



# فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۵، سال هشتم، شماره ۳۰

doi 10.22077/jt.2026.12069.1235

مقاله پژوهشی

## برآورد ذخیره کانسار معدنی بر اساس توزیع کرنش حجمی

محمد مهدی خطیب<sup>۱\*</sup>، محمد حسین زرین کوب<sup>۲</sup>، مهشید ثمره حسینعلی نژاد<sup>۳</sup>

۱- استاد تمام زمین شناسی گروه تکتونیک، دانشگاه بیرجند، ایران.  
۲- استاد تمام زمین شناسی گروه تکتونیک، دانشگاه بیرجند، ایران.  
۳- دانشجوی دکتری زمین شناسی گروه تکتونیک، دانشگاه بیرجند، ایران.

### چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۵/۰۶/۲۳  
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۷/۲۳

کرنش حجمی نقش اساسی در ایجاد فضای باز و در نتیجه تشکیل و مکان یابی کانه زایی در پهنه های دگرشکلی ایفا می کند. در این پژوهش، از رویکرد کرنش حجمی به عنوان روشی برای برآورد حجم و ذخیره کانسار معدنی استفاده شده است. بدین منظور، کرنش حجمی در صفحات مختلف  $XY$ ,  $XZ$ ,  $YZ$  محاسبه و مقادیر حاصل برای برآورد حجم فضای باز ایجاد شده و در نهایت میزان ماده معدنی مورد استفاده قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که برآورد ذخیره بر اساس رویکرد کرنش حجمی، تطابق قابل توجهی با نتایج حاصل از روش های متداول برآورد ذخیره معدنی دارد و می تواند به عنوان رویکردی مکمل برای تخمین حجم و ذخیره کانسارهای رگه ای مرتبط با پهنه های برشی مورد استفاده قرار گیرد.

این مطالعه در بخش جنوبی کوه های شتری، بخشی از پهنه ترافشاری گسل نایبند مرز ایالت های ساختاری لوت و بلوک طیس در گستره ای موسوم به گذار سیاه، واقع در شرق ایران، تمرکز دارد. این پهنه در ارتباط با یک سامانه ترافشاری راست بر شکل گرفته و با کانه زایی قابل توجه سرب و روی همراه است. در این منطقه، ایجاد شکستگی ها و فضای باز در نتیجه دگرشکلی و جابه جایی بلوک های گسلی، شرایط مناسبی را برای حرکت و تمرکز سیالات کانه دار و تشکیل کانه زایی فراهم کرده است.

**واژگان کلیدی:** کرنش حجمی - تخمین ذخیره ماده معدنی - مناطق ترافشاری - پهنه برشی



## Research Paper

# Estimation of Mineral Deposit Reserves Based on Volumetric Strain Distribution

Mohammad-Mahdi Khatib<sup>1\*</sup>, Mohammad-Hossein Zarrinkoub<sup>2</sup>, Mahshid Samareh Hossein ali nejad

1. Faculty of Science ,Birjand,,University Birjand, Iran

2. Faculty of Science ,Birjand,,University Birjand, Iran

3. Faculty of Science ,Birjand,,University Birjand, Iran

## Abstract

Volumetric strain plays an important role in the generation of open space and, consequently, in the formation and localization of mineralization within deformation zones. In this study, a volumetric strain approach was employed to estimate the volume of open space and, ultimately, the mineral reserve of the deposit. For this purpose, volumetric strain was calculated in different planes, including the XY, XZ, and YZ planes, and the obtained values were used to estimate the volume of open space generated as a result of deformation. Subsequently, by considering the proportion of open space filled by mineralized material, the volume of the mineralized zone and the mineral reserve were estimated. The results indicate that the reserve estimated using the volumetric strain approach shows a significant agreement with the results obtained from conventional mineral reserve estimation methods. These findings suggest that the magnitude and distribution of volumetric strain can be used as an indicator for estimating the volume of deformation-induced open space and as a complementary approach for estimating the volume and reserves of vein-type deposits associated with shear zones.

This study was conducted in the Godar Siah area, located in the southern part of the Shotor Kuh Mountains in eastern Iran. The study area is situated within the transpressional zone of the Nayband Fault, which forms the boundary between the Lut and Tabas structural provinces. This zone developed in association with a dextral transpressional system and is characterized by significant lead–zinc mineralization. In the study area, the development of fractures and open spaces resulting from deformation and displacement of fault blocks provided favorable conditions for the migration, concentration, and precipitation of ore-bearing fluids, thereby playing an important role in the formation and localization of mineralization.

