اثر کنترل کننده‌های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه‌خوری (شمال‌باختر بیرجند)

خشایار کاویانی صدر [۱*]، محمد مهدی خطیب [۲] و محمدحسین زرین کوب [۳]

[۱] کارشناسی ارشد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
[۲] استاد، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران
[۳] دانشیار، گروه زمین‌شناسی، دانشکده علوم، دانشگاه بیرجند، بیرجند، ایران

تاریخ دریافت: ۱۳۹۲/۰۹/۱۱ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۲/۱۲/۲۱

چکیده

منطقه چشمه‌خوری به‌طور عمده پهنه‌ای است از گسل‌های موازی- نردبانی که در امتداد آنها کانی‌سازی از نوع فلزی و غیر فلزی صورت گرفته است. کنترل‌کننده‌های ساختاری به عنوان عاملی مهم در تشکیل عناصر ساختاری این منطقه نظیر دایک، گسل، درزه، چین و به‌ویژه رگه‌های معدنی به‌شمار می‌آیند. دایک‌ها در سه نوع گوه‌ای با راستای E-W، چین‌خورده با راستای NW-SE و حلقوی بوده که وضعیت هریک به نحوی در کنترل جنبش‌های ساختاری منطقه است. اعمال یک رژیم فشاری- برشی چپ‌بر ناحیه‌ای روی گسل‌های موجود، منجر به چرخش پادساعتگرد بلوک‌های آندزیتی در مقیاس بزرگ و شکل‌گیری ساختاری قفسه کتابی در کل محدوده گشته است. چرخش این بلوک‌ها افزون بر ایجاد فضای باز و در پی آن نفوذ محلول‌های گرمابی کانه‌دار و بروز دگرسانی‌های گسترده، سبب تشکیل پهنه‌های برشی راست‌بر در امتداد گسل‌ها شده که فاز کانی‌زایی در قالب رگه‌ای در کنترل درزه و شکستگی‌های فرعی این پهنه‌ها است. تشکیل رگه‌های معدنی تحت تأثیر پهنه‌های برشی راست‌بر ساختار قفسه کتابی در منطقه و بیان پیچیدگی‌ها و مؤلفه‌های پی در پی ساختاری یادشده تا رسیدن به مرحله نحوه جایگیری ماده معدنی، به ارائه مدلی آزمایشگاهی انجامید که تطابق مناسب نتایج حاصل از دیگر بررسی‌ها با مدل‌سازی را در پی داشت.

کلید واژه‌ها: بیرجند، چشمه‌خوری، پهنه برشی، کنترل کننده ساختاری، ساختار قفسه کتابی، رگه معدنی، دایک.

***نویسنده مسئول:** خشایار کاویانی صدر
E-mail: khashayargeologist@yahoo.com

۱- پیش‌نوشتار

محدوده مطالعاتی چشمه خوری بین عرض‌های جغرافیایی ″۲۳ ′۱۱ °۳۳ تا ″۳۴ ′۱۵ °۳۳ شمالی و طول‌های جغرافیایی ″۵۷ ′۲۱ °۵۸ تا ″۰۶ ′۲۵ °۵۸ خاوری و در فاصله ۱۲۰ کیلومتری شمال‌باختر بیرجند و در شمال روستای خور از توابع استان خراسان جنوبی واقع شده است. این ناحیه از نظر تقسیم‌بندی ایالت‌های ساختاری پوسته ایران در خاور خرد قاره ایران مرکزی در حاشیه شمال‌باختری پهنه لوت قرار گرفته است. سامانه گسلی نهبندان که تمامی ایالات ساختاری سیستان را در بر می‌گیرد، در بخش شمالی با تغییر جهت به طرف باختر به صورت تداخلی وارد پهنه لوت می‌شود (خطیب، ۱۳۷۷). منطقه چشمه خوری نیز در باختری‌ترین محل این تغییر روند ساختاری واقع شده که تحت تأثیر سرشاخه‌های (Splay) شمالی سامانه گسلی مزبور قرار گرفته است. سیمای منطقه را عموماً سنگ‌های آتشفشانی و حدواسط سنوزوییک به صورت توده‌های آندزیتی، آندزیت بازالت، داسیت و ریوداسیت نفوذی تشکیل داده‌اند (لطفی، ۱۳۷۴) که در برخی موارد موجبات ایجاد دگرسانی و کانه‌زایی را فرآهم آورده‌اند. آذرآواری‌ها نظیر توف‌های اسیدی دگرسان شده و برش‌ها با قطعات سنگی آندزیت نیز در منطقه وجود داشته و واحدهای غیرآتشفشانی نظیر کنگلومرا، ماسه‌سنگ، پلایاهای نمکی و آبرفت‌های جوان در منطقه یافت می‌شوند. دگرسانی‌ها در منطقه عبارتند از آرژیلیک، سریسیتیک و سیلیسی و شواهد سنگ شناسی و ژئوشیمیایی منطقه چشمه خوری، حکایت از ارتباط ژنتیکی سنگ‌های آتشفشانی با یکدیگر و تأثیر آلایش ماگمایی در روند شکل‌گیری و تحول این سنگ‌ها دارد (سلیم، ۱۳۹۱). در واقع واحدهای آتشفشانی شمال خور نتیجه نفوذ واحدهای ساب‌ولکانیک با ترکیب حد واسط ائوسن- الیگوسن به درون واحدهای آتشفشانی کالک آلکالن پالئوسن- ائوسن است (Tarkian et al., 1983; Pang et al., 2013). اما در حالت کلی می‌توان گفت که فاصله زمانی ۳۳ تا ۴۲ میلیون سال قبل (ائوسن میانی تا اوایل الیگوسن) مهم‌ترین پنجره زمانی کانی‌سازی در بلوک لوت، به ویژه در محدوده استان خراسان جنوبی است (کریم‌پور و همکاران ۱۳۹۱). کانی‌سازی در مناطق همجوار چشمه خوری از نوع مس پورفیری و اپی‌ترمال از نوع رگه‌ای معرفی شده‌اند (Malekzadeh Shafaroudi & Karimpour, 2013). در خصوص محیط زمین‌ساختی این مجموعه نظرات مختلفی مطرح شده که برخی از آن به عنوان یک کمان غنی شده قاره‌ای مرتبط با فرورانش اشاره کرده (سلیم، ۱۳۹۱) و همچنین طی سازوکار افرازگیری در محل برخورد، جداشدگی بخشی زیرین پوسته قاره‌ای تحت تأثیر انفکاک پوسته‌ای (Dilamination) و در کل حاصل از ماگماتیسم پس‌برخوردی (Post Collisional) قاره‌ای در سرتاسر پوسته ایران به عنوان بخشی از کمربند کوهزایی آلپ- هیمالیا می‌دانند (Pang et al., 2013). برخی نیز کانی‌سازی را به وجود شرایط کششی نسبت داده‌اند (Tarkian et al., 1983 و سامانی و اشتری، ۱۳۷۱). از طرفی عده‌ای با رد شرایط کششی، وجود کانی‌سازی در این منطقه و مناطق همجوار را نتیجه پهنه فرورانش و مرحله تصادم در بلوک لوت می‌دانند (کریم‌پور و همکاران، ۱۳۸۶).

چرخش بلوک‌های سنگی درون پهنه‌های برشی در مقیاس‌های مختلف و در راستای گسل‌های موازی با هم، سبب تشکیل ساختاری قفسه کتابی می‌شود که مقدار این چرخش وابسته به میزان جنبش پهنه برشی است (Davis & Reynolds, 1996). از طرفی دگرشکلی‌های مرتبط با نیروهای زمین‌ساختی در پوسته توسط فرایندهای برشی مشخص می‌شوند (Brown & Solar, 1998;Peacock, 2002; Wang & Ludman, 2004; Brogi, 2006) بنابراین داشتن شناختی درست از پهنه‌های برشی کمک شایانی به تحلیل هندسی عناصر ساختاری در هر منطقه می‌کند (Micklethwaite et al., 2010).

