

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/321979629>

# The evolution of triclinic, discontinuous heterogeneous flow of transpression zones using FEM

Conference Paper · December 2017

CITATIONS

0

READS

350

4 authors:



**Seyed Tohid Nabavi**

Shahid Beheshti University

34 PUBLICATIONS 309 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Ahmad Alavi**

Shahid Beheshti University

76 PUBLICATIONS 827 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Soheil Mohammadi**

University of Tehran

141 PUBLICATIONS 4,998 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



**Mohammad Reza Ghassemi**

Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran

152 PUBLICATIONS 2,714 CITATIONS

[SEE PROFILE](#)



# پنجمین همایش زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری ایران

۲۹ آذر ماه ۱۳۹۶  
پژوهشکده علوم زمین  
سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور

## تکامل پهنه‌های ترافشارش جریان ناهمگن و ناپیوسته تری کلینیک به روش اجزاء محدود

♦♦♦♦♦♦♦♦

سید توحید نبوی، دانشجوی دکتری زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری، دانشکده علوم زمین، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشگاه شهید بهشتی،

تهران، ایران، tohidnabavi@gmail.com

سید احمد علوی، استاد زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری، دانشکده علوم زمین، گروه حوضه‌های رسوبی و نفت، دانشگاه شهید بهشتی، تهران،

ایران، a\_alavi@sbu.ac.ir

سهیل محمدی، استاد مهندسی عمران سازه، دانشکده مهندسی عمران، آزمایشگاه محاسبات سریع، دانشگاه تهران، تهران، ایران، smoham@ut.ac.ir

محمدرضا قاسمی، دانشیار زمین ساخت و زمین شناسی ساختاری، پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران،

ghassemi.m.r@gmail.com

♦♦♦♦♦♦♦♦

### چکیده:

تکامل مکانیکی پهنه‌های ترافشارش متأثر از تعامل‌های گسلی به کمک مدل مکانیکی سه‌بعدی الاستوپلاستیک و روش اجزاء محدود بررسی شده است. ترافشارش شکل‌پذیر بین دیواره‌های غیرصلب، بیرون‌زدگی قائم و جانبی را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد پهنه ترافشارش در راستای مسیرهای کرنشی ناهم‌محور و تحت یک میدان کرنش سه‌بعدی تکامل می‌یابد. کرنش پلاستیک توزیع شده، انتقال لغزش، و حداکثر کرنش پلاستیک در پهنه ترافشارش روی می‌دهد. در بیرون از پهنه، چون دگرریختی با برش پلاستیک توزیع شده همساز شده است، لغزش گسل کاهش می‌یابد. با پیشرفت دگرریختی، محور حداقل تنش اصلی در پهنه ترافشارش می‌چرخد و زاویه مایلی را با جهت انتقال ناحیه‌ای (۹-۱۰ درجه) تشکیل می‌دهد. بزرگی جابه‌جایی در پهنه ترافشارش سریع‌تر از نواحی بیرونی افزایش می‌یابد. چرخش بردارهای جابه‌جایی طی تکامل زمانی همگرایی مورب پیشنهاد می‌کند که پهنه ترافشارش از یک دگرریختی کرنش غیرصفحه‌ای تکامل می‌یابد. لغزش در راستای پاره‌های گسلی و با افزایش عمق کاهش می‌یابد. این می‌تواند به همسازی کوتاه‌شدگی کلی در پاره‌های گسلی همجوار مرتبط باشد. نتایج مدل یک بالآمدگی گنبدی مقارنی را به دلیل دگرریختی نشان می‌دهد که یک چین دو میلی و یک ساختار گل‌مانند مثبت را ایجاد می‌کند. بیرون از پهنه همپوشان حوضه‌های فرونشینی نامتقارن و ساختار گل‌مانند منفی در هر دو جناح پهنه ترافشارش توسعه می‌یابد که حوضه‌های ترافشارشی نامیده می‌شوند. انحراف پاره‌های گسلی سبب می‌شود شیب گسل‌ها در نزدیکی سطح (تا عمق ۱/۵ کیلومتر) کمتر از ۹۰ درجه (۸۹-۸۶ درجه) شود. این حالت، به توسعه یک مدل پهنه ترافشارش با جریان ناهمگن، ناپیوسته، تری کلینیک، با برش محض غالب منجر می‌شود.