**Keywords:** Volumetric strain( $\epsilon_v$ ); Mineral reserve estimation; Transpression; Shear zone;

---

\*Email: mkhatib@birjand.ac.ir

Tel:

## ۱. مقدمه

$R$ ،  $R'$ ،  $P$ ،  $T$  می‌باشند که بر هم کنش این شکستگی‌ها سبب ایجاد فضاهای باز مناسبی جهت ته‌نشست مواد معدنی می‌باشد. به گونه‌ای که تقاطع شکستگی‌های  $P$  و  $R'$  موجب پیدایش بلوک‌های گسلی رمبوندی شکل می‌شود (Kaviani et al., 2022).

در درون پهنه برشی در اثر تقاطع شکستگی‌های فرعی بلوک‌های گسلی تشکیل می‌شوند. ابتدا حاشیه بلوک‌ها بر هم منطبق است اما در اثر حرکت پهنه برشی بلوک‌ها چرخش و فضاهای باز در حاشیه آن تشکیل می‌شود (شکل ۱).

تحقیقات زمین‌شناسی انجام‌شده در مناطق مختلف جهان به‌خوبی نشان می‌دهند که بین گسل‌های و کانه‌زایی ارتباط تنگاتنگی وجود دارد. به‌عنوان نمونه، بررسی رگه‌های کلسیتی در جنوب پیرنه اسپانیا، رگه‌های مرتبط با گسل در یک معدن طلای واقع در غرب آفریقا موید این مسئله است (Lopez et al., 2020, Masurel et al., 2022, Ken-worthy et al., 2007, Abd El-Wahed et al., 2016).

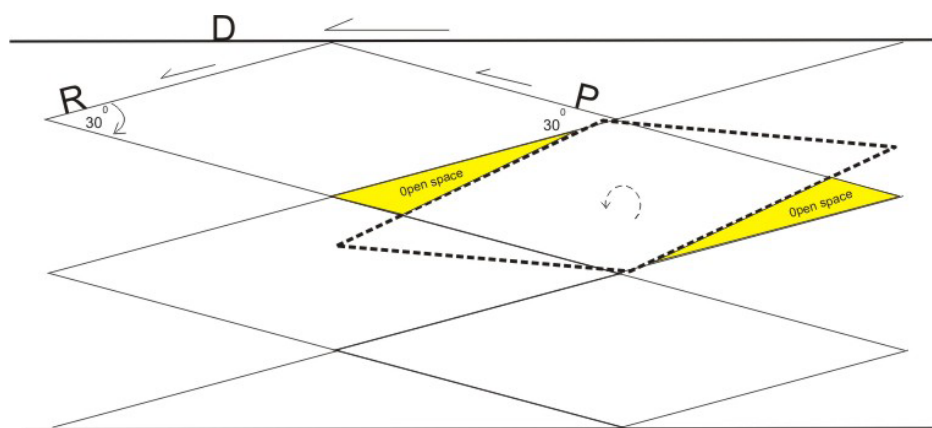
مدل‌سازی عددی در یک معدن اورانیوم در چین نیز نشان داده‌اند که ارتباط روشنی بین کانه‌زایی و عواملی مانند کرنش حجمی، کرنش برشی و فشار منفذی وجود دارد. در این مدل‌ها مشخص شده که پایانه گسل‌ها دارای کرنش حجمی بالاتری نسبت به مرکز گسل هستند. همچنین، در فرآیند فشاری، ابتدا کرنش حجمی منفی رخ می‌دهد و سپس به کرنش

کرنش حجمی یکی از عوامل کلیدی کنترل‌کننده تشکیل و مکان‌یابی کانه‌زایی است. شکستگی‌های همراه در پهنه‌های برشی فضایی لازم برای گردش و نهشت سیالات گرمایی کانه‌ساز را ایجاد می‌کنند. افزون بر این، تغییرات رژیم تنش در مراحل پی‌درپی دگرشکلی می‌تواند توزیع مکانی کرنش حجمی را تغییر دهد و از این رو، کرنش حجمی پارامتری مهم برای ارزیابی پتانسیل معدنی در محیط‌های ساختاری ترافشاری محسوب می‌شود.

بررسی و ارزیابی ذخایر معدنی در مناطق ترافشاری اهمیت زیادی دارد. موقعیت جغرافیایی فلات ایران در کمربند کوهزایی آلپ-هیمالیا باعث شده است که پوسته زمین در این منطقه دچار تغییر شکلهای گسترده شود که خود عامل اصلی گسترش و پراکندگی ذخایر معدنی در این بخش است. پهنه‌های برشی شکنا مسیرهای ساختاری مناسب برای مهاجرت، تجمع و رسوب سیالات گرمایی فراهم می‌کنند. ارتباط نزدیک مکانی میان ذخایر معدنی و پهنه‌های برشی شکنا به شناسایی اهداف مناسب برای اکتشاف کانه‌زایی اپی‌ژنتیک در محیط‌های تکتونیک ترافشاری کمک کند.

