



فصلنامه زمین ساخت

زمستان ۱۳۹۹، سال چهارم، شماره ۱۷

10.22077/JT.2021.4452.1115

## بررسی ارتباط بین ابعاد بلوک‌های گسلی و مقدار فضاهای باز در پهنه‌های برشی شکنا از طریق مدل‌سازی آنالوگ و عددی

خشایار کاویانی صدر<sup>۱</sup>، بهنام رحیمی<sup>۲\*</sup>، محمد مهدی خطیب<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران khashayargeologist@yahoo.com

۲- استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه فردوسی مشهد، ایران b-rahimi@um.ac.ir

۳- استاد، گروه زمین شناسی، دانشگاه بیرجند، ایران mkhatib@birjand.ac.ir

تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۱۸

### چکیده

هندسه ذخایر معدنی در پهنه‌های برشی شکنا، به فضای باز موجود در این پهنه‌ها و به خصوص ساختارهای ریدل وابسته است. تلاقی سیستماتیک شکستگی‌های ریدل در مسیر پهنه‌های مزبور، باعث تشکیل بلوک‌های ریدل می‌شود که ابعاد آن‌ها متناسب با فاصله‌بندی بین این شکستگی‌هاست. با افزایش کرنش برشی (γ) در یک پهنه برشی و به دنبال آن چرخش بلوک‌های مزبور، انتظار می‌رود فضاهای باز متناسبی پدید آید که با نفوذ و نهشت محلول‌های کانه‌دار درون این فضاها، باعث تشکیل رگه معدنی هم‌شکل این فضاها گردد. از آنجایی که مقدار فضاهای باز در پهنه‌های برشی متفاوت است، در این تحقیق از طریق مدل‌سازی تجربی و عددی با استفاده از نرم‌افزار 3DEC نشان داده شد که تغییر در ابعاد بلوک‌ها در شرایط جنبشی برابر، یکی از پارمترهای تأثیرگذار بر مقدار فضاهای باز این پهنه‌هاست. لذا این حجم از فضاهای خالی در گستره واحدی از پهنه‌های برشی گوناگون که از جنبه فاصله‌بندی شکستگی‌های ریدل با یکدیگر متفاوت هستند، با افزایش ابعاد بلوک‌های ریدل، رابطه معکوس دارد؛ به نحوی که هر چه تعداد بلوک‌های ریدل بیشتر، چرخش بلوکی بیشتر و در پی آن فضا سازی بیشتری انتظار می‌رود. با افزایش کرنش برشی طی یک دگرشکلی پیش-رونده، در ابعاد بزرگ‌تر بلوک‌های ریدل مورد آزمایش، بیشتر نیرو صرف لغزش‌های بین بلوک‌های ریدل می‌شود تا چرخش بلوکی و ایجاد فضای باز. مقدار فضای باز ایجاد شده در مدل‌سازی عددی همخوانی مطلوبی را با مدل‌سازی آنالوگ نشان می‌دهد.

**واژه‌های کلیدی:** پهنه برشی، بلوک گسلی، حجم ذخیره معدنی، مدل‌سازی آنالوگ، مدل‌سازی عددی.



## Investigating the relationship between the dimension of the Riedel fault blocks and amount of open spaces in brittle shear zones: analogue and numerical modeling

Khashayar Kavyani-Sadr<sup>1</sup>; Behnam Rahimi<sup>2\*</sup>; Mohammad Mahdi Khatib<sup>3</sup>

- 1- PhD student in Tectonics, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- 2- Professor, Department of Geology, Ferdowsi University of Mashhad, Iran.
- 3- Professor, Department of Geology, University of Birjand, Iran.

### Abstract:

The geometry of mineral deposits in brittle shear zones depends on the open spaces in these zones and especially in the Riedel structures. The systematic intersection of Riedel fractures in the path of these zones causes the formation of Riedel blocks, the dimensions of which are proportional to the spacing between these fractures. By increasing the shear strain ( $\gamma$ ) in a shear zone and consequently the rotation of these blocks, it is expected to create proportionate open spaces that with the penetration and deposition of ores in these spaces, causes the formation of mineral veins in all these spaces. Since the amount of open spaces in shear zones is different, in this study, through analogue and numerical modeling using 3DEC software, it was shown that the change in the dimensions of the blocks in equal kinetic conditions is one of the parameters affecting the amount of open spaces of these zones. Therefore, this volume of open spaces in a single range of different shear zones, which are different from each other in terms of spacing of Riedel fractures, is inversely related to increasing the dimensions of Riedel blocks; the more Riedel blocks, the more block rotation and consequently more space is expected. As the shear strain increases during a progressive deformation, in bigger dimensions of the Riedel blocks tested, more force is expended on inter-block slips than on block rotation and open space. The amount of open spaces created in numerical modeling shows good agreement with this type of modeling.

**Keywords:** Shear zone, Fault block, Mineral reserve volume, Analogue modeling, Numerical modeling.

## مقدمه

متعدد شده و متحمل صرف هزینه‌های استخراجی گزاف می‌گردند. آسان‌ترین تحلیل پیرامون سازوکار تشکیل رگه‌های معدنی در یک معدن، مرتبط دانستن آنها با راستای شکستگی‌های کششی کششی و به‌موازات تنش بیشینه اعمال شده در آن منطقه است، درحالی‌که این مهم می‌تواند در کنترل سایر شکستگی‌های پهنه برشی نیز امکان‌پذیر باشد. می‌دانیم وجود گورژ گسلی در حاشیه رگه معرف این است که ابتدا برش رخ داده و سپس به‌واسطه جنبش‌های حاصله، فضاهای باز ایجاد و نهشت محلول‌های هیدروترمال در کنترل ساختار مربوط و تشکیل رگه معدنی اتفاق افتاده است (Chauvet, 2019). این درحالیست که شکستگی‌های کششی و رگه‌هایی که در این دسته از شکستگی‌ها ایجاد می‌شوند، فاقد گورژ گسلی در حواشی‌اند، زیرا متحمل برش نشده‌اند.

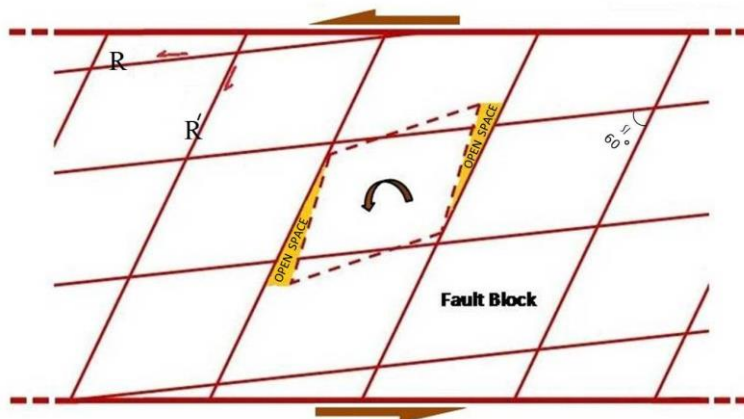
اصطلاح برش ریدل به یک الگوی شکستگی هندسی اشاره دارد که معمولاً با سیستم‌های گسلش امتدادلغز همراه است (Ahlgren, 2001). از زمانی که شکستگی‌های ریدل در یک پهنه برشی امتدادلغز توسط Riedel در سال ۱۹۲۹ ارائه گردید، مطالعات ارزشمندی بر روی این شکستگی‌ها در مسیر پهنه‌های برشی امتدادلغز صورت پذیرفت. خصوصیات هندسی ساختارهای برشی ریدل از طریق مدل‌سازی‌های آنالوگ به وضوح نشان داده شده‌اند (Cloos, 1955; Gamond, 1983; Tchalenko, 1968, 1970). همان‌طور که فاکتورهای نظیر لیتولوژی، رئولوژی و سیستم تنش، ماهیت یک پهنه تخریب‌شده را در یک سامانه گسلی امتدادلغز کنترل می‌کنند (Kim et al, 2004)، تا به حال تحقیق منسجمی در خصوص تاثیرات این فاکتورها در تشکیل و یا عدم تشکیل فضای باز با توجه به فاصله‌بندی برش‌های ریدل نسبت به هم صورت نگرفته است. تبیین هندسه و روابط هندسی میان شکستگی‌های ریدل در پهنه‌های برشی و نیز نقشی که در تشکیل فضای خالی برای نهشت محلول‌های کانه دار ایفا می‌نمایند، ضرورت مطالعه چگونگی تکوین و تکامل آنها در پهنه‌های برشی و نقشی کنترل‌کنندگی این ساختارها در هندسه رگه‌های معدنی را ایجاب می‌کند.