ارتباط کنترل کننده‌های ساختاری با توده‌های نفوذی در مناطق متأثر از فعالیت‌های ماگمایی، در شناسایی و کشف مواد معدنی بسیار حائز اهمیت است. به طور کلی محل برخورد گسل‌ها و همچنین محل برخورد شکستگی‌های فرعی

حاصل از پهنه‌های برش می‌تواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلول‌های کانه‌دار و کانه‌زایی باشد (Forster, 1978). در مسیر پهنه‌های بُرشی، شرایط مناسب برای تشکیل فضاهای باز و ژرف مرتبط با هندسه گسل‌های امتدادلغز فراهم می‌شود (Sylvester, 1988). برای شکل ساختاری و زمین‌ساختی پهنه‌های برشی، ضروری است بدانیم که چطور این ساختارها در پهنه‌های برشی توسعه می‌یابند (Lin, 2001). دگرشکلی‌های رویداده در پهنه‌های برشی هم‌زمان با زمین‌ساخت (Burg & Laurent, 1978) و غیر هم‌محور (Passchier & Simpson, 1986) می‌باشد. در پهنه‌های برشی چهار دسته شکستگی R، P، R' و T توسعه می‌یابند. افزون بر این یک سری شکستگی‌های بُرشی، تقریباً به موازات اثر پهنه بُرشی شکل می‌گیرند که همسو با آن عمل می‌کنند و به نام بُرش‌های (D) خوانده می‌شوند (Woodcock & Schubert, 1994) که تشکیل رگه‌های معدنی منطقه در کنترل یک یا چند مورد از شکستگی‌های یادشده است. تغییر ستبرای دایک‌ها و تشکیل آنها به صورت گوه‌ای درون شکستگی‌های D پهنه‌های برشی (Babiker & Gudmundsson, 2004) و به ویژه درون فضای باز حاصل از گسل‌های سازنده پهنه‌ها امکان‌پذیر است. تشکیل دایک‌های حلقوی نیز در مناطق تحت کشش پوسته قابل ردیابی است (Holohana et al., 2005). در این محدوده افزون بر موارد یادشده، سایر عناصر ساختاری نیز تحت تأثیر مستقیم و غیرمستقیم دیگر ساختارهای منطقه بوده به گونه‌ای که در این پژوهش تلاش شده تا به نقش این تأثیرات بر ساختارها پرداخته شود؛ بنابراین با تحلیل هر یک از عناصر ساختاری نظیر گسل‌ها، درزه‌ها، دایک‌ها، چین‌ها و رگه‌های موجود در منطقه و ارائه مدلی مناسب به نقش مهم کنترل کنندگی ساختارها و همچنین نحوه جایگیری ماده معدنی پرداخته می‌شود. شکل ۱ موقعیت زمین‌ساختی محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد. ابتدا به تحلیل هندسی عناصر ساختاری و همچنین نحوه جایگیری و نهشت ماده معدنی در بخش رگه‌های معدنی منطقه مورد مطالعه پرداخته می‌شود. در ادامه با ارائه مدلی آزمایشگاهی، وضعیت ساختاری منطقه و همچنین نحوه جایگیری ماده معدنی بررسی می‌شود و در انتها نیز الگوی ساختاری منطقه تبیین می‌شود.

۲- تحلیل هندسی عناصر ساختاری و نحوه جایگیری مواد معدنی منطقه در قالب رگه

۲-۱. گسل

گسل‌ها در منطقه دارای دو روند E-W و NW-SE هستند. یک جفت گسل موازی (گسل‌های F1 و F2) در شمال و جنوب محدوده با روند خاوری- باختری و سازوکار متوسط راستالغز چپ‌بر با مؤلفه معکوس که تحت تأثیر سرشاخه‌های بخش شمالی گسل نهبندان ایجاد شده‌اند، در قالب یک پهنه ترافشارشی چپ‌بر موجب دگریختی در منطقه شده است. از آنجا که منطقه چشمه خوری پهنه‌ای است از گسل‌های موازی- نردبانی که می‌توانند به‌عنوان گسل‌های از قبل موجود در دگرشکلی‌های دیرین پوسته ایران به‌شمار آیند (Berberian, 1983) و اکنون با ورود گسل‌های خاوری- باختری فوق و حاکم شدن پهنه چپ‌بر یادشده طی تکامل زمین‌ساختی خاور ایران، سبب لغزش راست‌بر این گسل‌ها و در پی آن چرخش پادساعتگرد بلوک‌های آندزیتی در خلال این جنبش شده که راستای شمال باختر- جنوب‌خاور (F3 تا F13) با میانگین سازوکار راستالغز راست‌بر و مؤلفه معکوس را به خود گرفته‌اند (سوی برش در مرز بلوک‌های آندزیتی با سوی برش پهنه چپ‌بر اصلی ناهمساز است). تکامل زمین‌ساختی خاور ایران، منجر به تغییر روند گسل‌های از قبل موجود می‌شود (Walker & Khatib, 2006) و پیشرفت این الگو، تشکیل فضای خالی و متعاقب آن راه‌یابی محلول‌های کانه‌دار و بروز دگرسانی‌های وسیع در راستای پهنه‌های برشی و همچنین تشکیل رگه‌های معدنی در قالب یک ساختاری قفسه‌کتابی در منطقه را سبب گشته که در برخی مناطق، نفوذ ماگما و تشکیل دایک‌ها را نیز در پی داشته است. در شکل ۲ به سه مورد از سازوکار گسل‌های منطقه به دلیل تشابه روابط زاویه‌ای- سازوکاری اشاره شده است. بنابراین می‌توان گفت جنبش گسل‌های چارچوب محدوده با راستای NW-SE، در کنترل پهنه برشی چپ‌بر ناحیه است.

۲-۲. درزه

عمده درزه و شکستگی‌های موجود در منطقه به دو صورت برشی و کششی که به صورت سامانه‌ای و فراوان دیده می‌شوند و در امتداد برخی از آنها کانی‌سازی صورت گرفته است. در بخش کوچکی از خاور محدوده نیز درزه‌های پرمانند به چشم می‌خورند.

– **دسته اول:** بیشتر از نوع برشی بوده و به صورت هم‌یوغ نسبت به هم در نتیجه تلاقی شکستگی‌های ریدل پهنه‌های برشی راست‌بر در راستاهای زاویه‌ای قابل انتظار این نوع شکستگی‌ها نسبت به راستای گسل‌های اصلی تشکیل شده و به طور میانگین دارای دو وضعیت N10W/75NE و N60W/70NE می‌باشند. برخی از این درزه‌ها می‌توانسته در ابتدا بر اثر سرد شدن گدازه تشکیل شده و پس از این انفصال اولیه، با تأثیر حاصل از تنش پهنه‌های برشی راست‌بر، بازفعال (Reactivate) شده باشند. بر روی صفحه این شکستگی‌ها آثار خش‌لغزهای ناشی از برش فراوان بوده (شکل ۳- الف) و در راستای برخی از آنها کانه‌زایی‌های با ارزش رخ داده است. مقدار فضای باز درزه‌ها در بخش‌های مختلف منطقه متفاوت بوده و در کنترل مقدار جنبایی پهنه برشی است که درزه‌ها در آن تشکیل شده‌اند.

– **دسته دوم:** عمده درزه‌ها را به طور پراکنده در منطقه تشکیل داده و از نوع درزه‌های کششی‌اند. برخی از این درزه‌ها نیز می‌توانسته در ابتدا بر اثر سرد شدن گدازه تشکیل شده و سپس با تأثیر پهنه برشی چپ‌بر اصلی منطقه دچار بازفعالی شده باشند. در راستای برخی از آنها پرشدگی کلسیت و آراگونیت به چشم می‌خورد و فاقد هرگونه کانه با ارزش معدنی‌اند. (شکل ۳- ب). دایک‌ها و اغلب توده‌های آندزیتی منطقه را با شیب تقریباً قائم قطع کرده و دارای وضعیت میانگین N25E/75NW می‌باشند (شکل ۳- ت).

– **دسته سوم:** از نوع پرمانند کششی که بیانگر پیشروی سریع درزه‌ها هستند و با استفاده از شکل متقارن و یا نامتقارن بودن آنها می‌توان جهت σ_1 را در این بخش تعیین کرد (قاسمی، ۱۳۸۷). تمرکز این درزه‌ها در خاور محدوده که قائم بودن محور σ_1 را نیز نشان می‌دهند، می‌تواند بیانگر نقش اعمال این تنش به صورت موضعی و ناشی از فشار صعود ماگمایی باشد که موجبات تزریق و تشکیل دایک‌های مجاور را نیز فراهم آورده است (شکل ۳- پ).

۲-۳. دایک

در این پژوهش به سه مورد شاخص از دایک‌های منطقه (حلقوی، گوه‌ای و چین‌خورده) پرداخته می‌شود:

– **دایک حلقوی:** این دایک با ترکیب آندزیتی و شیب دیواره با تغییرات 70^{o} تا 80^{o} به سمت مرکز حلقه است (شکل ۴- پ). تغییر روند و متعاقب آن سازوکار گسل F3 در منطقه منجر به تشکیل مناطق فشار و برخاستگی دو سویه توده آندزیتی (شکل ۴-الف) و کشش در اطراف گسل شده است. از آنجایی که نقش اعمال تنش بیشینه بر روی ساختارهای زمین‌شناسی منجر به کرنش ساختاری در موارد متعدد می‌شود (Ramsay & Huber, 1983)، به نظر می‌رسد نقش اعمال برآیند تنش بیشینه σ_1 در منطقه که در راستای NE-SW و حاصل از پهنه برشی چپ‌بر اصلی است، شکل بیضوی را برای دایک مزبور رقم زده است.

– **دایک گوه‌ای:** این دایک نیز با طول یک کیلومتر، با ترکیب آندزیتی، در راستای خاوری- باختری گسل F3 و در شمال دایک حلقوی قرار داشته و به نظر می‌رسد به سبب مجاورت با دایک حلقوی، منشأ ماگمایی هر دو یکسان بوده که مشابهت سنگ‌شناسی هر دو دایک گویای این امر است. تفاوت ستبرا در طول این دایک به

سبب چرخش پادساعتگرد بلوک‌ها، ناشی از جنبایی پهنه برشی چپ‌بر حاکم بر کل منطقه بوده که تغییر ستبرای آن از ۷ متر در بخش خاوری تا ۳۰ سانتی‌متر در باختر آن می‌رسد. وضعیت دایک به طور میانگین N270/80N است (شکل ۴- ب).