**کلید واژه‌ها:** ترافشارش، تری کلینیک، بیرون‌زدگی، جریان ناهمگن، حوضه ترافشارشی، روش اجزاء محدود



## The evolution of triclinic, discontinuous heterogeneous flow of transpression zones using FEM

Seyed Tohid Nabavi, Seyed Ahmad Alavi, Soheil Mohammadi, Mohammad Reza Ghassemi

### Abstract:

The mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions is investigated by a 3D elasto-plastic mechanical model solved with the finite-element method. Ductile transpression between non-rigid walls implies an upward and lateral extrusion. The model results demonstrate that a transpression zone evolves in a 3D strain field along non-coaxial strain paths. Distributed plastic strain, slip transfer, and maximum plastic strain occur within the transpression zone. Outside the transpression zone, fault slip is reduced because deformation is accommodated by distributed plastic shear. With progressive deformation, the minimum compressive stress rotates within the transpression zone to form an oblique angle to the regional transport direction ( $\sim 9^\circ$ - $10^\circ$ ). The magnitude of displacement increases faster within the transpression zone than outside it. Rotation of the displacement vectors of oblique convergence with time suggests that transpression zone evolves toward an overall non-plane strain deformation. The slip decreases along fault segments and with increasing depth. This can be attributed to the accommodation of bulk shortening over adjacent fault segments. The model result shows an almost symmetrical domal uplift due to off-fault deformation, generating a doubly plunging fold and a 'positive flower' structure. Outside the overlap zone, expanding asymmetric basins subside to 'negative flower' structures on both sides of the transpression zone and are called 'transpressional basins'. Deflection at fault segments causes the fault dip fall to less than  $90^\circ$  ( $\sim 86$ - $89^\circ$ ) near the surface ( $\sim 1.5$ km). This results in a pure-shear-dominated, triclinic, and discontinuous heterogeneous flow of the transpression zone.

**Keywords:** Transpression, Triclinic, Extrusion, Heterogeneous flow, Transpressional basin, Finite-element method



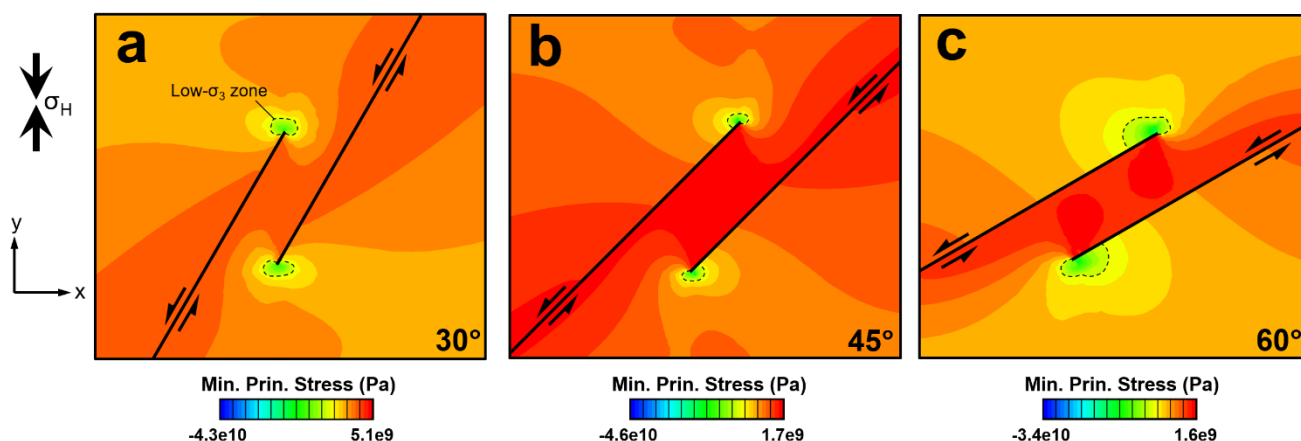
### مقدمه :