مدل‌سازی مبحثی پرکاربرد در جنبه‌های مختلف زمین‌شناسی، به‌ویژه زمین‌شناسی ساختاری به حساب می‌آید. از ابتدای قرن نوزده میلادی که مدل‌سازی آنالوگ وارد تحلیل فرآیندهای زمین‌شناسی گردید، این امکان برای محققان فراهم شد تا با ارائه مدل‌های کمی و کیفی، تغییری شگرف در نگرش به علم زمین‌شناسی ایجاد نمایند. مزیت مدل‌های آنالوگ در این است که فرصتی را فراهم می‌آورند تا با بررسی پارامترهای خاص در دو و سه بُعد، تحلیل‌های منحصر به فردی از یک تکامل ساختاری ارائه گردد (Cladouhos, 1999; Coelho, 2006, Ghosh, 2008). از آنجایی که پهنه‌های امتدادلغز درون قاره‌ای نیز معمولاً هندسه‌های سه‌بعدی پیچیده‌ای را با تغییرات الگوهای ساختاری در امتداد و عمق به نمایش می‌گذارند (Dooley, 2012). لذا در مدل‌سازی تمام تلاش بر این است که ساده‌سازی انجام شود.

نقش مهم شکستگی‌ها به‌عنوان کنترل‌کننده جریان سیال در سیستم‌های رگه‌ای و داشتن درکی صحیح از رفتار این نوع ساختارها، سهمی به‌سزا در پاسخ‌دهی به برخی ابهامات ساختاری مرتبط از طریق انواع روش‌های مدل‌سازی (آنالوگ - عددی) خواهد داشت. با توسعه فناوری‌های رایانه‌ای و خلق نرم‌افزارهای مدل‌سازی، مبحث مدل‌سازی عددی نیز جایگاه خود را به عنوان منبعی معتبر برای تحلیل‌های علمی به ویژه تحلیل‌های ساختاری پیدا نمود، به گونه‌ای که اغلب به عنوان مسیری کم‌هزینه‌تر و سریع‌تر مفید بوده و همچنین در راستای کنترل مدل‌سازی‌های آنالوگ و اعتبارسنجی این نوع از مدل‌سازی به کار برده می‌شود. یکی از عوامل مهم موثر در کانه‌زایی در هر ناحیه، گسلش و شکستگی‌های موجود می‌باشند که در واقع راهی برای نفوذ سیالات کانه‌دارند. اغلب کانه‌زایی‌ها در مناطق با شکستگی زیاد و به‌ویژه در محل تلاقی این شکستگی‌ها اتفاق می‌افتد (Sabins, 1999). معدن کاوان در معادن تیپ رگه‌ای در اغلب موارد به دلیل عدم شناخت مفهومی از الگوی انتشار رگه‌ها، در تخمین و ارزیابی محدوده معدنی دچار چالش‌های

بنابراین با چرخش این بلوک‌ها، شرایط مناسب برای تشکیل فضاهای باز و عمیق مرتبط با هندسه گسل‌های امتدادلغز فراهم شده (Sylvester, 1988) و تسهیل جریان سیالات کانه‌دار را در سیستم‌های هیدروترمال سبب می‌شود. به طور کلی محل برخورد گسل‌ها و همچنین محل برخورد شکستگی‌های فرعی حاصل از پهنه‌های برش می‌تواند مکان مستعدی برای نفوذ ماگما و محلول‌های کانه‌زایی باشد (Forster, 1978). از آنجایی که شکستگی‌های ریدل در یک پهنه برش ایجاد می‌شوند، بنابراین با ادامه کرنش در یک دگرشکلی پیش‌رونده، اغلب نیرو صرف لغزش بر روی شکستگی‌های موجود می‌گردد تا آن‌که بخواهد شکستگی‌های جدیدی را تشکیل دهد (Hancock, 1985).

بسیاری از دگرشکلی‌های مرتبط با نیروهای زمین‌ساختی، حاصل فرآیندهای برشی هستند (Brown and Solar, 1998; Peacock, 2002; Wang and Ludman, 2004; Brogi, 2006) و در اثر این فرآیندهای برشی در مسیر پهنه‌های برشی امتدادلغز و تلاقی شکستگی‌های حاصل از برش‌های ریدل این پهنه‌ها با یکدیگر، بلوک‌های گسلی حاصل می‌شوند که تحت تأثیر تنش‌هایی که بر آن اعمال می‌گردد، چرخش بلوک‌های مزبور اتفاق افتاده که این چرخش وابسته به میزان جنبش پهنه برشی است (Davis & Reynolds, 1996) (شکل ۱). در یک تغییر ساختاری پیش‌رونده از نوع برش ساده، لغزش بر روی شکستگی‌های ریدل سبب چرخش بلوک‌های گسلی و ایجاد فضای خالی میان آنها می‌شود (Coelho, 2006).



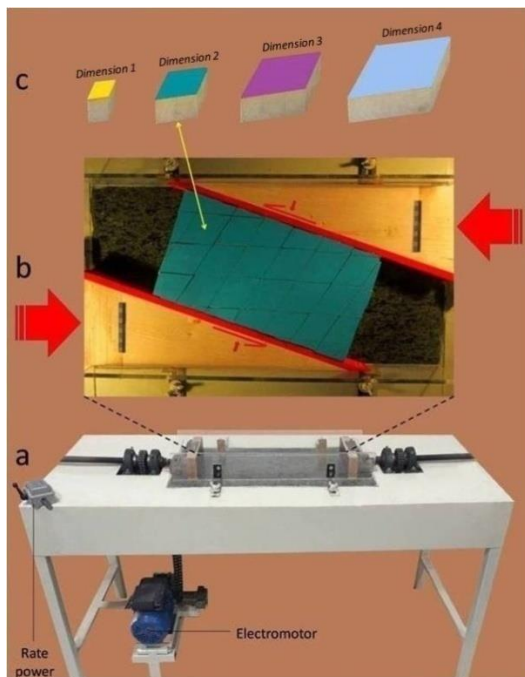
شکل ۱. طرح شماتیک از چرخش پادساعتگرد بلوک‌های حاصل از تقاطع شکستگی‌های  $R$  و  $R'$  در یک پهنه برشی امتدادلغز چپ‌گرد شکنا.

بلوک‌های گسلی حاصله، تأثیرگذار است (Dholakia et al., 1998) را نبایست نادیده گرفت.

از آنجایی که هدف این تحقیق بررسی پهنه‌هایی با رفتار مکانیکی صلب و شکننده است، در این تحقیق نیز تنها به بررسی ساختارهای ریدل این نوع از پهنه‌ها پرداخته می‌شود. با توجه به آنکه هم‌بستگی سیستماتیکی بین دسته‌های برش-های  $R$  و  $R'$  و همچنین زاویه بین آن‌ها برقرار است (Katz, 2004) و در تشکیل شکستگی‌های فرعی ریدل در یک زون برش فرض بر این است که پدیده در اثر اتصال انبوهی از ریزساختارهای مزدوج در طول پهنه برش باشد که به ایجاد

علاوه بر عواملی نظیر تغییرات تنش در زمان خاص، نرخ کرنش و بسیاری عوامل دیگر که بر تشکیل سیستماتیکی شکستگی‌ها تأثیر گذارند، سایر جنبه‌ها نظیر نوع سنگ و رفتار شکنای سنگ‌ها (هرچه سنگ شکننده‌تر، تراکم شکستگی‌ها بیشتر، فاصله بین شکستگی‌ها کمتر)، مقاومت کششی سنگ (هر اندازه مقاومت کششی سنگ کمتر، فاصله‌بندی کمتر)، تغییرات فشار منفذی سنگ‌ها، همگنی سنگ‌ها و جایگاه ساختاری که یک پهنه برشی در آن واقع است و... که بر میزان فاصله‌بندی شکستگی‌های ریدل و به دنبال آن ابعاد

شکنا) برای این منظور به سبب آنکه ریزش ماسه‌ها سبب پُرشدن فضاهای باز ایجاد شده می‌گردد مناسب نیست، لذا به عنوان جایگزین از ماده‌ای استفاده شد که قابلیت برش خوردن داشته و دارای ویژگی جابجایی‌های صلب بوده و نماینده خوبی برای رفتار یک لیتولوژی شکنا باشد. برای این منظور چوب بهترین مورد به نظر رسید که قابلیت ایجاد برش، اجرا و پیاده‌سازی بهتری را داراست و فضاهای بازی که از این-طریق به دست می‌آیند، کاملاً واضح و قابل اندازه‌گیری اند.



شکل ۲. a: اجزاء تشکیل دهنده دستگاه مورد استفاده در مدل سازی آنالوگ، b: نمای بالا از مدل سازی آنالوگ (به عنوان مثال بُعد شماره ۲) و بلوک‌های لوزی شکل گسلی تعبیه شده در قالب یک پهنه ترافشارشی چپ‌گرد، c: نمای سه‌بعدی از بلوک‌های ریدل در ابعاد مختلف.