– دایک چین‌خورده: به علت قرارگیری این دایک بین دو گسل F3 و F4 که هر دو دارای سازوکار راستالغز راست‌بر بوده و تشکیل پهنه برشی راست‌بر می‌دهند؛ با توجه به ترکیب آندزیتی دایک و رئولوژی آندزیت‌ها، احتمالاً این فرایند در شرایط دمایی و فشاری خاص صورت پذیرفته تا جنبش پهنه برشی یادشده بتواند موجب چین‌خوردگی آن شود (شکل ۵).

۲-۴. چین

جنبش پهنه‌های برشی راست‌بر با راستای NW-SE بر روی واحدهای توفی و آذرآواری منطقه نیز باعث ایجاد چین‌خوردگی شده است. سازوکار تشکیل این چین‌ها نظیر آنچه است که درباره دایک چین‌خورده از آن یاد شد. به طور متوسط الگوی منحنی‌های تراز قطب‌های لایه‌بندی گویای وضعیت N53E/8 برای محور چین‌خوردگی (π-axis) می‌باشد که در شکل ۶ به نمونه‌ای از آن اشاره شده است.

۲-۵. رگه

با توجه به وجود پهنه‌های برشی متعدد در منطقه و همچنین انطباق وضعیت ماده معدنی در قالب رگه‌ای با روند درزه و شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های بُرش، می‌توان گفت که در مسیر این پهنه‌ها و در اثر تقاطع شکستگی‌های مزبور با یکدیگر، بلوک‌های گسلی حاصل شده‌اند. (شکل ۸- الف)؛ طرح هندسی بلوک‌ها تابع شکستگی‌ها بوده که بسته به نوع تقاطع آنها، بلوک‌های گسلی مختلف شکل می‌گیرند؛ با چرخش این بلوک‌ها در مقیاس‌های مختلف، شرایط مناسب برای تشکیل فضاهای باز و ژرف مرتبط با هندسه گسل‌های راستالغز فراهم می‌شود (Sylvester, 1988). فضاهای باز موجب تسهیل نفوذ آب‌های سطحی به اعماق، گرم شدن، افزایش انحلال‌پذیری و برگشت آنها به صورت محلول کانه‌دار به مناطق سطحی می‌شود؛ در ادامه اثر محلول‌های داغ بر روی سنگ‌های مسیر پهنه بُرشی، باعث ایجاد پدیده دگرسانی و متاسوماتیسم می‌شود (Williams, 1979).

با توجه به هندسه و چرخش بلوک‌های گسلی، حاشیه این بلوک‌ها بهترین مکان برای نهشت محلول‌های کانه‌دار و تشکیل رگه‌های معدنی هستند (خطیب، ۱۳۷۸؛ شکل ۸- ب)؛ به‌نحوی‌که ساختار رگه‌های معدنی از ساختار بلوک‌های گسلی با اشکال رمبوئدری تبعیت می‌کند (Nogole-sadate, 1985)، (شکل ۷). در این منطقه به دلیل تأثیر فرایندهای هوازدگی بر کانی‌سازی اولیه، کانی‌سازی ثانویه سولفیدی و اکسیدی گسترش وسیعی داشته و آلونیت (KAL3(SO4)2(OH)6) به مقدار زیاد و ژاروسیت (Kfe3(SO4)2(OH)6) هماتیت، گوتیت، اسپیکولاریت، مالاکیت، آزوریت، کالکوزیت به مقدار کمتر و همچنین بقایایی از کانی‌سازی اولیه نظیر پیریت،کالکوپیریت و مگنتیت به چشم می‌خورد. با توجه به نوع دگرسانی‌ها (آرژیلیک، پروپیلیتیک، سریسیتیک، سیلیس) و ناهنجاری‌های عناصر مس، روی، نقره و مولیبدن و حضور کانی‌سازی به صورت رگه‌ای، رگچه‌ای و پراکنده و ارتباط کانی‌زایی با سیستم شکستگی‌ها در کانسار شکسته سبز - در همسایگی محدوده چشمه‌خوری- که به عنوان کانسار اپی‌ترمال نوع رگه‌ای معرفی شده (جاویدی مقدم و همکاران، ۱۳۹۲)، و همچنین سرب و روی و مس (شورک)، مس (حوض‌دغ، مهرخش، رشیدی و غار کفتری) (لطفی، ۱۳۷۴) و کانی‌سازی طلای اپی‌ترمال خونیک (سمیعی و همکاران، ۱۳۹۰) در مناطق مجاور، می‌توانند به عنوان مهم‌ترین کلیدهای اکتشافی، ارتباط این مناطق را با کانی‌سازی‌های مس پورفیری- رگه‌ای و اپی‌ترمال‌های مرتبط نشان دهند. منطقه چشمه خوری نیز می‌تواند در یک یا چند مورد از این قالب‌ها جای گیرد که با توجه به آنکه در این پژوهش بر جنبه‌های ساختاری منطقه تأکید بیشتری شده، بنابراین برای پی بردن به نوع دقیق و منشأ کانی‌سازی، نیاز به مطالعات وسیع‌تری از طریق سایر شاخه‌های زمین‌شناسی در منطقه است. در نهایت با بیش از ۳۰۰ برداشت از وضعیت رگه‌های معدنی منطقه در ایستگاه‌های مختلف در حالت کلی می‌توان گفت که رگه‌ها در کنترل انواع فضاهای باز و شکستگی‌های ریدل حاصل از جنبش پهنه‌های برشی راست‌بر موجود در منطقه تشکیل شده‌اند. شکستگی‌های کششی T محدوده فاقد کانه ارزشمند معدنی بوده و تنها در راستای برخی پرشدگی‌های کلسیت و آراگونیت با رشته‌های مایل به چشم می‌خورد. گفتنی است که شکاف‌های کششی در جهت موازی با σ_1 جهت‌یابی شده و معمولاً با کانی‌های فیبری که در جهت σ_1 رشد کرده‌اند پر می‌شوند (Pollard et al., 1982).

ظهور مراحل مختلف رشد در رگه‌ها، حکایت از پویایی یک پهنه برشی دارد (Brathwaite et al., 2001). در این منطقه نیز روند رشد فیبرها درون برخی رگه‌ها کمی مایل بر امتداد رگه بوده که بروز خمیدگی در راستای رشد فیبرها بیانگر رشد غیر هم‌محور است (شکل ۹). موقعیت متوسط انواع مختلف رگه در منطقه به صورت N55W/25NE، N80W/40NE، N10W/60NE، N20W/85NE و N60W/80NE که به ترتیب منطبق بر شکستگی‌های R، P، T, R’ و D پهنه‌های برشی راست‌بر می‌باشد (شکل ۱۰) که عمده رگه‌های معدنی در کنترل شکستگی‌های فرعی R و P این پهنه‌ها شکل گرفته‌اند. در شکل ۷ تصویر نمادین نمونه‌ای از تغییر موقعیت رگه‌های معدنی ناشی از هندسه گسل‌های فرعی همراه با بزرگ‌نمایی نمادین هندسه بخشی از حاشیه کانی‌زایی شده بلوک‌های رومبوئدری که تا N مرتبه قابل تکرار می‌باشند نشان داده شده است.

۳- مدل‌سازی تجربی

برای نشان دادن مواردی که در فوق به آنها اشاره شد در آزمایشگاه اقدام به تهیه مدلی منطبق با محدوده شد که مراحل آن به شرح ذیل است:

در ابتدای این بخش گفتنی است که این مدل چگونگی تشکیل پی در پی انواع ساختارها تا مرحله نحوه جایگیری ماده معدنی را نشان داده و در طراحی آن سعی بر آن شده تا تطابق اصول کلی این فرایند بین مدل و بخشی از منطقه مورد مطالعه مد نظر قرار گیرد؛ چرا که اعمال چند عامل ساختاری و انطباق جزئیات کامل آن با صحرا در یک مدل پیوسته و متوالی از نظر تشکیل ساختارهای متفاوت، کار بسیار دشوار و بعیدی است (moore & Byerlee, 1992). در ارائه مدل تنها به نمونه‌ای از پهنه‌های برشی موازی با هم در قالب بخشی از ساختار قفسه‌کتابی بسنده شده و از آوردن پهنه‌های برشی بیشتر به سبب اختصار و همچنین مشابهت روابط زاویه‌ای- ساختاری اجتناب شده است. دستگاه مورد استفاده در آزمایش متشکل از چهار پایه، دو فک متحرک و جعبه دنده می‌باشد که از دو جهت با شیشه محدود شده است. ابزار آزمایش عبارتند از دو گوه و بلوک‌های چوبی که اندازه و مقیاس آنها با توجه به مقیاس خطی تعبیه شده بر حسب سانتی‌متر در کنار آزمایش قابل تشخیص است. آزمایش طی ۷ مرحله، در مدت زمان ۲ ساعت و هر بار با نزدیک شدن دو فک دستگاه با اندازه ۱ سانتی‌متر و اعمال برش ساده بر روی مدل انجام شد. از این میان تنها تصاویر سه مرحله برش ساده به طور میانگین و جهت اختصار نشان داده شده (شکل‌های ۱۱- ج، چ ، ح) و شرح کلی مراحل به قرار زیر است:

۱- سه قطعه چوب موازی که نسبت ۱:۵ طول به عرض در آنها رعایت شده و با زاویه شیب میانگین ۶۰ درجه (متوسط شیب گسل‌های منطقه) در کنار هم قرار گرفته‌اند و حواشی آن به منظور تسهیل در چرخش گرد شده‌اند (شکل ۱۱- الف).