ترافشارش (Transpression) با عملکرد همزمان مؤلفه‌های: (۱) برش ساده به موازات مرزهای پهنه (مؤلفه امتدادلغز)، و (۲) جریان هم‌محور کوتاه‌شدگی قائم در عرض مرزهای پهنه و کشیدگی موازی با آن، مشخص شده است (Sanderson and Marchini, 1984; Jones et al., 2004; Fernández and Díaz-Azpiroz, 2009; Frehner, 2016; Nabavi et al., 2017b, 2017c). پهنه‌های ترافشارش در سیستم‌های گسلی امتدادلغز، کمربندهای کوهزایی، و مرزهای صفحات زمین‌ساختی توسعه می‌یابند. پهنه‌های ترافشارش حاصل از همگرایی مورب هستند جایی که بردارهای حرکتی همگرا نسبت به مرزهای بین صفحات پوسته‌ای در حال دگرریختی، مورب هستند. بخش‌بندی کرنش (strain partitioning) (بخش‌بندی فضایی و زمانی) حاصل از جابه‌جایی مورب، در این موقعیت‌های زمین‌ساختی رایج بوده و نتایج مهمی در تفسیر زمین‌ساختی یک منطقه تحت همگرایی مورب دارد (Jones et al., 2004; Nabavi et al., 2017b, 2017c). در پهنه‌های ترافشارش غالباً بیضوی کرنش از نوع پهن‌شده (oblate) بوده و کرنش در میدان پهن‌شدگی (flattening field) توزیع شده است (Nabavi et al., 2017b, 2017c).



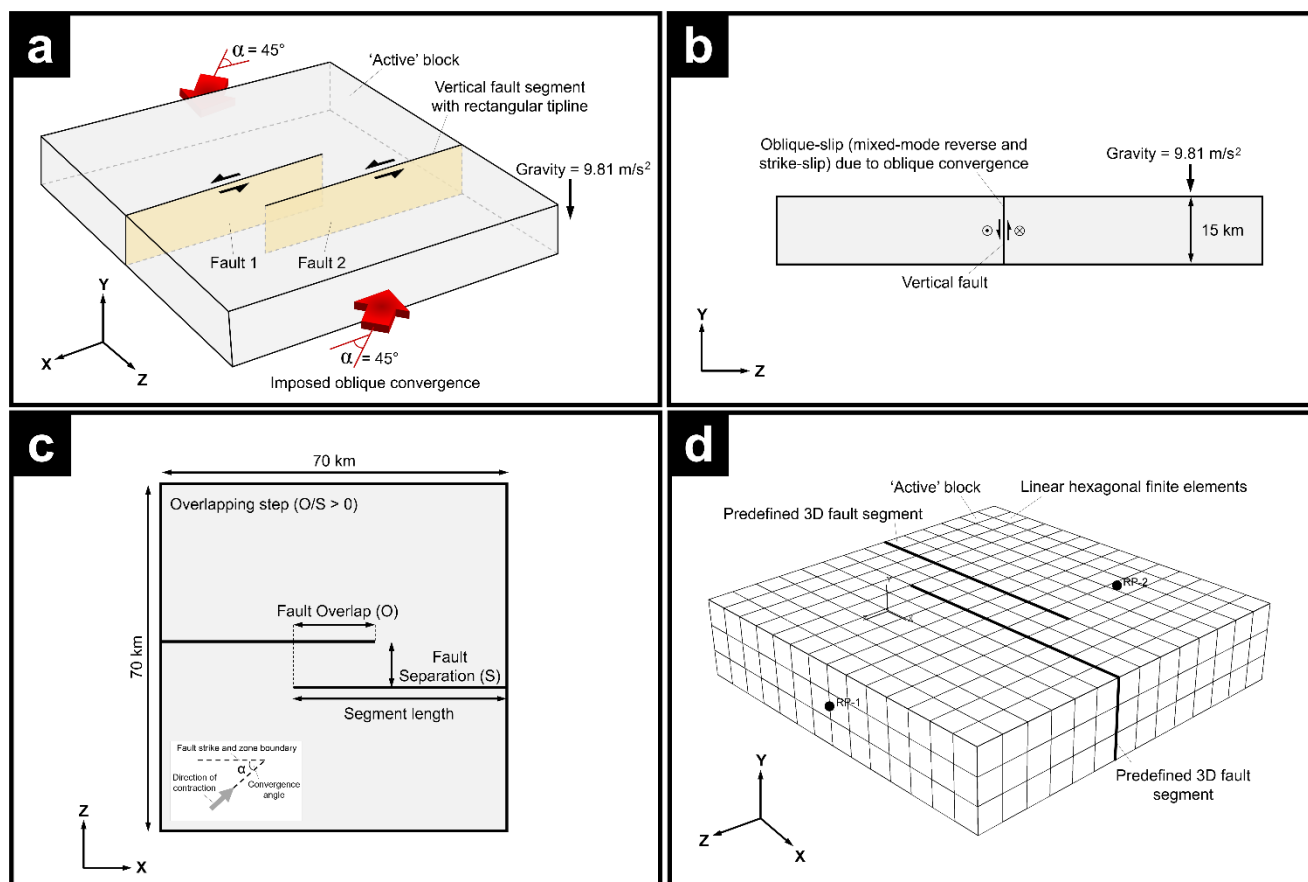
## روش تحقیق:

همواره مدل‌های تحلیلی، تجربی، و عددی به منظور درک بهتر تکامل پهنه‌های دگرریختی ترفشارشی و تراکشی استفاده شدند. در این میان سهم مطالعات عددی بر روی بررسی تکامل سه‌بعدی پهنه‌های ترفشارش شکننده-شکل‌پذیر حاصل حاصل از تعامل (interaction) پاره‌های گسلی ناچیز بوده است. تحلیل‌های عددی دو بعدی در مطالعه‌های پیشین ما (Nabavi et al., 2016, 2017a) نگرش‌های مهمی رو از تکامل توزیع تنش و الگوی کرنش در پهنه‌های ترفشارش بیان نمود. در آن مطالعات نشان داده شد که پهنه‌های ترفشارش کرنش‌های ناهمگن و ناهم‌محور ایجاد می‌کنند. به علاوه، عوامل مهمی همچون: (۱) زاویه همگرایی، (۲) هندسه پله‌های گسلی (fault step geometry)، و (۳) نسبت همپوشانی به جدایش پاره‌های گسلی (overlap-to-separation ratio) بر تکامل پهنه‌های ترفشارش اثرگذار هستند (شکل ۱). در این مطالعه، مدل پیشین ما (Nabavi et al., 2016, 2017a) (دو بعدی، الاستیک، خطی) (شکل ۱) به مدل اجزاء محدود سه بعدی، غیرخطی، و با استفاده از شرایط مرزی بر پایه جابه‌جایی توسعه یافت. در این مطالعه همچون مطالعه پیشین ما از برنامه Abaqus™ (Abaqus/CAE) استفاده شده است.



شکل ۱. توزیع حداقل تنش اصلی در پله‌های گسلی تراکمی همپوشان (پهنه‌های ترفشارش) در زوایای همگرایی الف) ۳۰ درجه، ب) ۴۵ درجه، ج) ۶۰ درجه (Nabavi et al., 2016, 2017a).

فنون عددی به ویژه استفاده از روش اجزاء محدود ابزاری قوی در شرح جامعی از حالت تنش، رئولوژی، مشخصه و تکامل توالی ساختارها، الگوی کرنش و دگرریختی، در ورای مشاهدات مستقیم است. به منظور انجام تحلیل اجزاء محدود، مدل مورد مطالعه از ۲۲۲۰۰۰ المان (مش) پیوسته، سه بعدی، شش وجهی (C3D8R) تشکیل شده است (شکل ۲). ابعاد مدل ۷۰×۷۰×۱۵ کیلومتر است. دو پاره گسلی قائم (vertical fault segments) از پیش موجود در مدل به صورت همپوشان وجود دارد که قابلیت جابه‌جایی در راستای موازی و قائم با صفحات گسلی دارد (گسلش مورب‌لغز). مقدار همپوشانی و جدایش دو پاره گسلی به ترتیب ۳۰ و ۱۰ کیلومتر هستند (شکل ۲).