### ۱.۱. کانه‌زایی در پهنه برشی شکنده

از ویژگی‌های مهم پهنه‌های برشی شکنده پیدایش گسل‌های همراه است. این گسل‌ها شامل شکستگی‌های



شکل ۱- چرخش بلوک‌های گسلی باعث پیدایش فضاهای باز گوه‌ای شکل شده که موجب تشکیل رگه‌های با ضخامت متفاوت در سطح زمین و همچنین بطرف عمق گردیده است



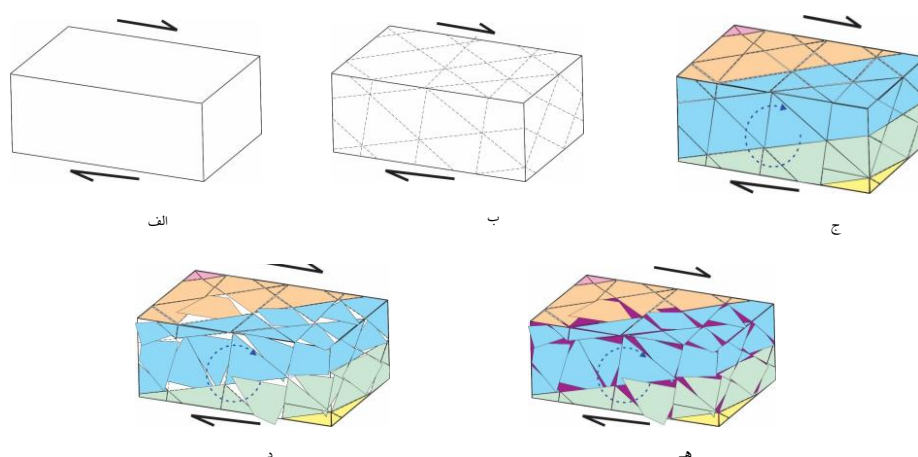
مثبت تبدیل می شود (Zhou et al 2008).

محدوده اکتشافی گذارسیاه در ۲۳۶ کیلو  
شهرستان بیرجند و ۴۴ کیلومتری جنوب  
دیھوک در استان خراسان جنوبی واقع  
محدوده گذارسیاه از دیدگاه زمین‌شناسی  
در خردقاره‌ایران مرکزی - در حدفاصل  
لوت و طبس در بخش غربی گسل نایبند  
است (شکل ۱). این محدوده در بخش جنوبی

بلوک گذار سیاه پیش از آغاز دگرشکلی در پهنه برشی ترافشاری راست‌بر شاخه همسویگسل نایبند قرار دارد با حرکت در امتداد پهنه برشی و توسعه شکستگی‌های  $R$ ،  $R'$  و  $P$  و  $T$  بلوک‌های گسلی با هندسه مشخص تشکیل می‌شود. (شکل ۳ الف - ج) حرکت در امتداد پهنه برشی باعث چرخش ساعتگرد بلوک‌های گسلی و توسعه بلوک‌های گسلی می‌شود. در سنگ‌های آهکی دولومیتی سازند جمال در منطقه گذار سیاه سبب تشکیل فضاهای باز در نتیجه چرخش بلوک‌های گسلی و نفوذ سیالات کانه‌دار به فضاهای باز تازه تشکیل شده و به دنبال آن رسوب کانی و تشکیل کانسنگ می‌شود (د-ه).

نیز آبرفت‌های عهد حاضر رخنمون دارند. روند عمومی گسل‌ها در محدوده اکتشافی شمالی - جنوبی و شمال خاور - جنوب باختری هستند. کانی زایی سرب - روی بیشتر درون واحدهای آهکی - دولومیتی سازند جمال قرار دارند که در ارتباط مستقیم با سیستم تکتونیک منطقه است. همچنین براساس داده‌های حاصل از آنالیزهای ژئوشیمیایی مقادیر قابل توجهی از عنصرهای سرب حداکثر ۱۸ درصد و روی حداکثر ۱۹ درصد در منطقه وجود دارد.

### ۳-۱. تکتونیک منطقه مورد مطالعه :



شکل ۴: مراحل تشکیل و شکل‌گیری ماده معدنی در منطقه مورد مطالعه



شکل ۵: نهشت کانی‌های سرب و روی در فضای باز ناشی از چرخش بلوک‌ها در پهنه‌های برشی در محدوده گذار سیاه

## ۲. روش

پارامترهای برآورد ذخیره کانسار بر اساس کرنش حجمی در پهنه‌های برشی شکننده:

## ۲-۱ کرنش برشی

کرنش برشی ( $\gamma$ ) به صورت نسبت جابه‌جایی افقی ( $\Delta x$ ) به عرض پهنه برشی ( $W$ ) تعریف می‌شود:

$$\gamma = \tan(\psi) = \Delta x / W$$

که در آن  $\gamma$  کرنش برشی،  $\psi$  زاویه برشی،  $\Delta x$  جابه‌جایی افقی و  $W$  عرض پهنه برشی است.