۲- به کارگیری از دو گوه چوبی با زاویه حاده متناسب با زاویه ریک گسل‌های چپ‌بر منطقه به منظور اعمال برش ساده در آزمایش (شکل ۱۱- ب). ۳- پر کردن فضاهای خالی با گل رس (شکل ۱۱- پ) طول این بخش ۳۱ سانتی‌متر و عرض آن ۱۹ سانتی‌متر است. ۴- پوشاندن کل مجموعه با گچ کشته شده زرد رنگ (شکل ۱۱- ت). ۵- گذاردن دوایر رنگی به منظور مشاهده بیضوی کرنش در هر

بخش از مدل و مشخص کردن شماره هر دایره (شکل ۱۱- ث). ۶- به حرکت در آوردن اهرم دستگاه و اعمال یک سامانه برشی چپ‌بر و متعاقب آن ظهور پهنه‌های برشی راست‌بر (شکل ۱۱- ج). ۷- تشکیل شکستگی‌های فرعی R، P و R′ درون پهنه‌های برشی راست‌بر (شکل ۱۱- چ). ۸- افزایش برخاستگی معکوس بلوک‌های چوبی، مشاهده می‌شود که در حاشیه بلوک‌ها، فضای باز ناشی از چرخش پادساعتگرد بلوک‌ها، بستر مناسبی جهت نفوذ ماگما یا محلول‌های گرمابی پدید می‌آورد. تشکیل دایک گوه‌ای منطقه نیز درون فضای باز حاصل از چرخش بلوکی نشان داده شده است (شکل ۱۱- ح).

در ادامه با توجه به آنکه جایگیری و نهشت مواد معدنی در منطقه مورد مطالعه متأثر از جنبش پهنه‌های برشی راست‌گرد است، سعی بر آن شده تا به نحوه چرخش بلوکی تحت تأثیر پهنه‌های راست‌بر و ایجاد فضاهای باز و متعاقب آن جایگیری و نهشت مواد معدنی درون فضاهای باز پرداخته شود. بدین منظور به عنوان مثال در بخشی از یک پهنه راست‌بر، یک المان جزئی را در نظر گرفته (شکل۱۱- ح) و با بزرگ‌نمایی آن، مدل‌سازی انجام گرفت (شکل ۱۱- خ تا ۱۱- ر). این بار به منظور استفاده بهینه، مجدداً از همان تخته چوب‌ها که دارای برش‌هایی با شیب ۶۰ درجه بودند، با ایجاد برش‌هایی دیگر با امتداد و شیب متغیر و با تعبیه آنها در یک پهنه برش راست‌بر استفاده شد. طی پنج دقیقه، ۵ مرحله برش ساده در این بخش از مدل اعمال شد که تنها به دو مرحله میانگین در تصویر اشاره شده است (شکل‌های ۱۱-ذ، ر).

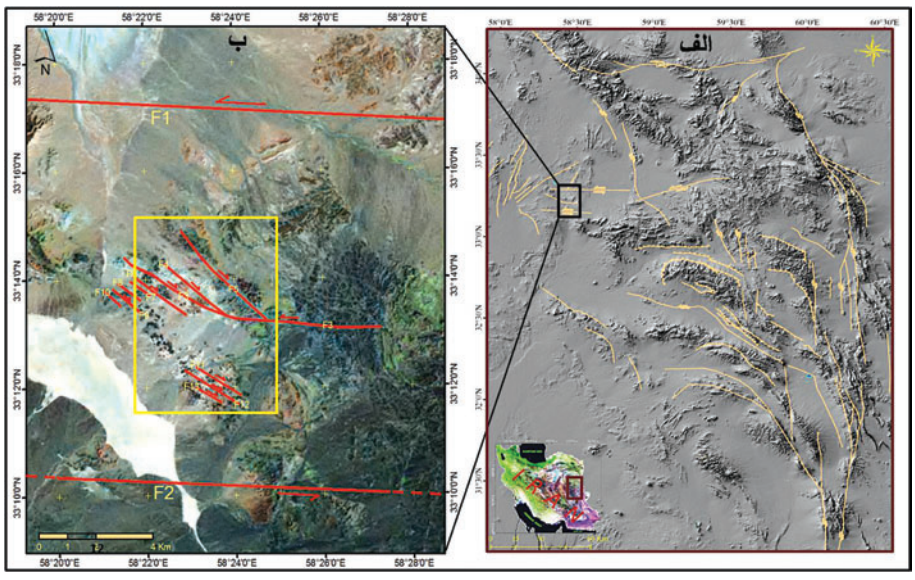
فرایند آزمایش: ۱- ایزوله کردن قالب مدل توسط گل رس و ریختن مخلوط شاره روغن خودرو و پودر سنگ درون قالب به منظور نشان دادن چگونگی نفوذ محلول‌های کانه‌دار درون شکستگی‌ها (شکل ۱۱- خ). ۲- قرار دادن بلوک‌های چوبی بر روی شاره اشاره شده. در شکل ۱۱- د، با نمایی دیگر از یک بلوک رومبوئدری مستقل و سعی در نمایش سه بعدی آن بر روی تصویر، تلاش شده تا تفاوت شیب‌ها و امتدادهای متفاوت نشان داده شود. ۳- چرخش اهرم دستگاه، اعمال یک پهنه برشی راست‌بر، حرکت بلوک‌ها در امتداد برش‌های ایجاد شده (شکستگی‌های فرعی پهنه برش)، چرخش ساعتگرد بلوک‌ها و تشکیل فضای باز بین بلوکی (شکل ۱۱- ذ). ۴- افزایش جنبش پهنه برش و همچنین افزایش فضای باز بین بلوکی و متعاقب آن نفوذ شاره و رسیدن آن به سطح (شکل ۱۱- ر). (گفتنی است که در طبیعت فشار هیدرولیکی محلول‌های کانه‌دار نیز موجبات نفوذ بیشتر و فراگیرتر آنها را به درون فضاهای خالی فراهم می‌سازد (Willams, 1979).

۴- الگوی ساختاری

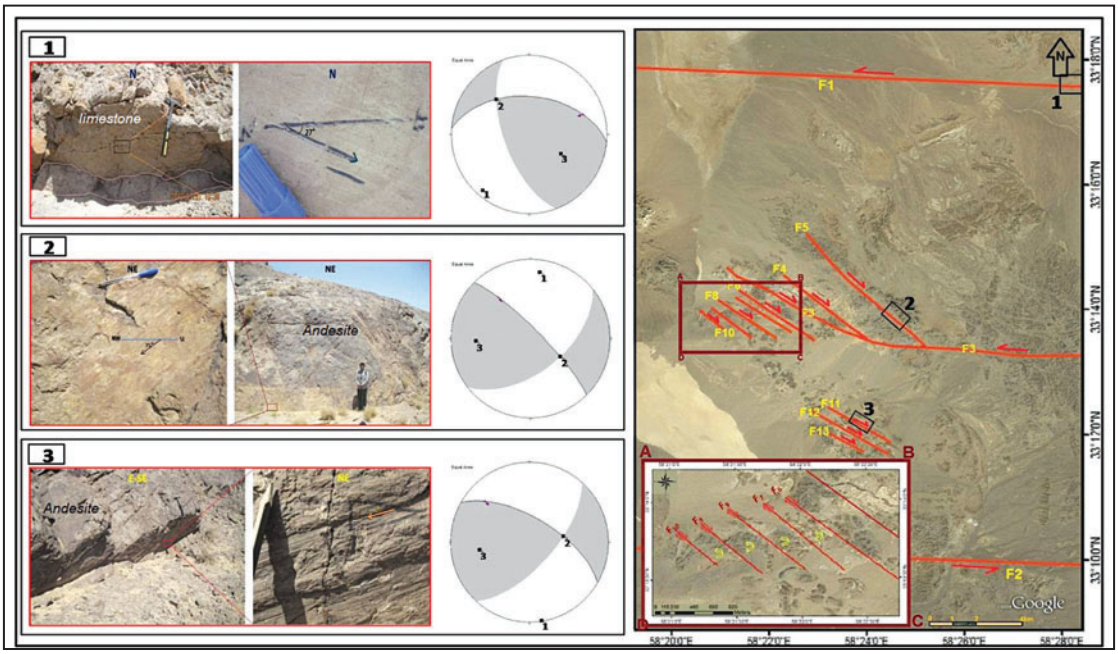
همانطور که ذکر شد بلوک‌های سنگی ناشی از تلاقی شکستگی‌های یک پهنه برشی، متأثر از جنبش پهنه دچار چرخش می‌شوند. به عنوان مثال در یک پهنه برشی چپ‌بر، بلوک‌ها پادساعتگرد و در یک پهنه برشی راست‌بر، بلوک‌ها ساعتگرد می‌چرخند؛ بنابراین وجود دو گسل خاوری- باختری در منطقه با سازوکار راستالغز چپ‌بر با مؤلفه جزئی معکوس و همچنین چرخش‌های پادساعتگرد بلوکی در امتداد گسل‌های پلکانی راستالغز راست‌بر با مؤلفه جزئی معکوس موجب تشکیل ساختار قفسه کتابی چپ‌گرد از طریق اعمال یک سامانه فشاری- برشی چپ‌بر می‌شود. رگه‌های معدنی، حاصل جنبش پهنه‌های برشی راست‌بر و نهشته شدن درون شکستگی‌های فرعی این پهنه‌ها است که درون پهنه برشی چپ‌بر یادشده فعالیت دارند. در انتها نقشه ساختاری منطقه مطالعاتی چشمه‌خوری رسم و الگوی ساختاری منطقه طبق تفاسیر فوق تعیین شد (شکل ۱۲).