در ادامه، بر روی تخته‌های واحدی که بر روی آن برش-های قائمی به موازات هم در دو راستای  $15^\circ$  و  $75^\circ$  نسبت به لبه پهنه برش، متناسب با مقدار متوسط برش‌های ریدل یک پهنه برشی امتدادلغز ایجاد گردید (شکل 2-b). علیرغم اینکه می‌دانیم برش‌های ریدل ابتدا با زاویه کمتری از زون اصلی برش جدا می‌شوند، سپس جهت را تغییر می‌دهند تا زاویه بزرگتری با محور برشی پیدا کنند (Chemenda, 2015)، اما برای آنکه برش‌ها قابلیت پیاده‌سازی و اجرا در

شکستگی‌های برشی در مقیاس بزرگ می‌انجامد، بنابراین این مستلزم آن است که میدان استرس در مقیاسی وسیع و به طور پیوسته وجود داشته باشد (Xu et al, 2013).

بر مبنای تشکیل فضاهای باز در روندهای ساختاری که متحمل کانه‌زایی شده‌اند، بر آن شدیم تا با مطالعه مقدار فضاهای باز حاصل از تلاقی شکستگی‌های فرعی و چرخش بلوک‌های گسلی در ابعاد مختلف و متناسب با پهنه‌های امتدادلغز شکنا و صلب در مقادیر مختلفی از کرنش برشی، سعی در ارائه تفسیری مناسب می‌باشد تا در مطالعات معدنی و بهینه‌سازی راندمان اکتشافی-استخراجی حاصل از این مطالعات، گام مفیدی برداریم. لذا در همین راستا، هدف این تحقیق در این است که با انجام و تکرار آزمایشات منسجم و ضابطه‌مند بر روی حالت‌های متنوع از ابعاد بلوک‌های حاصل از برش‌های ریدل در یک پهنه برشی و بررسی فضاهای باز ایجاد شده حایل در تلاقی این شکستگی‌ها و حاصل از جنبش و چرخش‌های بلوکی در حالتی از برش ساده تا ترافشارش در ضریب‌های برشی مختلف، به ارائه تفسیری از تفاوت مقدار فضاهای باز و ارتباط آن با ابعاد متنوع بلوک-های ریدل (بلوک‌های حاصل از تلاقی شکستگی‌های R و R' پهنه برشی) پرداخته شد.

## مدل سازی آنالوگ

### راه‌اندازی مدل آنالوگ

برای راه‌اندازی مدل، از دستگاه برشی که شامل دو فک متحرک بوده و توسط یک اهرم به همدیگر نزدیک یا از هم دور می‌شوند استفاده گردید (شکل 2-a). این دستگاه بر روی میزی به ارتفاع ۹۰ سانتی‌متر نصب شده است. فک‌های متحرک نسبت به محور محرک که اعمال تنش می‌کند، زاویه ۹۰ درجه می‌سازند. رفتار مواد مختلف وقتی تحت اعمال تنش قرار می‌گیرند بسته به نوع ماده متفاوت می‌باشد، از آنجایی که هدف ما در این آزمایش اندازه‌گیری فضاهای باز حاصل از چرخش بلوک‌های ریدل در ابعاد متنوع است، استفاده از ماسه فشرده (ماده معمول در مدلسازی شرایط



مورد نظر قرار گرفت. بدین منظور، با تعبیه دو گوه، محفظه دستگاه به گونه‌ای طراحی گردید تا وقتی گوه‌ها در خلاف جهت هم به یکدیگر نزدیک می‌شوند، یک پهنه ترافشاری چپ‌گرد را ایجاد نماید (هم مؤلفه برشی را داشته باشیم و هم مؤلفه فشارشی) (شکل 2-b). برای هر مدل، در اطراف قالب مستطیلی کل بلوک‌ها، از یک نوار کشسان به منظور کنترل بلوک‌ها و جلوگیری از خروج آن‌ها از میدان تأثیرگذاری نیروی حاصل از پهنه برش استفاده شد. آزمایش هر مدل چندین بار با سرعت‌های مختلف موتور دستگاه تکرار شد که هر بار نتایج یکسانی را به نمایش می‌گذاشت. بنابراین در این تحقیق از تصاویر سرعت متوسط موتور  $1\text{mm/s}$  استفاده گردید. ران هر یک از مدل‌ها در شرایطی مشابه انجام گردید به گونه‌ای که میزان جابجایی کل سیستم ترافشاری در هر مدل،  $8\text{cm}$  بود که در هر  $1\text{cm}$  جابجایی، حجم فضای باز حاصله در میان بلوک‌های تعبیه شده در آزمایشگاه به صورت اندازه‌گیری هندسی محاسبه شد که در جدول ۱ به این مقادیر اشاره شده است. شکل ۳، مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل‌سازی‌های آنالوگ را در ابعاد شماره ۱ تا ۴ بلوک‌های ریدل، تحت سازوکار ترافشارشی چپ‌گرد نشان می‌دهد.

مدل را داشته باشند، تصمیم بر آن شد تا زوایا با امتدادی یکسان بر روی چوب برش بخورند. همین وضعیت برای حالت‌های دیگر با فواصل برشی به صورت تصاعد حسابی نیز تکرار گردید تا ابعاد بلوک‌ها در مدل‌ها به صورت زیر باشند (شکل 2-c):

بُعد شماره ۱: طول اضلاع لوزوی =  $28$  میلی‌متر (شکل 2-c-Dimension1).

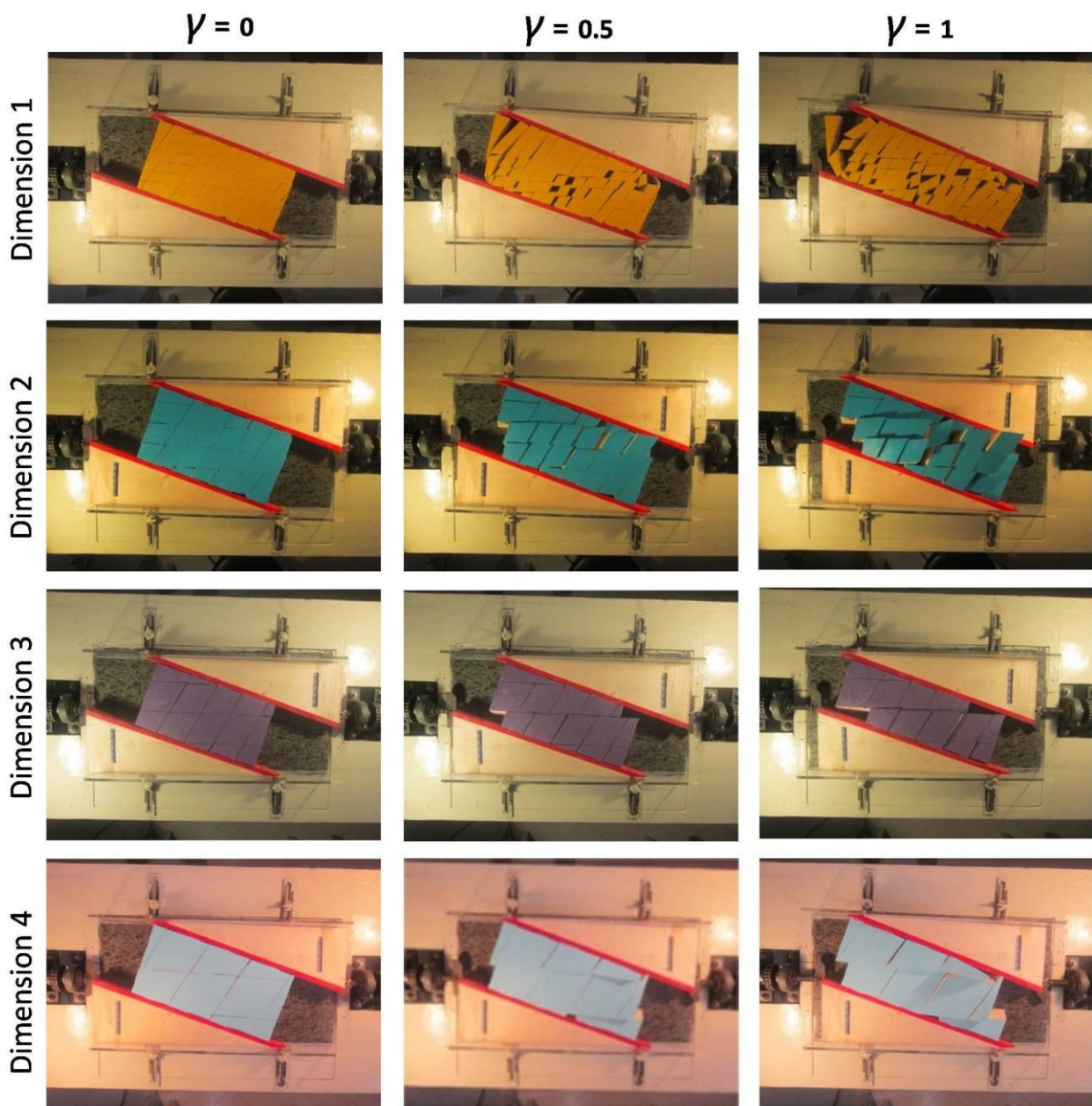
بُعد شماره ۲: فاصله بین برش‌های ایجاد شده بر روی چوب یا به عبارتی طول اضلاع لوزوی‌ها =  $56$  میلی‌متر (شکل 2-b و 2-c-Dimension2).