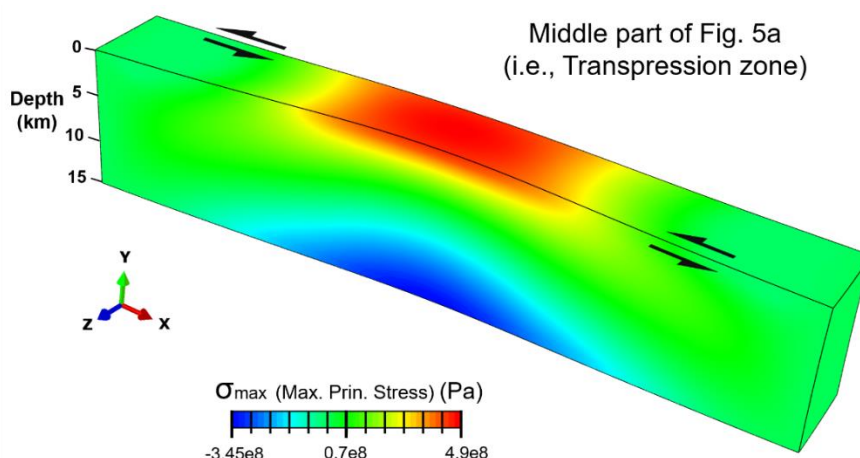


شکل ۲. چارچوب مدل سه بعدی اجزاء محدود. الف) مدل سه بعدی نشان دهنده شرایط مرزی و بارهای اعمالی. ب) مقطع قائمی از مدل که هندسه قائم گسل ها را نشان می دهد. ج) نمای نقشه از مدل که تعاریف جدایش، همپوشانی را نشان می دهد. د) مش بندی مدل (Nabavi et al., 2017c, 2018)

همگرایی مورب با اعمال شرایط مرزی بر پایه جابه جایی (۱۴ کیلومتر همگرایی مورب) و تحت زاویه همگرایی ۴۵ درجه اعمال شده است. از جمله عوامل غیرخطی بودن مسئله در این مطالعه لغزش اصطکاکی در راستای پاره های گسلی، رئولوژی الاستیک-پلاستیک (غیرالاستیک)، شرایط مرزی حاکم، و یا ترکیبی از اینها در طی مدلسازی دگرریختی است. برای رئولوژی الاستیک: مدول یانگ، نسبت پوآسون، و چگالی به ترتیب ۵۵ GPa، ۰/۲۵، و  $2600 \text{ kg/m}^3$  است. به علاوه برای رئولوژی پلاستیک مدل: مقاومت تسلیم و ضریب اصطکاک لغزشی به ترتیب ۸۹۰ GPa و ۰/۵۱ است. از دیگر مباحث جدید در این مطالعه عبارت است از: الف) حذف محدودیت مرزی مدل "ترافشارش محدود شده" (confined transpression)، و ب) استفاده از مرزهای غیرصلب. در مطالعه حاضر عمدتاً موضوعاتی همچون: ۱) توزیع و تغییرات میدان های جابه جایی، تنش، و کرنش با تغییر موقعیت ساختمانی، و ۲) نحوه توزیع کرنش های غیرالاستیک در پهنه های ترافشارش بحث شده است.