۵- نتیجه‌گیری

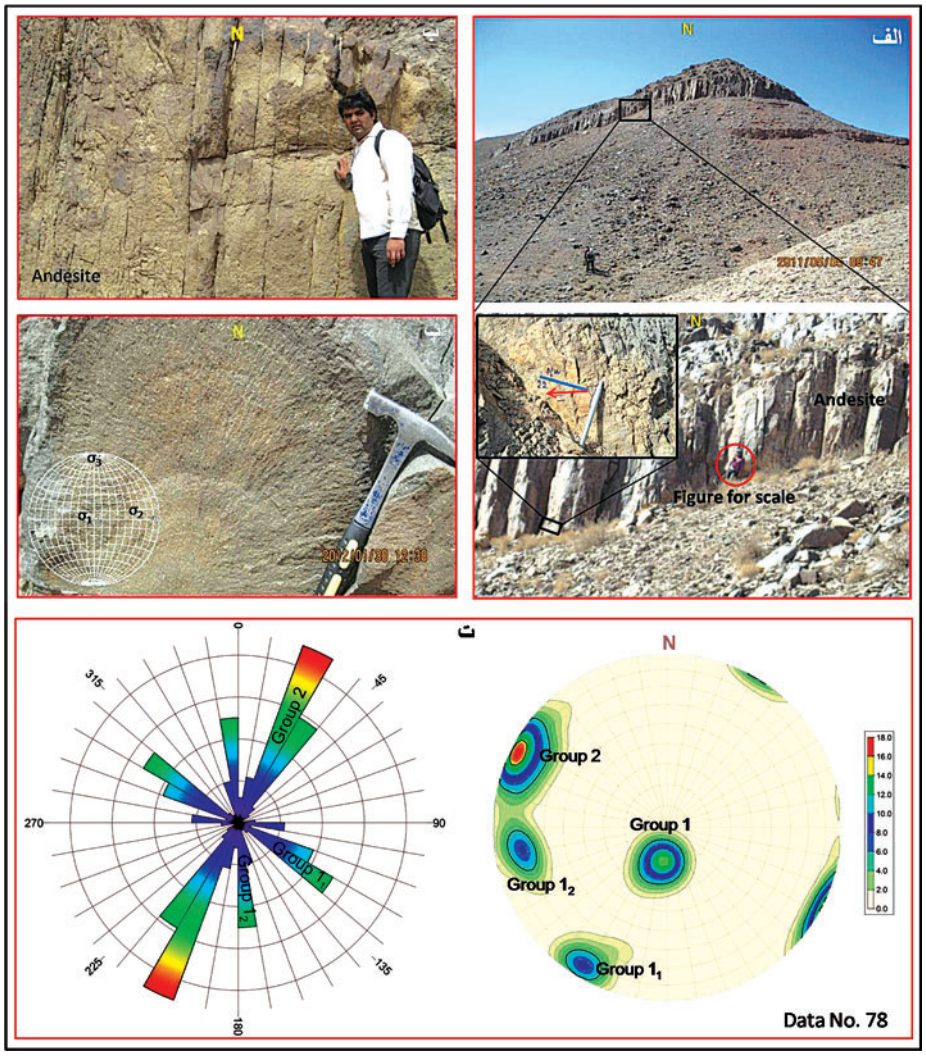
در منطقه چشمه خوری دو شکل از پهنه‌های برشی تشخیص داده شد که گسل‌های خاوری- باختری F1 و F2 به عنوان سازنده‌های پهنه برشی چپ‌بر و اصلی و همچنین پهنه‌های برشی راست‌بر که با ادامه عملکرد پهنه برشی چپ‌بر در امتداد NW-SE تکامل یافته‌اند. دایک‌ها در سه نوع گوه‌ای، چین‌خورده و حلقوی در منطقه یافت می‌شوند که به ترتیب در راستاهای E-W در کنترل فضای باز حاصل از چرخش پادساعتگرد بلوک‌های آندزیتی، NW-SE درون پهنه‌های برشی راست‌بر و حلقوی، درون کشش ناحیه‌ای ناشی از برهم‌کنش جنبش‌های گسلی ایجاد شده‌اند. درزه‌های منطقه در سه دسته برشی، کششی و پرمانند بوده که تنها در راستای نوع برشی آنها کانه‌زایی مهم اقتصادی به چشم می‌خورد. چرخش پادساعتگرد بلوک‌های سنگی و ایجاد فضاهای باز و عبور محلول‌های گرمابی کانه‌دار، شرایط مناسب برای دگرسانی‌های گسترده را در منطقه فراهم آورده است. با توجه به تکامل پهنه‌های برش، اشکال مختلفی از رگه‌ها پدید آمده که نحوه تشکیل آنها در کنترل شکستگی‌های فرعی پهنه‌های برشی راست‌بر با راستای NW-SE منطقه است؛ به گونه‌ای که محلول‌های کانه‌دار در خلال شکستگی‌های یادشده حرکت کرده و مواد معدنی همراه خود را در شرایط مناسب ژئوشیمیایی بر جای گذارده‌اند. مدل‌سازی آزمایشگاهی نیز نقش کنترل‌کنندگی و تشکیل متوالی ساختارهای مختلف نسبت به هم و همچنین نحوه جایگیری و نهشت مواد معدنی در قالب رگه‌ای و درون پهنه‌های برشی راست‌بر منطقه را تأیید می‌کند.



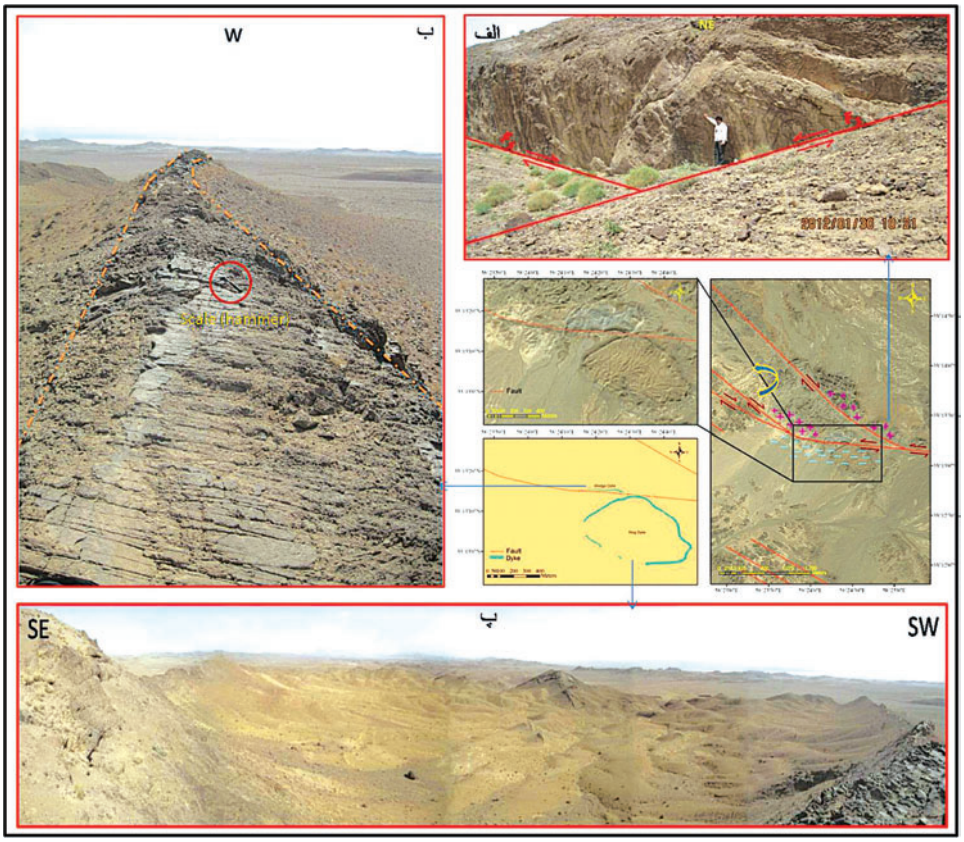
شکل ۱- الف) موقعیت زمین‌ساختی ناحیه‌ای خاور ایران روی تصویر Hillshade (SRTM) ماهواره‌ای؛ ب) موقعیت زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه روی تصویر ماهواره‌ای لندستETM (کادر مشخص شده در تصویر ب چارچوب محدوده مورد مطالعه را نشان می‌دهد).