بُعد شماره ۳: طول اضلاع لوزوی =  $84$  میلی‌متر (شکل 2-c-Dimension3).

بُعد شماره ۴: طول اضلاع لوزوی =  $112$  میلی‌متر (شکل 2-c-Dimension4).

به دلیل اینکه اغلب پهنه‌های موجود در طبیعت، دارای مولفه فشاری می‌باشند، در این تحقیق ارزیابی پهنه‌های ترافشارشی



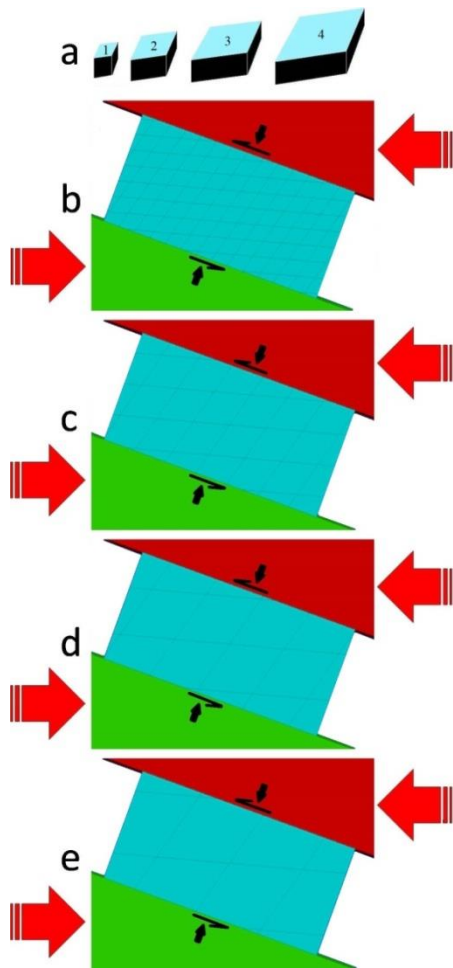


شکل ۳. تصاویری از مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل سازی های آنالوگ در ابعاد شماره ۱ تا ۴ بلوک های ریدل، تحت سازوکار ترا فشارشی چپ گرد.

### نتایج حاصل از مدل سازی آنالوگ

با افزایش کرنش برشی، چرخش یا جابجایی بلوک های گسلی، فضاهای باز در بین بلوک ها ظاهر می شوند. در حالت بعد شماره 1، به سبب آنکه تعداد بلوک های بیشتری در قالب مدل جای داشتند، چرخش بلوکی بیشتر و در پی آن فضا سازی های بیشتری را شاهد بودیم. این در حالیست که با افزایش کرنش برشی ( $\gamma$ ) طی یک دگرشکلی پیش رونده

(افزایش فرآیند برش در گسل های اصلی و سازنده پهنه برشی)، در ابعاد شماره ۳ و ۴ بلوک های ریدل، بیشتر نیرو صرف برش بین شکستگی های ریدل و لغزش های بین بلوکی می شود تا چرخش بلوکی و ایجاد فضای باز. در ادامه اشاره خواهد شد که مقدار فضای باز در مدل سازی عددی بیشتر است زیرا در مدل سازی عددی نمی توان به همه عواملی که بر روی مدل تأثیر گذار است پرداخت.



### مدل‌سازی عددی

مدل‌سازی عددی این تحقیق توسط نرم‌افزار کاربردی 3DEC انجام شد. اگرچه روش‌های عددی تنوع زیادی دارند که اغلب برای مدل‌سازی پیوسته استفاده می‌شوند، ولی از آنجا که محیط‌های سنگی عمدتاً دارای درزه و شکاف بوده و ناپیوسته هستند، باید با روش‌های ناپیوسته آنها را مدل‌سازی کرد. لذا این نرم‌افزار یک برنامه سه‌بعدی است که پایه آن، فرمولاسیون عددی تست شده در برنامه دو بعدی UDEC می‌باشد و براساس روش اجزاء مجزا و در مدل‌سازی‌های محیط‌های ناپیوسته کاربرد دارد. این نرم‌افزار قادر است محیط‌های ناپیوسته مانند توده سنگ‌های دارای درزه (گسله) را تحت شرایط بارگذاری دینامیکی یا استاتیکی شبیه‌سازی کند به گونه‌ای که محیط توده سنگ را به بلوک‌های مجزای صلب و یا تغییر شکل پذیر تقسیم کرده و با در نظر گرفتن ناپیوستگی بین آنها، تغییر شکل و چرخش آنها را محاسبه می‌نماید. از این نرم‌افزار بیشتر در مطالعات مربوط به مهندسی معدن، عمران و زلزله استفاده می‌شود که دارای چندین مدل رفتاری برای بلوک‌های سنگی و ناپیوستگی‌هاست و از بیان بیشتر جزئیات نرم‌افزار در این تحقیق صرف‌نظر می‌شود. از طریق این نرم‌افزار می‌توان مدل رفتاری ناپیوستگی‌های ساختاری را به رفتار واقعی آنها نزدیک کرد، بنابراین می‌تواند روش بسیار مناسبی در اجرا و پایش رفتار دینامیکی سیستم‌های بلوکی باشد. در ادامه مدل‌سازی آنالوگ، سعی شد تا محیط نرم‌افزار از طریق کدنویسی به گونه طراحی شود که شرایطی بسیار نزدیک با مدل‌های آنالوگ اجرا شود (شکل ۴).

شکل ۴. تصاویر مرحله آغازین مدل‌سازی عددی در

ابعاد شماره ۱ تا ۴ بلوک‌های ریدل، تحت سازوکار

توافشارشی چپ‌گرد، a: نمای سه‌بعدی از بلوک‌های ریدل در ابعاد مختلف مدل‌سازی عددی، b: بُعد شماره ۱ بلوک-های ریدل در مدل‌سازی عددی، c: بُعد شماره ۲ بلوک-های ریدل در مدل‌سازی عددی، d: بُعد شماره ۳ بلوک-های ریدل در مدل‌سازی عددی، e: بُعد شماره ۴ بلوک-های ریدل در مدل‌سازی عددی.

برای این منظور، اندازه مش‌های سطوح گسسته (منطبق بر شکستگی‌های R و R' پهنه برشی چپ‌گرد) به صورت زیر و منطبق بر مدل‌سازی آنالوگ انتخاب شد:

بُعد شماره ۱: اندازه مش‌ها (اضلاع لوزوی‌ها) =  $0,028$  متر (شکل 4-b).

بُعد شماره ۲: اندازه مش‌ها =  $0,028$  متر (شکل 4-c).

بُعد شماره ۳: اندازه مش‌ها =  $0,084$  متر (شکل 4-d).



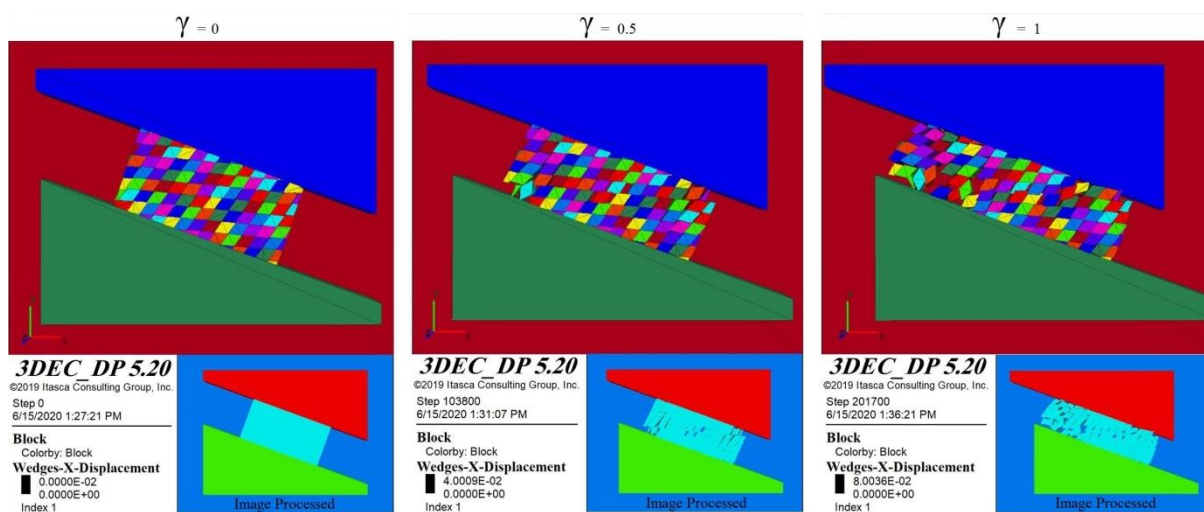
بُعدهای ۲، ۳ و ۴ پدید آمد و مسیر مشابه بُعد شماره ۱ نیز برای سایر ابعاد تکرار شد (اشکال ۵ تا ۸). همان طور که در نمودار شکل ۹ مشخص است، با افزایش کرنش برشی ( $\gamma$ )، مساحت فضای باز (S) نیز بیشتر می گردد. هر چه ابعاد بلوک-های ریدل کوچک تر باشند (همانند آنچه در مدل سازی آنالوگ مشاهده می شود)، مساحت بیشتری از فضاهای باز در بین بلوک ها را شاهدیم و هر چه این ابعاد بزرگ تر، مقدار فضای باز کمتری تشکیل می گردد. به طور کلی، با اندکی اختلاف، انطباق مشهودی بین نمودارهای حاصل از مدل سازی عددی و آنالوگ را از جنبه صعودی-نزولی نمودارهای متناظر می توان دید و این نشان از آن دارد که مدل های آنالوگ معتبر است. بنابراین در این بخش سعی می شود از توضیح سایر موارد مشابه با مدل سازی آنالوگ به منظور پرهیز از تکرار مکررات، اجتناب و به همین مقدار از توضیحات بسنده شود.