## نتیجه گیری :

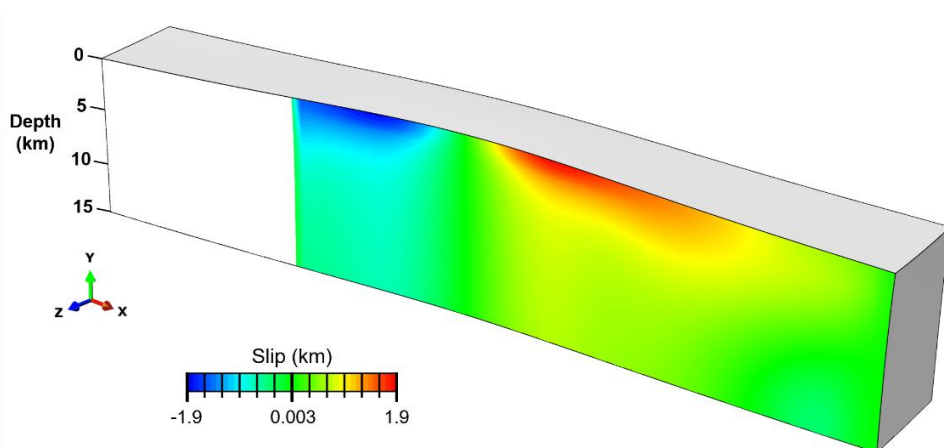
نتایج نشان می دهد که تنش اصلی متوسط و حداکثر در راستای پهنه ترافشارش (درون پله گسلی بین دو پاره گسلی) نسبت به نواحی بیرونی پله گسلی افزایش می یابد (یعنی فشارش افزایش می یابد). (شکل ۳). با پیشرفت دگرریختی، محور حداقل تنش اصلی در پهنه ترافشارش می چرخد و زاویه مایلی را نسبت به جهت انتقال ناحیه ای و مرزهای پهنه ترافشارش تشکیل می دهد (حدود ۹-۱۰ درجه). در بیرون از پهنه ترافشارش، محور حداقل تنش اصلی به حالت نیمه قائم با جهت انتقال ناحیه ای (تنها یک انحراف ۴ درجه نسبت به آن) و تقریباً به موازات حداکثر کرنش اصلی کشش جهت یافته است. لغزش در راستای سطوح لغزشی از منطقه همپوشانی پاره های گسلی (پهنه ترافشارش) به سمت نواحی بیرونی پله گسلی به منظور همسازی کوتاه شدگی کلی (bulk shortening) پاره های گسلی همجوار کاهش می یابد از اینرو ارتفاع یا بیرون زدگی قائم پهنه ترافشارش به سمت پهنه همپوشان افزایش می یابد.



شکل ۳. توزیع حداکثر تنش اصلی در راستای پهنه ترافشارش (منطقه همپوشانی پاره های گسلی)

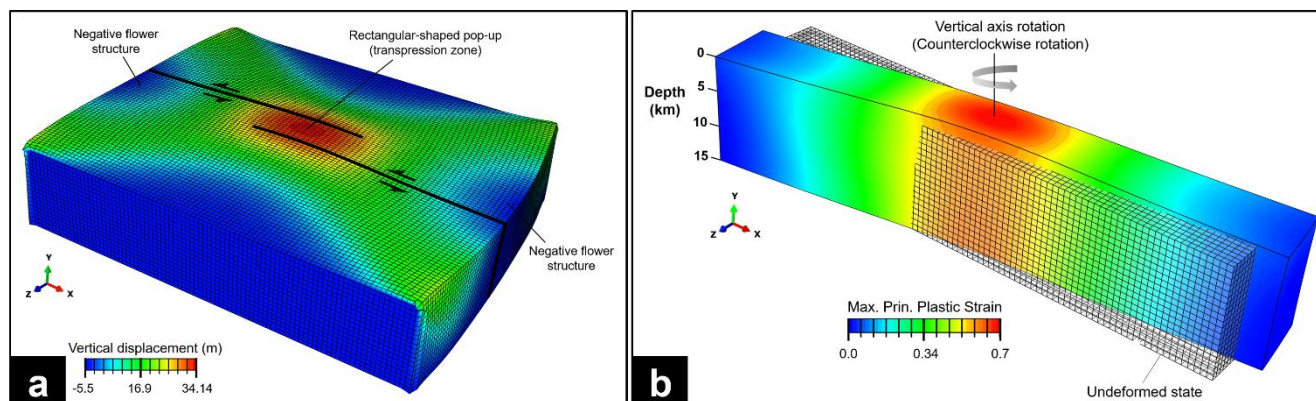
به علاوه لغزش با افزایش عمق کاهش می یابد به طوری که کاهش واضحی در لغزش را می توان در اعماق ۵-۱۰ کیلومتر و ۱۵-۵ کیلومتر نتیجه می شود (شکل ۴). توزیع لغزش در راستای گسل ها همانند کرنش پلاستیک بسیار نامتقارن است. حداکثر لغزش در نزدیکی مرکز سطوح گسلی روی می دهد. نتایج نشان می دهد که اولین نقاطی که به وارد دگرریختی پلاستیک می شوند بخش مرکزی پهنه ترافشارش (پله همپوشان) و دو رئوس پاره های گسلی هستند. این مناطق پلاستیک مکان های ترجیحی هسته گذاری و رشد اولین گسل های معکوس و مورب لغز (به صورت برش های مزدوج) هستند که در مطالعات تجربی سیستم های همگرای مورب و پله های گسلی امتداد لغز نیز مشاهده شده است. تداخل تغییر شکل و دگرریختی چرخشی سبب ایجاد میدان جابه جایی پیچیده سه بعدی در پهنه ترافشارش شده است. تکامل زمانی همگرایی مورب نشان می دهد که بزرگی جابه جایی در پهنه ترافشارش سریع تر از نواحی بیرونی آن افزایش می یابد. چرخش