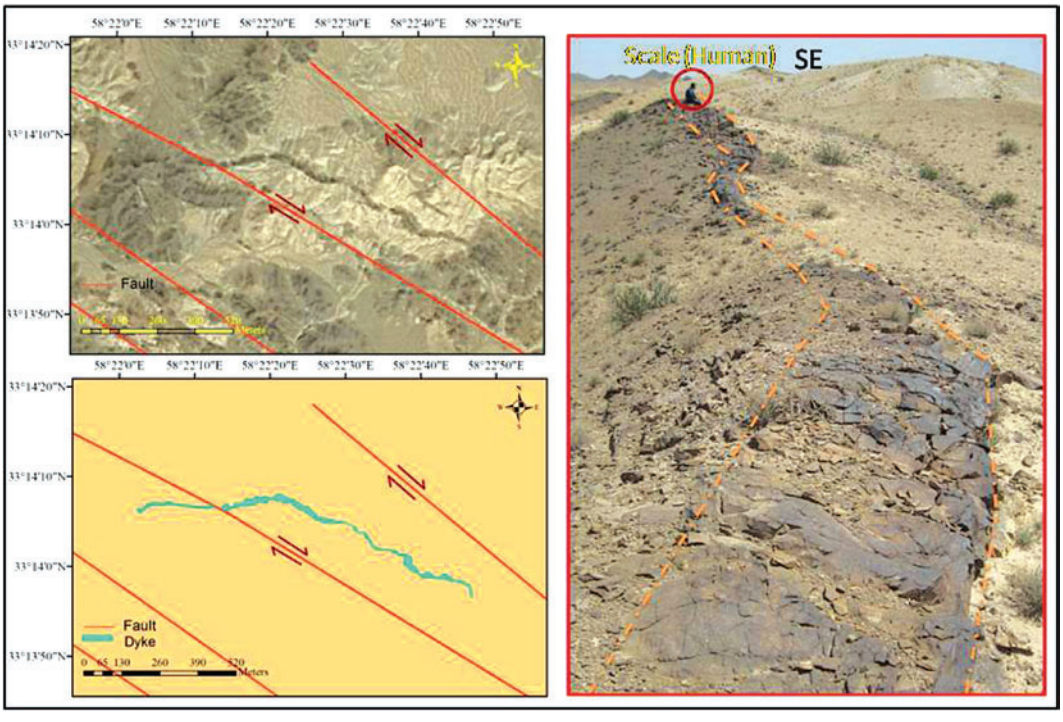
شکل ۲- تصویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک برد) منطقه مورد مطالعه همراه با بزرگ‌نمایی الگوی ساختار قفسه کتابی در منطقه (مستطیل ABCD). روی تصویر تنها به سه مورد از سازوکارهای گسلی (گسل‌های F1، F5 و F11) جهت اختصار و مشابهت روابط زاویه‌ای- سازوکاری اشاره شده است.



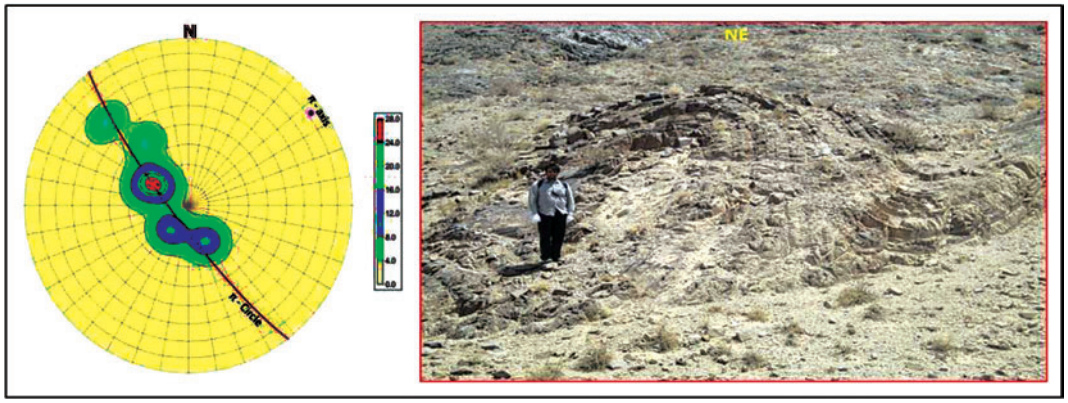
شکل ۳- الف) دسته اول درزه‌های موجود در منطقه (درزه‌های هم‌یوغ برشی، همراه با آثار خش‌لغز روی آنها)؛ ب) دسته دوم درزه‌ها (درزه‌های کششی که برخی از آنها توسط کلیست و آراگونیت پرشده‌اند)؛ پ) دسته سوم درزه‌ها (درزه‌های پرمانند) همراه با استریونت مربوط به آن؛ ت) نمودار الگوی منحنی‌های تراز قطب کل درزه‌های منطقه همراه با نمودار گلسرخی آنها (به جز درزه‌های پرمانند).



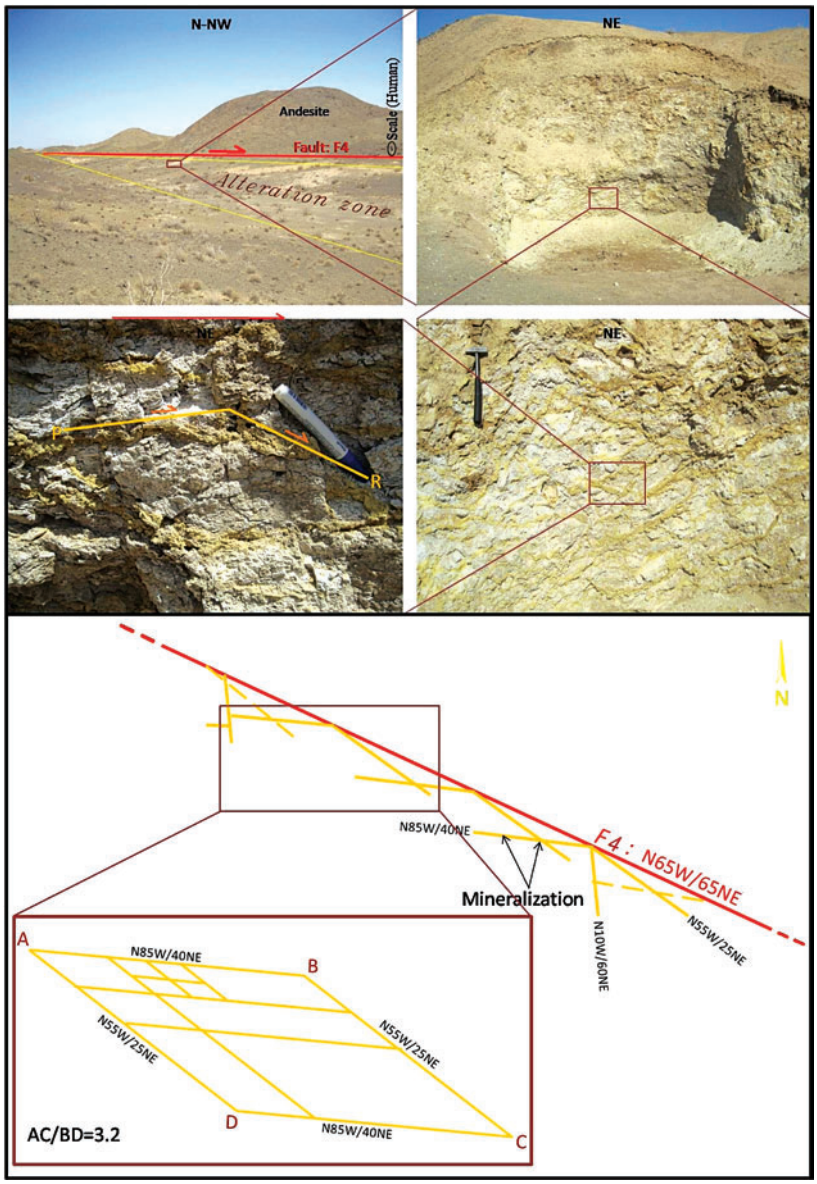
شکل ۴- تصویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک برد) نشان‌دهنده مناطق فشارش (+) و کشش (-) تحت تأثیر مؤلفه‌های گسلی و نحوه تشکیل دایک‌های حلقوی و گوه‌ای؛ الف) برخاستگی دو سویه بلوک سنگی (توده آندزیتی) محصور شده میان گسل‌های F3 و F5، ناشی از قرارگیری در منطقه فشارش موضعی؛ ب) چرخش پادساعتگرد بلوک سنگی محصور میان دو گسل F4 و F5 و تشکیل فضای باز گوه‌ای و متعاقب آن تزریق ماگما درون فضای باز و تشکیل دایک گوه‌ای؛ پ) تصویر پانوراما‌ی دایک حلقوی موجود در خاور محدوده مطالعاتی.