بُعد شماره ۴: اندازه مش ها = ۰,۱۱۲ متر (شکل 4-e).

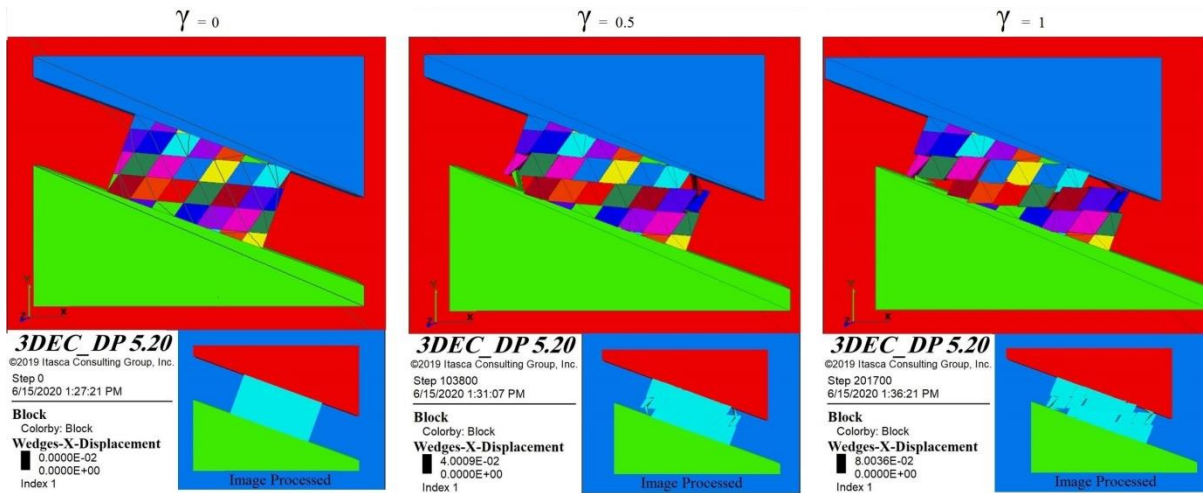
سایر شرایط مدل سازی عددی بر مبنای خصوصیات مکانیکی چوب به کار گرفته شده در مدل سازی آنالوگ به شرح زیر است:

$$0. = 25, \text{coh} = 0.25e^9, \text{fric} = 2.5e^9, k_s = k_n$$

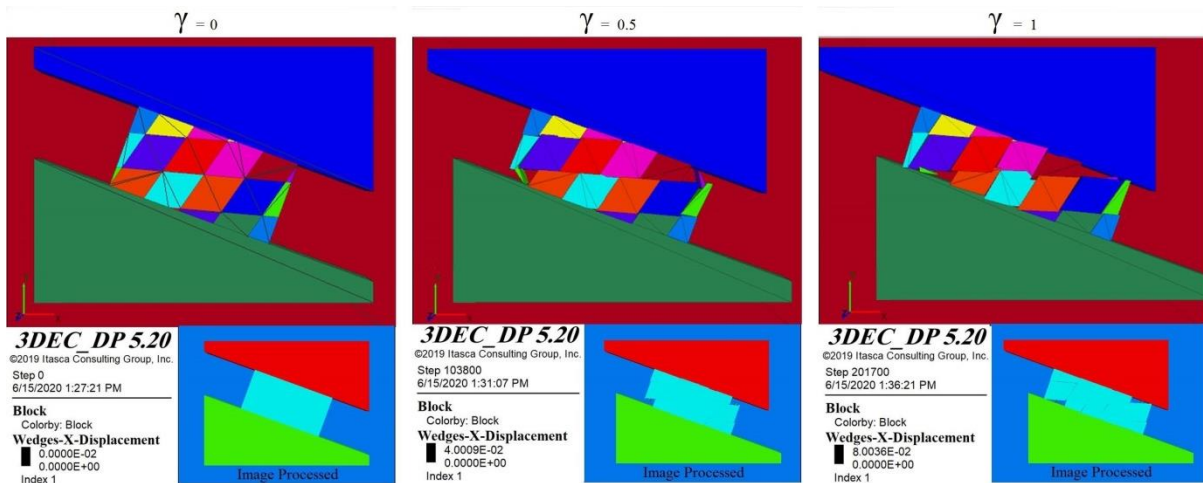
سپس مدل برای حالت بُعد شماره ۱ بلوک های ریدل (که در بخش قبل به آن اشاره گردید) اجرا و فضاهای باز حاصل در کرنش های برشی مختلف تا رسیدن به  $\gamma=1$  از طریق فرآیند پردازش تصویر (که جهت پرهیز از اطاله کلام از شرح آن صرف نظر می گردد) اندازه گیری شد (در زیل اشکال ۵ تا ۸ تحت عنوان Image Processed نشان داده شده است). برای سایر ابعاد بلوکی ریدل، با تغییر مقدار فاصله بندی شکستگی های ریدل از هم، بلوک های متنوعی منطبق بر



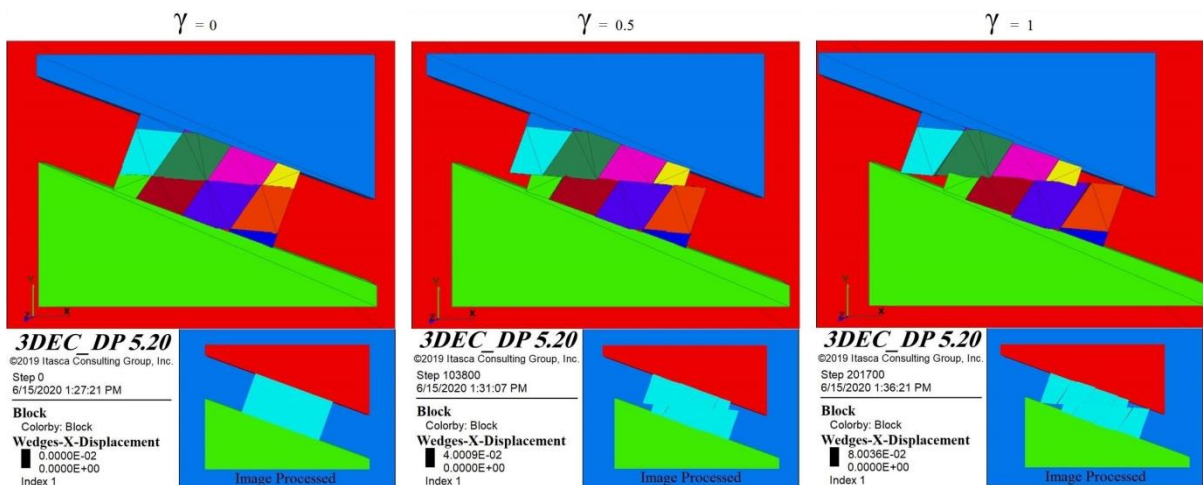
شکل ۵. تصاویر مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل سازی های عددی در حالت بُعد (Dimension) شماره ۱ بلوک های ریدل با سازوکار تراشکاری چاپ گرد.