افزایش جابه‌جایی برشی معمولاً موجب افزایش کرنش برشی می‌شود و می‌تواند توسعه شکستگی‌ها و پهنه‌های اتساعی را درون پهنه برشی تقویت کند.

## ۲.۲ توسعه فضاهای باز

فضاهای باز در پهنه‌های برشی شکننده می‌توانند شامل شکستگی‌ها، پهنه‌های اتساعی، ساختارهای کششی-جداشونده (pull-apart) و گوه‌های کششی اتساعی باشند که در نتیجه دگرشکلی ترافشاری ایجاد می‌شوند. این ساختارها می‌توانند مسیرهایی برای عبور سیالات گرمایی فراهم کنند و در نتیجه نقش مهمی در مکان‌یابی کانه‌زایی داشته باشند.

## ۲.۲.۱ رابطه بین کرنش برشی و حجم فضای باز

در یک پهنه برشی ترافشاری راست‌بر، حجم فضای باز ایجادشده در اثر دگرشکلی را می‌توان به بزرگی کرنش برشی، ابعاد پهنه برشی و عمق مؤثر دگرشکلی مرتبط کرد.

یک رابطه پارامتری ساده‌شده را می‌توان به صورت زیر بیان کرد:

$$V_{open} = k\gamma WLd$$

که در آن:

$V_{open}$  حجم برآوردشده فضای باز ایجادشده در اثر دگرشکلی ( $m^3$ ) است؛

$k$  ضریب تجربی کالیبراسیون مرتبط با ویژگی‌های مکانیکی سنگ و شرایط تنش است؛  $\gamma$  کرنش برشی  $W$  عرض پهنه برشی ( $m$ ) است؛  $L$  طول پهنه برشی ( $m$ ) است؛ و  $d$  عمق مؤثر پهنه در حال دگرشکلی ( $m$ ) است.

بهرتر است ضریب  $k$  با استفاده از مشاهدات صحرایی، آزمایش‌های آزمایشگاهی نتایج مدل‌سازی عددی کالیبره شود و به عنوان یک ثابت عمومی در نظر گرفته نشود.

## ۳.۲ عوامل کنترل‌کننده توسعه فضاهای باز

## ۳.۲.۱ ویژگی‌های مکانیکی سنگ آهک

ویژگی‌های مکانیکی سنگ میزبان کنترل مهمی بر توسعه و حفظ فضاهای باز اعمال می‌کنند.

مقاومت فشاری تک‌محوری ( $UCS$ ): سنگ آهکی با مقاومت فشاری بیشتر معمولاً مقاومت بیشتری در برابر دگرشکلی و بازشدگی شکستگی نشان می‌دهد. بنابراین، تحت شرایط تنش مشابه، سنگ آهکی با مقاومت بیشتر ممکن است حجم کمتری از فضای باز مرتبط با دگرشکلی ایجاد کند. (محمدی ۱۳۹۰).

تخلخل: تخلخل اولیه بیشتر می‌تواند ظرفیت سنگ برای پذیرش دگرشکلی و گردش سیال را افزایش دهد. با این حال، رابطیهین تخلخل و فضای باز جدید ایجادشده به حالت تنش، پیوستگی شکستگی‌ها و ویژگی‌های مکانیکی توده سنگ بستگی دارد (Zhou et al 2021).

## ۳.۲.۲ مؤلفه‌های تنش در پهنه‌های برشی ترافشاری

بزرگی و توزیع مؤلفه‌های تنش درون یک پهنه برشی ترافشاری تأثیر زیادی بر توسعه شکستگی‌ها و دگرشکلی حجمی دارند.

تنش برشی: افزایش تنش برشی معمولاً دگرشکلی برشی و توسعه شکستگی‌ها و پهنه‌های آسیب‌دیده را تقویت می‌کند. در نتیجه، کرنش برشی بیشتر می‌تواند پتانسیل ایجاد مسیرهای پیوسته برای عبور سیالات گرمایی را افزایش دهد.

تنش فشاری: تنش فشاری موجب بسته شدن فضاهای



نرمال محاسبه کرد:

$$\varepsilon_{33} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{11} = \varepsilon_{11}$$

کرنش حجمی مثبت نشان‌دهنده اتساع است، در حالی که کرنش حجمی منفی بیانگر تراکم حجمی است.

پهنه‌هایی که با کرنش حجمی مثبت نسبتاً زیاد مشخص می‌شوند، می‌توانند مکان‌های مناسبی برای بازشدگی شکستگی، افزایش تراوایی و گردش سیالات گرمایی باشند. بنابراین، این پهنه‌ها می‌توانند پتانسیل بیشتری برای کانه‌زایی داشته باشند، به‌ویژه هنگامی که با گسل‌های اصلی، پهنه‌های برشی و ناپیوستگی‌های ساختاری همپوشانی داشته باشند.