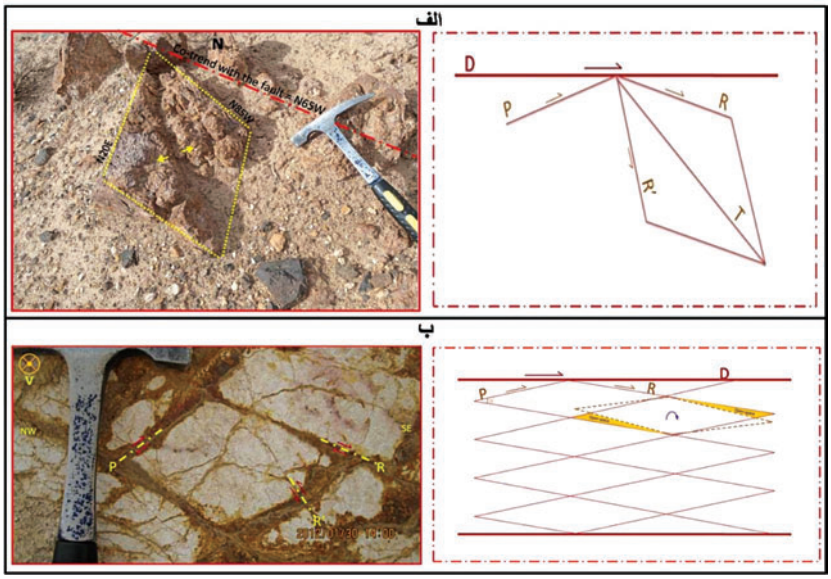
شکل ۵- تصویر صحرایی و همچنین تصویر ماهواره‌ای گوگل (کوئیک برد) و نمادین دایک آندزیتی چین‌خورده تحت تأثیر یک پهنه برشی راست‌بر.



شکل ۶- چین‌های موازی درون واحدهای آذرآواری منطقه مطالعاتی به همراه نمودار الگوی منحنی‌های تراز قطب‌های یال‌های چین‌خوردگی در شبکه هم‌مساحت، برای تعیین محور چین با استفاده از نمودار π؛ محور π (π-axis)، معادل محور چین است.

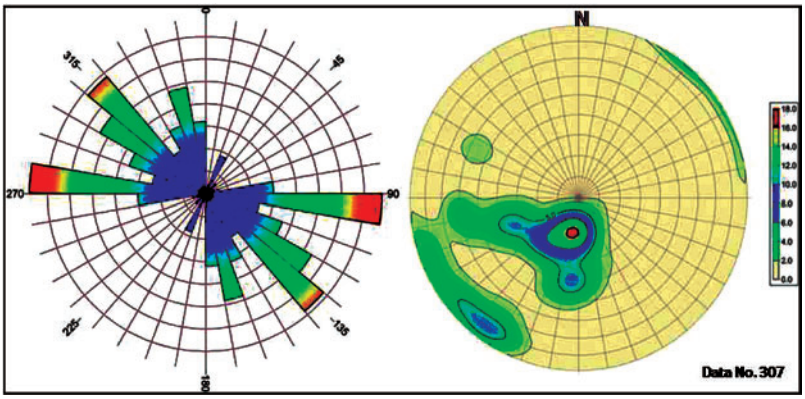


شکل ۷- بروز دگرسانی در امتداد گسل F4 به عنوان نمونه و حفر ترانشه‌های اکتشافی روی بخش‌های مختلف از این دگرسانی‌ها. مشاهده می‌شود که سامانه رگه‌ای با ترکیب آلونیتی درون ترانشه‌ها به صورت هم‌یوغ و ناشی از تلاقی شکستگی‌های R و P پهنه برشی راست‌بر است. در بخش پایین، تصویر نمادین تغییر موقعیت بخشی از رگه‌های معدنی منطقه ناشی از وضعیت گسل‌های فرعی، همراه با بزرگ‌نمایی نمادین بخشی از حاشیه کانی‌زایی شده بلوک‌های رومبوئدری نشان داده شده است.



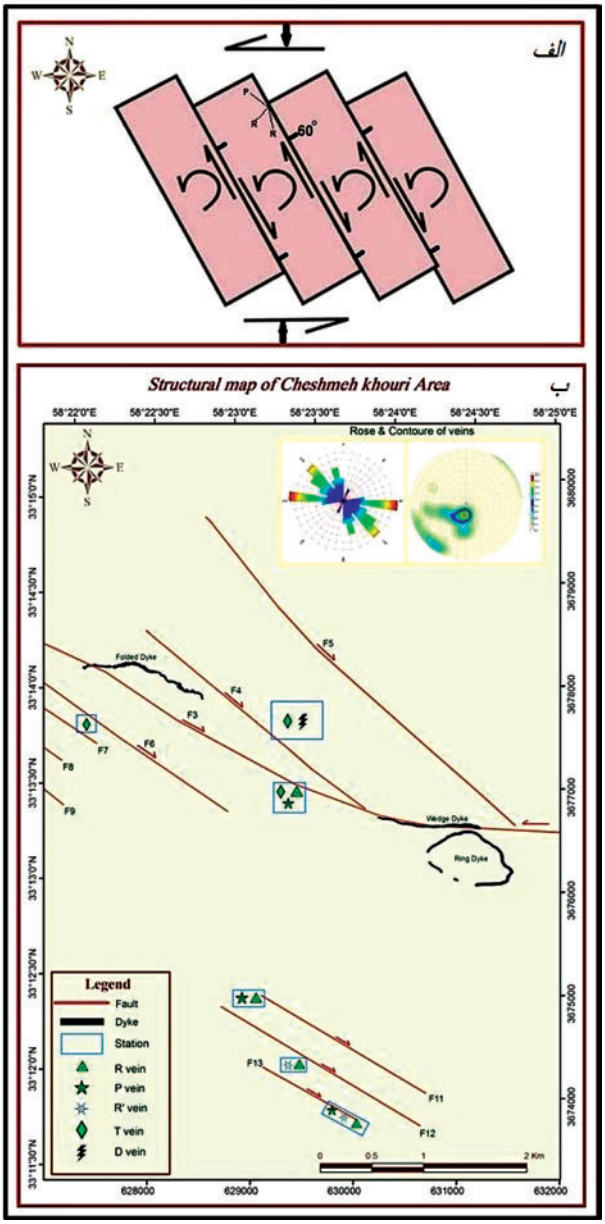
شکل ۸- الف) طرح نمادین از نحوه تشکیل یک نوع از بلوک‌های سنگی حاصل از تقاطع شکستگی‌های R و R’ در یک پهنه برشی راست‌بر به همراه تصویر صحرایی آن در منطقه (بخش‌هایی از بلوک سنگی دچار فرسایش شده است)؛ ب) طرح نمادین از نحوه چرخش یک بلوک گسلی در اثر جنبایی یک پهنه برشی راست‌بر و تصویر صحرایی آن در منطقه (رگه‌های دارای ترکیب ژاروسیتی).

شکل ۹- رگه کششی با ترکیب کلسیت ـ آراگونیت. خمیدگی اندک فیبرهای آراگونیتی ـ کلسیتی در مراحل متوالی بازشدگی نسبت به دیواره، بیانگر جهت تغییرات اندک محور کششی طی فرایند دگرشکلی پیشرونده است.



شکل ۱۰- نمودار الگوی منحنی‌های تراز قطب مجموع رگه‌های محدوده مطالعاتی همراه با نمودار گلسرخی کل رگه‌ها (تعداد داده‌های برداشت شده: ۳۰۷).

شکل ۱۱- مراحل مختلف مدل آزمایشگاهی که بیانگر چگونگی تشکیل ساختار قفسه کتابی و تأثیرگذاری متوالی فاکتورهای مختلف در یک مدل بوده و سرانجام تشکیل رگه‌های معدنی در کنترل شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های برشی راست‌بر (مقیاس خطی بر روی مدل بر حسب سانتی‌متر بوده که در شکل ب با بزرگ‌نمایی این مقیاس کاملاً مشهود است).



شکل ۱۲- الف) طرح نمادین از ساختار قفسه‌کتابی متناسب با محدوده به صورت چرخش پادساعتگرد بلوک‌ها در امتداد گسل‌های موازی و دارای سوی برش ناهمساز با راستای یک پهنه ترافشارشی چپ‌بر و در نتیجه تشکیل پهنه‌های برشی نسل جدید به صورت موازی و راست‌بر؛ ب) نقشه ساختاری محدوده مورد مطالعه. (منظور از به‌کارگیری عبارات R، P، R'، T و D برای رگه‌ها در نقشه، رگه‌هایی هستند که درون شکستگی‌های فرعی R، P، R'، T و D پهنه‌های برشی جایگیری شده‌اند).

کتابنگاری

جاویدی مقدم، م.، کریم پور، م. ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ. و حیدریان‌شهری، م. ح.، ۱۳۹۲- زمین‌شناسی، دگرسانی، کانی‌سازی و ژئوشیمی گستره پی‌جویی شکسته سبز شمال‌غرب بیرجند، مجله بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، سال ۲۲، شماره سوم، صفحه ۵۲۰-۵۰۷.