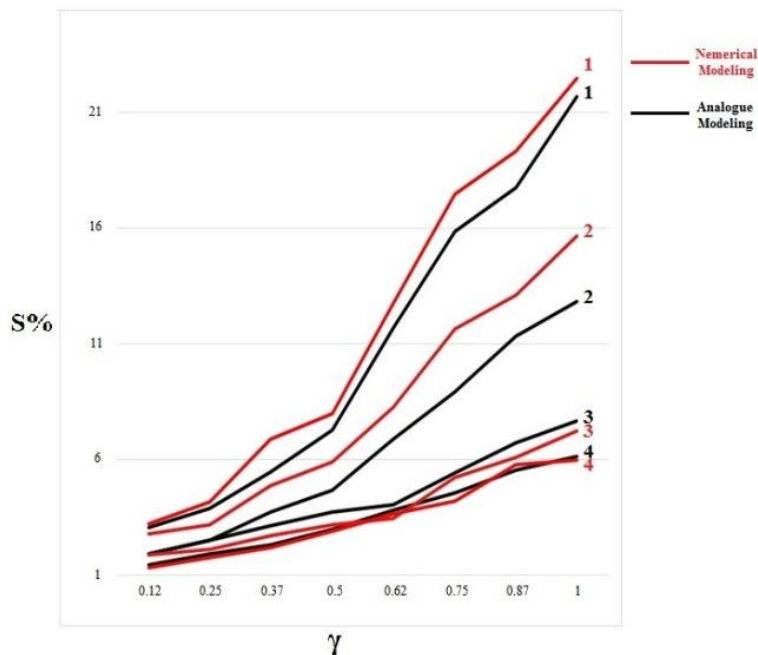
شکل ۶. تصاویر مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل‌سازی‌های عددی و آنالوگ در در حالت بُعد (Dimension) شماره ۲ بلوک‌های ریدل با سازوکار تراشکاری چپ‌گرد.



شکل ۷. تصاویر مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل‌سازی‌های عددی و آنالوگ در در حالت بُعد (Dimension) شماره ۳ بلوک‌های ریدل با سازوکار تراشکاری چپ‌گرد.



شکل ۸. تصاویر مراحل اولیه، میانی و پایانی کرنش برشی در مدل سازی های عددی و آنالوگ در حالت بُعد (Dimension) شماره ۴ بلوک های ریدل با سازوکار ترافشارشی چپ گرد.



شکل ۹. نمودار تغییرات کرنش برشی ( $\gamma$ ) نسبت به درصد کل فضاهای باز ( $S\%$ ) در مدل سازی های چهارگانه عددی (بُدهای شماره ۱ تا ۴ به رنگ قرمز) و آنالوگ (بُدهای شماره ۱ تا ۴ به رنگ سیاه).

جدول ۱. درصد مقدار فضاهای باز به دست آمده از مدل سازی آنالوگ و عددی در مقادیر مختلف کرنش برشی تا  $\gamma = 1$ .

Type of Modeling	$\gamma$	Total open spaces%			
		Dimension 1	2 Dimension	3 Dimension	Dimension 4
Analogue Modeling	0.12	3.23%	2.78%	1.89%	1.32%
	0.25	6.17%	3.17%	2.11%	1.74%
	0.37	6.86%	4.86%	2.71%	2.18%
	0.5	7.97%	5.88%	3.17%	2.88%
	0.62	12.274%	8.26%	3.44%	3.65%
	0.75	17.46%	11.64%	5.24%	4.19%
	0.87	19.33%	13.09%	6.10%	5.78%
	1	22.50%	15.65%	7.25%	5.96%
Numerical Modeling	0.12	3.04%	1.93%	1.93%	1.45%
	0.25	3.87%	2.49%	2.52%	1.92%
	0.37	5.45%	3.74%	3.14%	2.31%
	0.5	7.28%	4.68%	3.71%	2.99%
	0.62	11.67%	6.87%	4.03%	3.82%
	0.75	15.88%	8.92%	5.40%	4.54%
	0.87	17.76%	11.32%	6.71%	5.35%
	1	21.69%	12.86%	7.67%	6.12%

## بحث

شکستگی‌های فرعی پهنه برشی نیز می‌توانند در تشکیل رگه‌های معدنی نقش داشته باشند. همان‌طور که از عنوان این پژوهش پیداست، پیش فرض ما بررسی بروز فضاهای باز در راستای پهنه‌های برشی شکناست؛ که با الگوهایی نظیر انشعابات ریدل پهنه‌های برشی نیز سازگار است (Agosta, 2010; De Jossineau, 2007; Aydin, 2010). فرآیندهای پویا نیز بر توسعه مجموعه‌های گسل و جابجایی آنها در امتداد انشعابات مزدوج ریدل تأثیر گذارند (Schwarz, 2008) که در ادامه این فرایندهای پویا، توسعه کانی‌سازی در خلال گسل‌های میزبان به وقوع می‌پیوندد (Sibson, 1989). در طبیعت نیز طرح هندسی بلوک‌های ریدل از شکستگی‌های R و R' پیروی می‌کنند و در ابعاد مختلف بلوک گسلی یافت می‌شوند. از آنجا که گسل‌های لغزشی در مقیاس‌های مختلف تشکیل می‌شوند (Storti et al., 2003)، بلوک‌های گسلی نیز در پی آن ابعاد مختلفی خواهند داشت که در مقیاس‌های مختلفی نظیر میکروسکوپی، ماکروسکوپی، مزوسکوپی و مگاسکوپی قابل مشاهده‌اند (اشکال 10-a,b,c,d). به دلیل آن‌که که موارد بسیار مبهمی در سیستم‌های رگه‌ای وجود دارد، انتظار می‌رود که وقتی با این سبک کانی‌سازی روبرو می‌شویم، ارزیابی نسبی از حجم ذخیره معدنی آن داشته باشیم. در این راستا، تلاش شد تا از طریق این مطالعه، تأثیرات ابعاد بلوکی در مقدار فضای باز مورد بررسی قرار گیرد. اگرچه می‌دانیم که ساختارهای تکنیکی ایجادکننده فضای خالی، بالاترین اهمیت را به عنوان کنترل‌کننده‌های کانی‌سازی در پی‌جویی و اکتشاف کانسارهای رگه‌ای داراست (خطیب، ۱۳۷۸؛ کاویانی‌صدر، ۱۳۹۴)؛ اما در هر یک از مناطق دارای کانی‌سازی، کنترل‌کننده‌های فاقد کانی‌سازی نیز وجود دارند که این امر نشان می‌دهد جهت ایجاد کانی‌سازی مناسب، می‌بایست چند کنترل‌کننده با یکدیگر رخ دهند (مانند عوامل چینه‌شناسی، سنگ‌شناسی، ساختاری و...) و حضور تنها یکی از کنترل‌کننده‌ها، شرط کافی برای رخداد کانی‌سازی در آن محل نمی‌باشد. به عنوان مثال، کانسارهای کنترل‌شده توسط گسل‌ها به صورت کاملاً معناداری در شکل و اندازه، تنوعی از کنترل‌کننده‌های

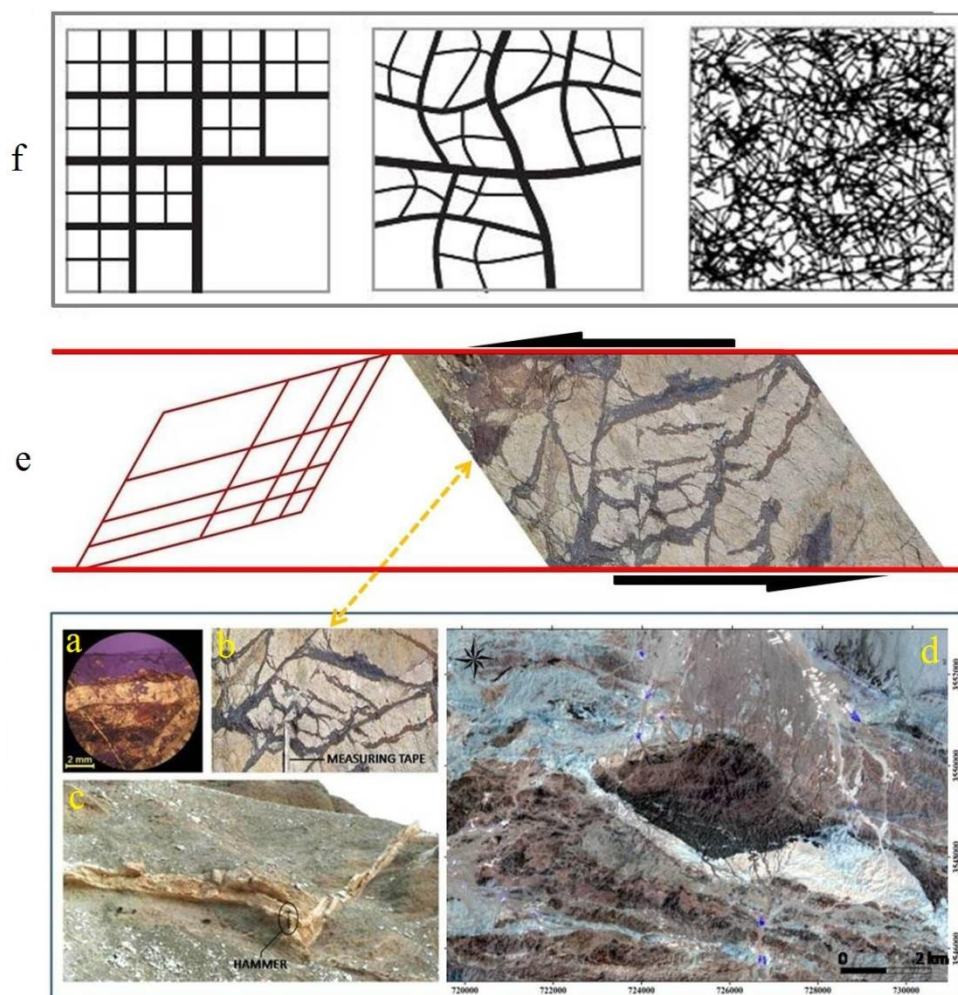
به طور کلی می‌توان گفت که ذخایر معدنی در پهنه‌های برشی به صورت رگه‌ای دارای اشکال هندسی منظم بوده و از ساختار هندسی فضاهای باز حاصل از فعالیت پهنه‌های برش پیروی می‌کنند (Karimpour, 2005). همان‌طور که پیش از این گفته شد، ساده‌ترین تفسیر برای نحوه تشکیل رگه‌های معدنی در یک معدن، مرتبط دانستن آنها با راستای شکستگی‌های کششی است. این در حالیست که در بسیاری از معادن، با استناد به جهت محور تنش بیشینه چه در مقیاس ناحیه‌ای و چه محلی که توسط سایر محققین معرفی گردیده، ملاحظه می‌شود بسیاری از این رگه‌ها به موازات محور تنش بیشینه و منطبق بر توجیه معمول شکستگی‌های کششی نیستند و انحراف فاحشی را به نمایش می‌گذارند که این حالت یا بیانگر چرخش است که در رگه‌ها رخ داده، یا اینکه این دسته از رگه‌ها منطبق بر دسته‌های دیگر شکستگی‌ها، غیر از شکستگی‌های کششی هستند. در این معادن، تشکیل شکستگی‌های کششی نیز بسته به ارتباط بین لیتولوژی-رئولوژی درون پهنه‌های برشی امکان‌پذیر است، اما در مدل‌های آنالوگ که از مواد خمیری نظیر گِل استفاده شده، محتمل‌تر است. این در حالیست که در مدل‌های آنالوگ که مواد به کار رفته شده در آن‌ها شرایط شکننده را بازسازی می‌کنند (نظیر ماسه فشرده شده و نظایر آن)، اغلب توسعه شکستگی‌های برشی ریدل را شاهدیم. شاید به این دلیل که در حالت خمیری، امکان برش کمتر است، به همین دلیل، بازشدگی ناشی از کشش با نیروی کمتری صورت می‌پذیرد. اما در حالت شکننده، فرآیندهای برشی از طریق گسیختگی-های واضح و ممتد گسترش می‌یابد. از این رو افزایش تنش، صرف افزایش برش در شکستگی‌های مزبور می‌گردد تا تشکیل شکستگی‌های کششی.