برای برآورد حجم کانسنگ، می‌توانیک رابطه ساده‌شده را به صورت زیر بیان کرد:

$$V_{ore} = V_{open} F_{fill}$$

که در آن  $F_{fill}$  نشان‌دهنده کسری از فضای باز موجود است که متعاقباً توسط کانی‌های گرمایی کانی‌های کانسنگ پر می‌شود.

بنابراین، رویکرد پیشنهادی کرنش برشی، کرنش حجمی، هندسه پهنه برشی، ویژگی‌های مکانیکی سنگ، شرایط تنش، عمق و کارایی پرشدگی کانی

خالی موجود می‌شود. بنابراین، دگرشکلی فشاری شدید ممکن است حتی در حضور کرنش برشی قابل توجه، حجم مؤثر فضای باز را کاهش دهد.

تنش لیتواستاتیک: تنش لیتواستاتیک با افزایش عمق افزایش می‌یابد و می‌توان آن را به صورت زیر تقریب زد:

$$\sigma_v(z) = \rho g z$$

که در آن  $\sigma_v$  تنش لیتواستاتیک قائم،  $\rho$  چگالی توده‌ای سنگ‌های رویی،  $g$  شتاب گرانش و  $z$  عمق است.

با افزایش عمق، افزایش تنش لیتواستاتیک معمولاً باعث بسته‌شدن شکستگی‌ها شده و می‌تواند حجم فضاهای باز را کاهش دهد، به‌ویژه در شرایطی که فشار سیال برای مقابله با تنش محصورکننده کافی نباشد.

## ۴.۲-رابطه بین کرنش حجمی و پتانسیل کانه‌زایی:

از آنجا که هدف این مطالعه بررسی رابطه بین دگرشکلی و کانه‌زایی است، کرنش حجمی می‌تواند به‌عنوان شاخص مهمی از اتساع و فضای بالقوه ذخیره سیال مورد استفاده قرار گیرد.

کرنش حجمی را می‌توان از سه مؤلفه اصلی کرنش

جدول ۱: پارامترهای سه‌بعدی کرنش در محل‌های مختلف نمونه‌برداری

|                                       | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | 6       | 7       | 8       | 9       | 10      | 11      |
|---------------------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| X                                     | 539283  | 539294  | 539290  | 539274  | 540704  | 541025  | 542336  | 542369  | 542701  | 542698  | 542697  |
| Y                                     | 3657290 | 3657293 | 3657308 | 3657329 | 3657004 | 3656705 | 3655322 | 3655287 | 3655307 | 3655326 | 3655345 |
| Z                                     | 1275    | 1272    | 1272    | 1272    | 1409    | 1470    | 1605    | 1614    | 1656    | 1658    | 1662    |
| $\varepsilon_{xx}$                    | 0.27    | 0.33    | 0.12    | 0.12    | 0.22    | 0.18    | 0.12    | 0.12    | 0.03    | 0.15    | 0.21    |
| $\varepsilon_{yy}$                    | 0.07    | 0.02    | 0.1     | -0.1    | 0.05    | 0.06    | 0.18    | 0.03    | 0.12    | 0.02    | 0.1     |
| $\varepsilon_{zz}$                    | -0.15   | -0.11   | 0.06    | -0.14   | -0.11   | -0.12   | -0.08   | -0.17   | -0.08   | -0.16   | 0.02    |
| $\varepsilon_{xx} - \varepsilon_{yy}$ | 0.04    | 0.0961  | 0.0004  | 0.0484  | 0.0289  | 0.0144  | 0.0036  | 0.0081  | 0.0081  | 0.0169  | 0.0121  |
| $\varepsilon_{yy} - \varepsilon_{zz}$ | 0.0484  | 0.0169  | 0.0016  | 0.0016  | 0.0256  | 0.0324  | 0.0676  | 0.04    | 0.04    | 0.0324  | 0.0064  |
| $\varepsilon_{zz} - \varepsilon_{xx}$ | 0.1764  | 0.1936  | 0.0036  | 0.0676  | 0.1089  | 0.09    | 0.04    | 0.0841  | 0.0121  | 0.0961  | 0.0361  |
| $\gamma_{oct}$                        | 0.172   | 0.185   | 0.025   | 0.114   | 0.135   | 0.123   | 0.111   | 0.121   | 0.081   | 0.127   | 0.078   |
| L                                     | 72.6    | 31.2    | 115     | 68      | 60.3    | 194     | 53.3    | 24.7    | 108     | 40      | 141     |
| w                                     | 16      | 12      | 25      | 16      | 14      | 40      | 13      | 8       | 22      | 8       | 35      |
| d                                     | 32      | 32      | 30      | 38      | 28      | 25      | 38      | 28      | 32      | 36      | 31      |
| v                                     | 37171.2 | 11980.8 | 86250   | 41344   | 23637.6 | 194000  | 26330.2 | 5532.8  | 76032   | 11520   | 152985  |