بردارهای جابه‌جایی طی تکامل زمانی همگرایی مورب این نتیجه را به همراه دارد که پهنه ترفشارش تحت یک دگرریختی کرنش غیرصفحه‌ای (non-plane deformation) تکامل می‌یابد.



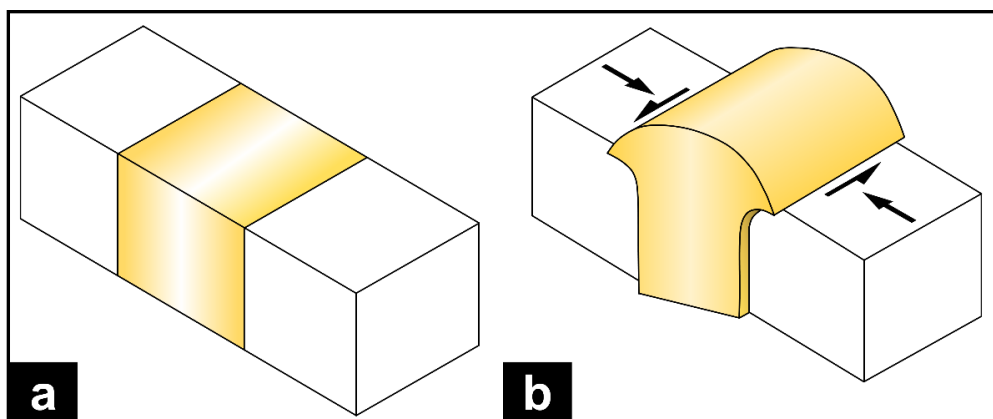
شکل ۴. مقطع قائم نشان‌دهنده توزیع لغزش در راستای پاره گسلی

از مشخصه‌های دیگر حاصل از تعامل پاره‌های گسلی همپوشان، توسعه بالاآمدگی گنبدی متقارن (symmetrical domal uplift) یا بیرون‌زدگی قائم (vertical extrusion) است که از جمله منابع تشکیل و توسعه دگرریختی (off-fault deformation) است (شکل ۵-الف). در مقابل، در بیرون از پهنه ترفشارش و پله گسلی همپوشان، حوضه‌های فرونشینی نامتقارنی (asymmetric subsidence basins) در هر دو سمت پهنه ترفشارش توسعه می‌یابد که حوضه‌های ترفشارشی (transpressional basins) نامیده می‌شوند (Sylvester, 1988) که متعاقباً ساختارهای گل‌مانند منفی (negative flower structures) در این نواحی تشکیل می‌شود (شکل ۵-الف). دامنه و طول موج چین حاصل طی کرنش (تنگ‌شدگی چین) به ترتیب افزایش و کاهش می‌یابد به طوری که پهنه ترفشارش موجود متحمل ضخیم‌شدگی ناهمگن رو به بالا محدب (convex upward heterogeneous thickening) می‌شود. به علاوه، پهنه ترفشارش علاوه بر بالاآمدگی در راستای محور Y (بیرون‌زدگی قائم)، در راستای محور X سیستم مختصات متحکم کشیدگی می‌شود (بیرون‌زدگی جانبی) و حول محور چرخش قائم Y حدود ۳۰ درجه دچار چرخش می‌شود که این سبب انحراف محور چین از حالت عمود اولیه نسبت به جهت همگرایی می‌شود (شکل ۵-ب). از اینرو، پهنه ترفشارش متحمل بیرون‌زدگی قائم و جانبی (lateral extrusion) می‌شود.