از طرفی شکستگی‌های کششی اغلب در سنگ‌هایی با شرایط شکل‌پذیر-شکنا به وجود می‌آیند. از این رو بسیاری از الگوهای دیگر نظیر نهشت محلول‌های کانه‌دار در خلال فضای باز الگوهای ساختاری مانند برش‌های ریدل و سایر



دگرشکلی پیش‌رونده پهنه برش متمرکز است، نه سایر عوامل نظیر فشار، دما، تفکیک فضاهای کانی‌سازی شده از فضاهای فاقد کانی‌سازی و دیگر فرآیندهای موثر بر آن. بنابراین آن-چه مسلّم است، انتشار رگه‌ها در سیستم‌های رگه‌ای چه از نوع منظم (Systematic) باشند و چه غیرمنظم (شکل 10-f)، در برآورد کلی آن باز هم از الگویی منظم تبعیت می‌کنند که پی‌بردن به این الگو و نظم موجود در آن، بر عهده محققان این زمینه است که بسط آن در این مقاله نمی‌گنجد.

ساختاری و سنگ‌شناختی را منعکس می‌کنند (Leach et al., 2005). علیرغم این که ما در این تحقیق اعماق کم پوسته زمین و متعاقب آن محدوده دگرشکلی شکنا را که به کاهش دما و فشار محلول گرمایی به نهشت مواد معدنی می‌انجامد، مورد بررسی قرار دادیم؛ و از طرفی نیز می‌دانیم که محیط‌های با تخلخل بالا (نظیر مناطق با فراوانی بالای شکستگی)، خود عاملی بر کاهش فشار و در نتیجه ته‌نشست ماده معدنی است (Leach et al., 2005)؛ اما این پژوهش صرفاً بر روی تاثیر کنترل‌کننده‌های ساختاری بر مقدار فضای باز در خلال



شکل ۱۰- بلوک‌های گسلی در ابعاد مختلف در مسیر پهنه‌های برشی و پرشدگی‌های ثانویه محاط بر بلوک‌ها با پیروی از هندسه بلوک‌های گسلی ریدل از مقیاس میکروسکوپی تا مگاسکوپی a: مقیاس میکروسکوپی، b: مقیاس ماکروسکوپی، c: مقیاس موزوسکوپی، d: مقیاس مگاسکوپی، e: وضعیت رگه‌های کانه‌دار تصویر b در کنترل شکستگی‌های ریدل یک پهنه برشی چپگرد که به صورت فرکتالی توسعه یافته‌اند، همراه با طرح شماتیک از حالت فرکتالی بلوک‌های گسلی در خلال پهنه‌های برشی شکنا، f: طرح شماتیک از انواع توسعه فرکتالی نهشته‌های معدنی در سه حالت منظم، نیمه‌منظم و نامنظم (Gumiel, 2010).





مدل‌های نرم‌افزاری فراهم نیست. در مدل‌سازی عددی برای رسیدن به نتایج ملموس‌تر، نقش برخی از پارامترهای کم‌اثر در مقیاسی که مدل‌ها در آن مورد آزمایش قرار گرفتند مثل چگالی، چسبندگی داخلی و... به سبب پیش‌فرض بلوک‌های صلب نادیده گرفته شد. اساساً در اغلب مدل‌سازی‌های عددی نادیده گرفتن برخی پارامترها برای رسیدن به نتایج ملموس‌تر امری مرسوم است. از همین‌رو، تفاوت اندکی که در مقدار فضای باز در مدل آنالوگ و عددی در هر یک از مدل‌ها دیده می‌شود نتیجه تأثیر تفاوت در شیوه ساخت مدل‌ها است. بنابراین فضای باز بیشتری را در مدل‌سازی عددی نسبت به مدل‌سازی آنالوگ شاهدیم. با افزایش کرنش برشی، چرخش یا جابجایی بلوک‌های گسلی، فضاهای باز در بین بلوک‌ها ظاهر می‌شوند، در حالت بُعد شماره ۱، به سبب تعداد بیشتر بلوک‌ها در مدل، چرخش بلوکی و متعاقب آن فضا سازی بیشتری را شاهدیم. با افزایش کرنش برشی در بُعدهای شماره ۳ و ۴، تنش بیشتر صرف برش بین شکستگی-های ریدل و لغزش‌های بین بلوکی می‌شود تا چرخش بلوکی و ایجاد فضای باز؛ به همین جهت فضای باز کمتری بین بلوک‌ها تشکیل می‌شود.

### نتیجه‌گیری

اگرچه در این تحقیق نقش سایر عوامل موثر بر نهشت مواد معدنی بررسی نشد، اما تأثیر ابعاد بلوک‌های ریدل بر مقدار فضای باز در پهنه‌های برشی شکنا به عنوان یکی از مهم‌ترین عوامل کنترل‌کننده کانی‌سازی مورد بررسی قرار گرفت. مقدار فضای بازی که در راستای شکستگی‌های ریدل پهنه‌های برشی شکنا ایجاد می‌شوند، با مقدار فاصله‌بندی بین این شکستگی‌ها و به دنبال آن ابعاد بلوک‌های گسلی ریدل ارتباط دارد، به گونه‌ای که هر اندازه مقدار فاصله‌بندی بین برش‌های ریدل کمتر و ابعاد بلوک‌های حاصله کوچک‌تر باشند، فضای باز بیشتری در گستره واحدی از انواع پهنه‌های برشی که در مقدار فاصله‌بندی شکستگی‌های ریدل با یکدیگر متفاوتند، تشکیل می‌شود و بالعکس. علاوه بر این، مدل‌های آنالوگ این پژوهش و

می‌دانیم هر شکستگی درون پهنه‌های برشی که زاویه کمی نسبت به لبه‌های این پهنه‌ها دارد، در خلال یک دگرشکلی پیش‌رونده، متحمل لغزش ناهمسو با پهنه برشی می‌گردد (قاسمی، ۱۳۸۷). بنابراین گسل‌های R نیز به واسطه زاویه کمی که نسبت به لبه پهنه برش دارند، لغزش همسو با پهنه برش را متحمل می‌شوند و لذا، تنش‌های وارده بیشتر سبب لغزش می‌گردد تا چرخش و تشکیل فضای باز، اما در گسل‌های R' به سبب زاویه بیشتر نسبت به لبه پهنه برشی، برش ناهمسو با پهنه برش اتفاق می‌افتد و همین امر باعث می‌شود تا در نتیجه تلاقی این دو برش همسو و ناهمسو در خلال یک دگرشکلی پیش‌رونده، چرخش بلوکی حاصل شود (شکل ۳). از آنجایی که مقدار این چرخش در همه‌ی بلوک‌ها یکسان نیست (چرخش همه بلوک‌ها به یک میزان و یکنواخت نیست)، باعث تشکیل فضای باز در بین بلوک‌ها می‌شود (اشکال ۳، ۵ و ۶). همان‌طور که پیش از این نیز گفته شد، تمام الگوهای انتشار رگه‌ای از نظم و قانده‌ای خاص تبعیت می‌کنند. الگوی انتشار رگه‌ای ریدل نیز در ابعاد مختلف امکان‌پذیر بوده به گونه‌ای که بلوک‌های گسلی ریدل متناسب با فاصله‌بندی بین برش‌های ریدل، مقیاس‌های مختلفی را با نظم فرکتالی مشخص به خود می‌گیرند (شکل 10-e) که شناخت این الگوی فرکتالی، در برآورد حجم ذخایر معدنی مربوط نقش بسزایی را ایفا می‌کند.