|                                 |          |         |         |          |           |          |          |          |         |         |          |
|---------------------------------|----------|---------|---------|----------|-----------|----------|----------|----------|---------|---------|----------|
| SG                              | 3.564    | 3.564   | 3.564   | 3.564    | 0         | 3.564    | 3.564    | 3.564    | 3.564   | 3.564   | 0        |
| T                               | 22723.86 | 7881.13 | 7667.78 | 16843.51 | 0         | 85243.49 | 10430.93 | 2389.886 | 221.621 | 5218.57 | 0        |
|                                 | 12       | 13      | 14      | 15       | 16        | 17       | 18       | 19       | 20      | 21      | 22       |
| X                               | 542695   | 542715  | 542715  | 542719   | 542736    | 542782   | 542869   | 542861   | 542873  | 542928  | 542942   |
| Y                               | 3655367  | 3655322 | 3655342 | 3655325  | 3655321   | 3655300  | 3655284  | 3655280  | 3655288 | 3655186 | 3655173  |
| Z                               | 1667     | 1663    | 1667    | 1665     | 1669      | 1677     | 1705     | 1700     | 1706    | 1731    | 1736     |
| $\epsilon_{xx}$                 | 0.38     | 0.22    | 0.35    | 0.28     | 0.23      | 0.22     | 0.27     | 0.18     | 0.26    | 0.17    | 0.24     |
| $\epsilon_{yy}$                 | 0.12     | 0.1     | 0.15    | 0.1      | 0.12      | 0.04     | -0.03    | 0.1      | 0.05    | -0.1    | 0.12     |
| $\epsilon_{zz}$                 | 0.07     | -0.2    | -0.4    | -0.2     | -0.1      | -0.18    | -0.22    | 0.05     | -0.17   | -0.2    | -0.1     |
| $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$ | 0.0676   | 0.0144  | 0.04    | 0.0324   | 0.0121    | 0.0324   | 0.09     | 0.0064   | 0.0441  | 0.0729  | 0.0144   |
| $\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz}$ | 0.0025   | 0.09    | 0.3025  | 0.09     | 0.0484    | 0.0484   | 0.0361   | 0.0025   | 0.0484  | 0.01    | 0.0484   |
| $\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx}$ | 0.0961   | 0.1764  | 0.5625  | 0.2304   | 0.1089    | 0.16     | 0.2401   | 0.0169   | 0.1849  | 0.1369  | 0.1156   |
| $\gamma_{oct}$                  | 0.136    | 0.177   | 0.317   | 0.198    | 0.137     | 0.163    | 0.202    | 0.053    | 0.176   | 0.156   | 0.141    |
| L                               | 93.5     | 77      | 35      | 41       | 61.5      | 92.2     | 112      | 80.1     | 31.2    | 42      | 34       |
| w                               | 28       | 17      | 9       | 8        | 14        | 26       | 32       | 21       | 8       | 10      | 8        |
| d                               | 31       | 37      | 32      | 36       | 36        | 42       | 38       | 32       | 45      | 41      | 28       |
| v                               | 81158    | 48433   | 10080   | 11808    | 30996     | 100682.4 | 136192   | 53827.2  | 11232   | 17220   | 7616     |
| SG                              | 3.564    | 0       | 3.564   | 3.564    | 0         | 0        | 0        | 3.564    | 0       | 3.564   | 3.564    |
| T                               | 39306.4  | 0       | 11392   | 8332.15  | 0         | 0        | 0        | 10271.36 | 0       | 9590.99 | 3821.561 |
|                                 | 23       | 24      | 25      | 26       | 27        | 28       | 29       | 30       |         |         |          |
| X                               | 542954   | 542981  | 542960  | 543027   | 543013    | 543024   | 542997   | 543120   |         |         |          |
| Y                               | 3655181  | 3655158 | 3655173 | 3655177  | 3655098   | 3655085  | 3654765  | 3654656  |         |         |          |
| Z                               | 1739     | 1751    | 1741    | 1765     | 1765      | 1774     | 1733     | 1767     |         |         |          |
| $\epsilon_{xx}$                 | 0.2      | 0.46    | 0.28    | 0.24     | 0.19      | 0.21     | 0.28     | 0.23     |         |         |          |
| $\epsilon_{yy}$                 | 0.17     | 0.12    | 0.16    | 0.07     | 0.18      | 0.22     | 0.1      | 0.22     |         |         |          |
| $\epsilon_{zz}$                 | 0.1      | -0.15   | 0.1     | -0.22    | -0.12     | 0.12     | -0.14    | 0.1      |         |         |          |
| $\epsilon_{xx} - \epsilon_{yy}$ | 0.0009   | 0.1156  | 0.0144  | 0.0289   | 0.0001    | 0.0001   | 0.0324   | 0.0001   |         |         |          |
| $\epsilon_{yy} - \epsilon_{zz}$ | 0.0049   | 0.0729  | 0.0036  | 0.0841   | 0.09      | 0.01     | 0.0576   | 0.0144   |         |         |          |
| $\epsilon_{zz} - \epsilon_{xx}$ | 0.01     | 0.3721  | 0.0324  | 0.2116   | 0.0961    | 0.0081   | 0.1764   | 0.0169   |         |         |          |
| $\gamma_{oct}$                  | 0.042    | 0.249   | 0.075   | 0.19     | 0.144     | 0.045    | 0.172    | 0.059    |         |         |          |
| L                               | 58       | 60      | 77      | 82       | 48        | 55       | 80       | 64       |         |         |          |
| w                               | 12       | 12      | 17      | 18       | 10        | 13       | 20       | 13       |         |         |          |
| d                               | 42       | 49      | 38      | 28       | 40        | 44       | 38       | 30       |         |         |          |
| v                               | 29232    | 35280   | 49742   | 41328    | 19200     | 31460    | 60800    | 24960    |         |         |          |
| SG                              | 3.564    | 3.564   | 0       | 0        | 3.564     | 3.564    | 0        | 3.564    |         |         |          |
| T                               | 4365.194 | 31381.3 | 0       | 0        | 9842.5472 | 5042.093 | 0        | 5254.433 |         |         |          |