خطیب، م. م.، ۱۳۷۷- هندسه پایانه گسل‌های امتداد لغز (با نگاهی ویژه به گسل‌های خاور ایران). دانشگاه شهید بهشتی، رساله دکترا، ۲۲۴ صفحه.

خطیب، م. م.، ۱۳۷۸- ارتباط دگرشکلی برشی و رگه‌های معدنی در قلعه زری، مجموعه مقالات همایش شناخت توانمندی های معدنی شرق کشور، بیرجند.

سامانی، ب. و اشتری، ش.، ۱۳۷۱- تکوین زمین‌شناسی ناحیه سیستان و بلوچستان، فصلنامه علوم زمین، شماره ۴، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

سلیم، ل.، ۱۳۹۱- پترولوژی و ژئوشیمی سنگ‌های آتشفشانی و نیمه نفوذی منطقه چشمه خوری (غرب بیرجند)، دانشگاه بیرجند، پایان نامه کارشناسی ارشد، ۱۳۷ صفحه.

سمیعی، س.، کریم‌پور، م. ح.، قادری، م. و حیدریان‌شهری، م. ح.، ۱۳۹۰- زمین‌شناسی، دگرسانی، و پتانسیل کانه‌زایی در منطقه خونیک، جنوب بیرجند، دومین همایش انجمن زمین‌شناسی اقتصادی، دانشگاه لرستان.

قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۷- پایه‌های زمین‌شناسی ساختمانی، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور، ۳۲۰ صفحه.

لطفی، م.، ۱۳۷۴- نقشه زمین‌شناسی ۱:۱۰۰۰۰۰ چهارگوش سارغنج، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کریم‌پور، م. ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، مظاهری، س. ا. و حیدریان شهری، م. ح.، ۱۳۸۶- ماگماتیسم و انواع کانی‌سازی مس، طلا، قلع و تنگستن در بلوک لوت، مجموعه مقالات پانزدهمین همایش انجمن بلورشناسی و کانی‌شناسی ایران، دانشگاه فردوسی مشهد، ۶۰۴-۵۹۸.

کریم‌پور، م. ح.، ملک‌زاده شفارودی، آ.، فارمر، ل. و استرن، چ.، ۱۳۹۱- پتروژنز انیتوییدها گرانیتوئیدها، سن سنجی زیرکن به روش U-Pb ژئوشیمی ایزوتوپ‌های Sr-Nd و رخداد مهم کانی‌سازی ترشیری در بلوک لوت، شرق ایران، مجله زمین‌شناسی اقتصادی ایران، ص ۲۷-۱.

References

Babiker, M. & Gudmundsson, A., 2004- A Geometry, structure and emplacement of mafic dykes in the Red Sea Hills, Sudan. Journal of African Earth Sciences 38 279–292.

Berberian, M., 1983- Action faulting and tectonics of Iran in continental deformation in the Iranian plateau (contribution to the seismic tectonics of Iran); part IV, Geol. Surv.Iran, Rep: No: 52.

Brathwaite, R. L., Cargill, H. J., Christie, A. B. & Swain, A., 2001- Lithological and spatial controls on the distribution of quartz veins in andesite- and rhyolite-hosted epithermal Au–Ag deposits of the Hauraki Goldfield, New Zealand. Mineralium Deposita 36, 1–12.

Brogi, A., 2006- Evolution, formation mechanism and kinematics of a contractional shallow shear zone within sedimentary rocks of the Northern Apennines (Italy). Eclogae Geologicae Helvetiae. 99, 29–47.

Brown, L. J. & Solar, M., 1998- Model of the copper and polymetallic vein family of deposits- applications in Slovakia, Hungary and Romania. International Geology Review, 45, 12-19.

Burg, J. P. & Laurent, P., 1978- Strain analysis of a shear zone in a granodiorite. Tectonophysics, V.47, pp.15-42.

Davis, G. H. & Reynolds, S. J., 1996- Structural geology of rocks and regions. New York: John Wiley and Sons, p.800.

Forster, H., 1978- Mesozoic - Cenozonic metallogensis in Iran - Geological Society- London, 135, 443-445.

Holohana, E. P., Trolla, V. R., Walterb, T. R., Mqnnc, S., McDonnella, S. & Shiptona, Z. K., 2005- Elliptical calderas in active tectonic settings: an experimental approach, Journal of Volcanology and Geothermal Research ,144 , 119– 136.

Lin, A., 2001- S-C fabrics developed in cataclastic rocks from the Nojima fault zone, Japan and their implications for tectonic history, Journal of Structural Geology, volume 23, pp. 1167–1178.

Micklethwaite, S., Sheldon, A. H. & Baker, T., 2010- Active fault and shear processes and their implications for mineral deposit formation and discovery, Journal of Structural Geology 32,151–165.

Malekzadeh Shafaroudi, A. & Karimpour, M. H., 2013- Hydrothermal alteration mapping in northern Khur, Iran, using ASTER image processing: a new insight to the type of copper mineralization in the area", Acta geologica sinica, In press.

Moore, D. E. & Byerlee, J., 1992- Relationships between sliding behavior and internal geometry of laboratory fault zones and some creeping and locked strike –slip faults of California, Tectonophysics, V.211, pp. 305–316.

Nogole-Sadate, M. A. A., 1985- Les zones de decrochements et les vigrations structurals en Iran, consequences des resultants de lanalyse structurale de la region de Qom,Translated in Persian.Geol.Surv.Iran,Rep.No.55.

Pang, K. N., Chung, S. L. & Zarrinkoub, M. M., 2013- Iranian ultrapotassic volcanism at 11Ma signifies the initiation of post collisional magmatism in the Arabia-Eurasiacollision zone, Terra Nova, V.25, pp. 405-413.

Passchier, C. W. & Simpson, C., 1986- Porphyroclast systems as kinematic indicators, J. Stru., V.8, pp. 831-844.

Peacock, S. M., 2002- Blueschist-facies metamorphism, shear heating and P-T- t paths in subduction shear zones. Journal of Geophysical Research, 97, 17693-17707.

Pollard, D. D., Segall, P. & Delaney, P. T., 1982- Formation and interpretation of dillatant echelon cracks, Geol. Soci. Am. Bull, V.93, P1291-1303.

Ramsay, J. G. & Huber, M. I., 1983- The techniques of modern structural geology, V.1: Strain Analysis, Academic Press, London, p.307

Sylvester, A. G., 1988- Strike slip faults, Geological Society America Bulletin, volume 100, pp. 1666-1703.

Williams, A. J., 1979- Foliation development in serpentinite, Glen rock, New south wales. *Tectonics*, pp. 81-95.

Tarkian, M., Lotfi, M. & Baumann, A., 1983- Tectonic, magmatism and the formation of mineral deposits in the central Lut, east Iran, Ministry of mines and metals, GSI, geodynamic project (geotraverse) in Iran, No. 51. pp. 357-383.

Walker, R. & Khatib, M. M., 2006- Active faulting at Birjand in NE IRAN. Geophys. J. Int., 157-176.

Wang, C. & Ludman, A., 2004- Deformation conditions, kinematics and dis-placement history of shallow crustal ductile shearing in the Norumberga fault system in the Northern Appalachians, eastern Maine. Tectonophysics 384, 129–148.

Woodcock, N. & Schubert, C., 1994- Continental strike-slip tectonics, In: Hancock, P. (Ed.), Continental deformation, Pergamon Press, New York, pp. 251-263.

Effect of Structural Controllers on Ore Mineral Deposits of Cheshmeh Khouri Area (Northwest of Birjand)

Kh. Kavyani Sadr [1*], M. M. Khatib [2] & M. H. Zarrinkoub [3]

[1] M. Sc., Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
[2] Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran
[3] Associate Professor, Department of Geology, Faculty of Science, University of Birjand, Birjand, Iran

Received: 2013 December 02 Accepted: 2014 March 12

Abstract

Cheshmeh Khouri is an area which mainly comprises a zone of parallel, en-echelon faults along which metallic and non-metallic mineralization is observed. Structural controllers are important factors in the formation of the structural elements of the area such as dykes, faults, joints, folds, and particularly mineral veins. Three types of dykes are observed: E-W trending wedge-shaped dikes, NW-SE trending folded dikes, and ring dikes, which are all kinematically controlled by structural movements of the area. A regional sinistral shear-compression (transpression) regime across the fault sets of the area has given rise to a large-scale counterclockwise rotation of andesitic blocks, developing a bookshelf structure over the area. Rotation of these blocks has provided open spaces for injection of ore-bearing hydrothermal solutions, which caused widespread alterations. Block rotation has also caused formation of dextral shear zones along the faults, which eventually controlled mineralization through the joint and minor fracture networks associated with these shear zones. Formation of mineral veins affected by the dextral shear zones of the bookshelf structure in the area, and defining the structural complexities and sequential elements as well as mineralization phase led to present a laboratory model which showed a good consistency with the results derived from others studies.

Keywords: Birjand, Cheshmeh Khouri, Shear Zone, Structural Controller, Bookshelf Structure, Mineral Vein, Dyke.

For Persian Version see pages 323 to 332

*Corresponding author: K. Kavyani sadr; E-mail: khashayargeologist@yahoo.com

Created with nitroPDF professional
download the free trial online at nitropdf.com/professional