به عقیده Ramsay & Graham, 1970 دگرشکلی در پهنه‌های برشی می‌تواند از نوع برش ساده و یا از نوع تغییرات حجم و یا ترکیبی از این دو باشند؛ بنابراین حجم کلی ذخایر معدنی، تابعی از حجم فضاهای باز ایجاد شده در پهنه‌های برشی موجود در منطقه است (Ramsay, 1980). از آنجایی که محاسبه کرنش حجمی در معادن حائز اهمیت بسیاری است، این پژوهش به عنوان قدمی کوچک از این منظر، می‌تواند به ارزیابی توان معدنی آن مجموعه کمک شایانی نماید.

در مدل‌سازی آنالوگ، می‌توان تأثیر پارامترهای بسیاری را در مطالعه مورد توجه قرار داد حال آنکه این امکان در که



این که در تمام موارد این تحقیق، نتایج مدل سازی عددی به جهت مقدار فضای باز ایجاد شده بین بلوک های ریدل در شرایط مشابه با مدل سازی آنالوگ کمی بیش تر است، اما همخوانی مطلوبی را با مدل سازی آنالوگ به نمایش می-گذارد.

اعتبارسنجی آن با مدل سازی عددی نشان داد که در ابعاد کوچکتر بلوکی، چرخش و جابجایی های بلوکی که منجر به بروز فضاهای باز می شوند بیشتر است. این در حالیست که با افزایش کرنش برشی در خلال دگرشکلی پیش رونده پهنه برشی، نیروهای حاصل بیشتر صرف لغزش بین شکستگی های ریدل می شود تا چرخش بلوکی و ایجاد فضای باز. علیرغم

### سپاسگزاری

بدین وسیله از گروه زمین شناسی دانشگاه فردوسی مشهد و همکاری های ارزنده گروه زمین شناسی دانشگاه بیرجند تشکر و قدردانی می شود. این تحقیق بخشی از پژوهش رساله دکتری نویسنده اول مقاله در دانشگاه فردوسی مشهد می-باشد.

### منابع

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

قاسمی، م. ر.، ۱۳۸۷. پایه های زمین شناسی ساختمانی، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

کاویانی صدر، خ.، خطیب، م.م.، زرین کوب، م.ح.، ۱۳۹۴. اثر کنترل کننده های ساختاری در نهشت مواد معدنی منطقه چشمه خوری (شمال غرب بیرجند)، فصلنامه علمی-پژوهشی علوم زمین، شماره ۹۵.

- De Jossineau, G., Mutlu, O., Aydin, A. and Pollard, D.D., 2007. Characterization of strike-slip fault–splay relationships in sandstone. *Journal of Structural Geology*, 29(11), pp.1831-1842.
- Dooley, T.P. and Schreurs, G., 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: A review and new experimental results. *Tectonophysics*, 574, pp.1-71.
- Dholakia, S.K., Aydin, A., Pollard, D.D. and Zoback, M.D., 1998. Fault-controlled hydrocarbon pathways in the Monterey Formation, California. *AAPG bulletin*, 82(8), pp.1551-1574.
- Forster, H., 1978. Mesozoic - Cenozoic metallogenesis in Iran - *Geological Society-London*, 135, 443-445.
- Gamond, J. F., 1983. Displacement features associated with fault zones: a comparison between observed examples and experimental models. *J. Struct. Geol.* 5, 33–45.
- Ghosh, N. and Chattopadhyay, A., 2008. The initiation and linkage of surface fractures above a buried strike-slip fault: An experimental approach. *Journal of earth system science*, 117(1), pp.23-32.
- Hancock, P. I., 1985. Brittle microtectonics: principles and practice. *Journal of Structural Geology*, Vol 7 437-457.
- Karimpour, M, H., 2005. Comparison of Qaleh Zari Cu-Au-Ag deposit with other Iron Oxides Cu-Au (IOGC-type) deposits, a new classification. Katz, Y., Weinberger, R., Aydin, A., 2004., Geometry and kinematic evolution of Riedel shear structures, Capitol Reef National Park, Utah. *Journal of Structural Geology*, Vol 26, p: 491–501.
- Kim, Y.S. and Sanderson, D.J., 2004. Similarities between strike-slip faults at different scales and a simple age determining method for active faults. *The Island Arc magazine*, vol 13, p: 128–143.
- Leach, D. L., Sangster, D. F., Kelley, K. D., Large, R. R., Garven, G., Allen, C. R., Gutzmer, J. and Walters, S.S., 2005. Sediment Hosted lead-zinc deposits: A Global Perspective : *Economic Geology*, 100th Anniversary volume, p:501-607.
- Agosta, F. and Aydin, A., 2006. Architecture and deformation mechanism of a basin-bounding normal fault in Mesozoic platform carbonates, central Italy. *Journal of Structural Geology*, 28(8), pp.1445-1467.
- Ahlgren, S. G., 2001. The nucleation and evolution of Riedel shear zone as deformation bands in porous sandstone. *Journal structural Geology* 23, p: 1203-1214.
- Aydin, A. and Berryman, J.G., 2010. Analysis of the growth of strike-slip faults using effective medium theory. *Journal of Structural Geology*, 32(11), pp.1629-1642.
- 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, M. and Solar, G.S., 1998. Shear-zone systems and melts: feedback relations and self-organization in orogenic belts. *Journal of structural geology*, 20(2-3), pp.211-227.
- Chauvet, A., 2019. Structural control of ore deposits: The role of pre-existing structures on the formation of mineralised vein systems. *Minerals*, 9(1), p.56.
- Chemenda, A. I., Cavalie, O., Vergnolle, M., Bouissou, S. and Delouis, B., 2015. Numerical model of formation of a 3-D strike-slip fault system. *Tectonophysics*, 34- 31-49.
- Cladouhos, T. T., 1999. A kinematic model for deformation within brittle shear zones. *Journal of Structural Geology* 21, 437±448.
- Cloos, E., 1955. Experimental analysis of fractural patterns. *Geol. Soc. Am. Bull.* 66, 241–256.
- Coelho, S., Passchier, C. and Marques, F., 2006. Riedel-shear control on the development of pennant veins: Field example and analogue modeling. *Journal of Structural Geology*, Vol 28 1658-1669.
- Davis, G.H., and Reynolds, S.J. 1996. *Structural geology of rocks and regions*. New York: John Wiley and Sons, p.800.



Xu, S. and Ben-Zion, Y., 2013. Numerical and theoretical analyses of in-plane dynamic rupture on a frictional interface and off-fault yielding patterns at different scales. *Geophysical Journal International*, 193(1), pp.304-320.

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.

Ramsay, J. G., 1980. Shear zone geometries: a review., *J. Stru. Geol*, V.2, pp. 83-100.

Ramsay, J.G. and Graham, R.H., 1970. Strain variation in shear belts. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 7(3), pp.786-813.

Riedel, W., 1929. "Zur Mechanik Geologischer Erscheinungen." *Z. Mineral. Geol. Palaeontol.* Vol. 1929B, pp. 354-368.

Sabins, F.F., 1999. Remote sensing for mineral exploration, *Ore Geology Reviews*, 14: 157-183.

Schwarz, H. U. and Kilfitt, F.W., 2008. Confluence and intersection of interacting conjugate faults: A new concept based on analogue experiments. *Journal of Structural Geology* 30 1126–1137.

Sibson, R.H., 1989. Earthquake faulting as a structural process. *Journal of structural geology*, 11(1-2), pp.1-14.

Storti, F., Holdsworth, R.E. and Salvini, F., 2003. Intraplate Strike-Slip Deformation Belts. *Geological Society, London, Special Publications*, 210(1), 1-14.

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

Tchalenko, J.S., 1968. The evolution of kind-bands and the development of compression textures in sheared clays. *Tectonophysics* 6, 159–174.

Tchalenko, J.S, 1970. Similarities between shear zones of different magnitudes, *Geological Society of America Bulletin*, V.81, pp. 1625-1640.

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