را برای ارزیابی رابطه بالقوه بین دگرشکلی شکننده و مکان‌یابی کانسنگ با یکدیگر ترکیب می‌کند.

### ۳. نتایج

محاسبه مؤلفه‌های سه‌بعدی کرنش در مکان‌های مختلف محدوده اکتشافی گدار سیاه، مبنای مناسبی برای برآورد حجم فضای باز ایجادشده در اثر

دگرشکلی در پهنه‌های کانهدار فراهم کرد. برای این منظور، نمونه‌های جهت‌دار از ۳۰ محل درون بلوک‌های کانهدار برداشت شدند. محل‌های نمونه‌برداری شامل پهنه‌های برشی نمایان‌شده در تونل‌های زیرزمینی در اعماق و ارتفاعات توپوگرافی مختلف، رگه‌های کانهدار نمایان در سطح زمین و ترانشه‌ها بودند. نمونه‌ها با جهت‌گیری مناسب برداشت شدند تا امکان

پارامترهای کرنش محاسبه‌شده سپس برای ارزیابی شدت دگرشکلی و پتانسیل توسعه فضاهای باز درون پهنه‌های برشی کانه‌دار مورد استفاده قرار گرفتند.

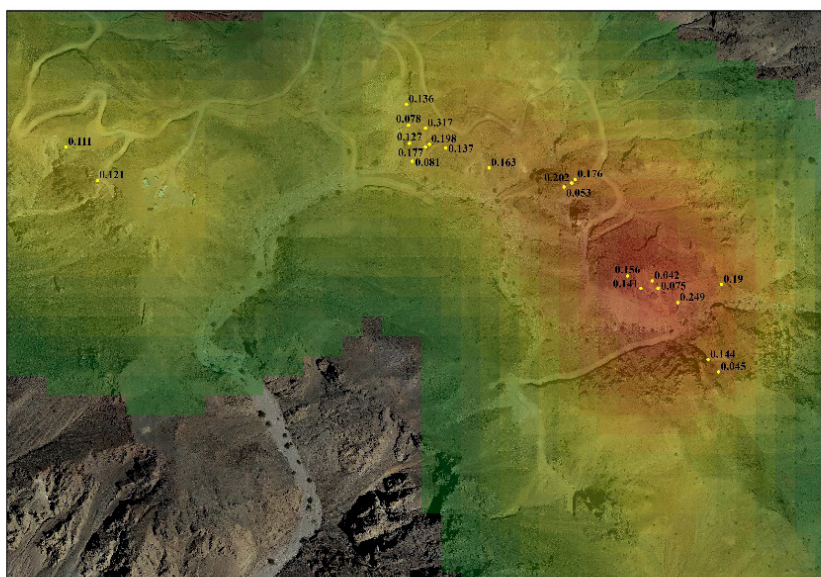
با در نظر گرفتن ابعاد هندسی هر پهنه برشی، حجم متناظر فضای باز مرتبط با دگرشکلی برآورد شد. در نهایت، با استفاده از میانگین چگالی توده‌ای (وزن مخصوص) کانسنگ درون بلوک‌های کانه‌دار گدار سیاه، حجم برآوردشده فضای باز به تناژ تقریبی کانسنگ تبدیل شد.

بنابراین، رویکرد پیشنهادی رابطه‌ای کمی میان کرنش

اندازه‌گیری و تعیین مؤلفه‌های سه‌بعدی کرنش فراهم شود.

