezaei, A., Hassani, H., Moarefavand, P., and Golmohammadi, A. (2019). "Determination of unstable tectonic zones in C-North deposit, Sangam, NE Iran using GPR method: importance of structural geology". Journal of Mining and Environment, 10: 177-195.
- [19] Marrett, R., and Allmendinger, R. W. (1990). "Kinematic analysis of fault-slip data". Journal of Structural Geology, 12: 973-986.