پارامترهای کرنش در صفحات جغرافیایی  $xy$ ،  $yz$  و  $zx$  اندازه‌گیری شدند (جدول ۱). مؤلفه‌های سه‌بعدی کرنش نرمال، شامل  $\epsilon_{xx}$ ،  $\epsilon_{yy}$  و  $\epsilon_{zz}$ ، برای هر محل نمونه‌برداری محاسبه شدند. سپس کرنش برشی اکتاهدري برای هر پهنه برشی شناسایی‌شده درون بلوک‌های کانه‌دار با استفاده از رابطه زیر تعیین شد:

$$\gamma_{oct} = \frac{1}{3} \sqrt{(\hat{a}_{xx} - \hat{a}_{yy})^2 + (\hat{a}_{yy} - \hat{a}_{zz})^2 + (\hat{a}_{zz} - \hat{a}_{xx})^2}$$



شکل ۶: ارتباط مستقیم بین تعداد رگه‌ها و میانگین کرنش برشی در منطقه

بلوکی نشان می‌دهد و بیانگر آن است که رویکرد مبتنی بر کرنش حجمی می‌تواند به‌عنوان روشی مستقل و مفید برای برآورد حجم و تناژ ماده معدنی درون پهنه برشی مورد استفاده قرار گیرد.

### قدردانی

این پژوهش با حمایت گروه صنعتی و معدنی زرین مالک محدود گدارسیاه انجام شده است که بدینوسیله مراتب قدردانی خود را از گروه فوق اعلام می‌داریم.

### منابع

[1] اجل لوثیان، ر.، محمدی، م.، ۱۳۹۰. ارزیابی خصوصیات ژئومکانیکی سنگ‌های آهکی سازند

سه‌بعدی، هندسه پهنه برشی، فضای باز ایجادشده در اثر دگرشکلی و تناژ برآوردشده ماده معدنی در محدوده اکتشافی گدار سیاه فراهم می‌کند.

بر اساس نتایج به‌دست‌آمده، برای محل‌های نمونه‌برداری که عیار تجمعی سرب‌روی آن‌ها حداقل ۶ درصد بود، تناژ تقریبی کانسنگ ۲۹۷۰۲۲۱ تن برآورد شد. محل‌های نمونه‌برداری با عیار کانسنگ کمتر از ۶ درصد از برآورد تناژ حذف شدند.

با فرض اینکه ۷۰ درصد از فضاهای باز ایجادشده متعاقباً توسط ماده معدنی پر شده باشند، تناژ کانسنگ برآوردشده با استفاده از رویکرد مبتنی بر کرنش حجمی حدود ۲۰۸۰۵۴۰۷ تن محاسبه شد. این برآورد تطابق خوبی با تناژ به‌دست‌آمده از روش مدل‌سازی



Mining Coal, Geofluids, Hindawi, 2021.

- [8] Zhou Y, Lin G, Yang Li-qi,. 2008, Numerical simulation of rock deformation during the mineralization of the Xiangshan uranium deposit, Jiangxi province, south China, Journal of China University of Mining and Technology,18.

آسماری در ساخت گاه سدهای خرسان ۱ و ۲، مجله زمین شناسی مهندسی دانشگاه خوارزمی .

- [2] Kavyani-Sadr, Kh . Rahimi, Behnam , Khatib, M,M . Kim, Y (2022). *Assessment of open spaces related to Riedel-shears dip effect in brittle-shear zones*. Journal of Structural Geology, 154, 104486

- [3] López, M , Cruset, D. ,Cantarero D, Benedicto,I. An-tonio , , Cédric , J- Travé, A. Fluid Dynamics in a Thrust Fault In-ferred from Petrology and Geochemistry of Calcite Veins: An Example from the Southern Pyrenees Geofluids. 2020. 25. 10.1155/2020/8815729.

- [4] Masurel, Quentin , Thébaud, Nicolas , Allibone, A. , André-Mayer, Anne-Sylvie , Hein, Kim , Reisberg, Laurie . Aurélien , E . John, M.

Intrusion-related affinity and orogenic gold overprint at the Paleoproterozoic Bonikro Au–(Mo) deposit (Côte d’Ivoire, West African Craton). Mineralium Deposita. 57. (2022). 10.1007/s00126-019-00888-2.

- [5] Kenworthy S, Steffen G. H, Fault and vein relationships in a reverse fault system at the Centenary orebody (Darlot gold deposit), Western Australia: Implications for gold mineralisation, Journal of Structural Geology, Volume 29, Issue 4, 2007, Pages 712-735, ISSN

- [6] Abd El-Wahed M A., Harraz H., El-Behairy M H.

Transpressional imbricate thrust zones controlling gold mineralization in the Central Eastern Desert of Egypt, Ore Geology Reviews, Volume 78, 2016, Pages 424-446,

- [7] Rui Zhou , Yujin Qin, Yang Hu The Role of the Reverse Fault on the Permeability Evolution in