شکل ۵. الف) مدل نشان دهنده جابه جایی قائم پهنه ترافشارش. ب) بیرون زدگی قائم و جانبی و همچنین چرخش محور چین نسبت به حالت دگرریخت نشده.

همانطور که گفته شد، شیب اولیه پاره‌های گسلی ۹۰ درجه بوده و ما انتظار داریم طی همگرایی مورب، یک پهنه ترافشارش مورب مونوکلینیک تکامل یابد. اما در طی دگرریختی پیشرونده (طی تکامل زمانی همگرایی مورب) هندسه مرزهای پهنه تغییر کرده و رئوس پاره‌های گسلی در پهنه ترافشارش انحراف می‌یابد. انحراف پاره‌های گسلی سبب می‌شود که شیب گسل در این نواحی به کمتر از ۹۰ درجه (به حدود ۸۹-۸۶ درجه کاهش می‌یابد). در نزدیک سطح (تا عمق ۱/۵ کیلومتری) کاهش یابد. از اینرو، هیچ یک از تنسورهای سه بعدی تنش و کرنش جز در آغاز دگرریختی، با محورهای سیستم مختصات منطبق نیستند. پهنه ترافشارش حاصل تنها چند درجه (۴-۱ درجه) از تقارن مونوکلینیک انحراف یافت و سبب توسعه تقارن تری کلینیک در آن شد. این حالت، به توسعه یک مدل پهنه ترافشارش با جریان ناهمگن، ناپیوسته، تری کلینیک، با برش محض غالب (pure-shear-dominated, triclinic, discontinuous heterogeneous flow model) نتیجه می‌شود (Nabavi et al., 2017c, 2017d, 2018). در این مدل، با توجه به بیرون زدگی مقارن و انحراف شیب گسل‌ها، زاویه بین جهت بیرون زدگی و شیب پهنه ترافشارش (Fernández and Díaz-Azpiroz, 2009) به طور موضعی در اعماق ۱/۵-۰ کیلومتر از صفر درجه منحرف می‌شود در حالی که این زاویه در اعماق ۱۵-۵ کیلومتر برابر صفر درجه است. به علاوه با توجه به تغییر شدت بیرون زدگی قائم در موقعیت‌های مختلف راستای پهنه ترافشارش، از اینرو زاویه بین جهت بیرون زدگی و شیب پهنه از صفر درجه منحرف می‌شود. از اینرو زاویه حاده‌ای بین برش ساده مورب و جهت بیرون زدگی قائم تشکیل می‌شود. مورب بودن نسبی مؤلفه برشی ساده سبب توسعه خطوارگی‌های مورب و دارای زاویه میل می‌شود. نتایج این کار نشان می‌دهد که تکامل پهنه‌های ترافشارش به تغییراتی کوچک در عوامل کنترل کننده‌شان بسیار حساس هستند.



شکل ۶. مدل پهنه ترافشارش با جریان ناهمگن، ناپیوسته، تری کلینیک، با برش محض غالب (Nabavi et al., 2018)

به طور کلی دگرریختی ترافشارشی در پله‌های گسلی تراکمی عموماً با بالا آمدگی (بیرون زدگی قائم)، بیرون زدگی جانبی، چین‌های دو لولایی و شدیداً خمیده، چرخش محور چین‌ها، شاخص‌های برشی، بودین‌ها، گسل‌های مورب‌لغز، چرخش قطعات گسلی، ساختارهای کششی وابسته، بیرون زدگی و انعقاد، و حوضه‌های ترافشارشی در دو جناح پهنه ترافشارشی مشخص شده‌اند.



## References:

- Fernández, C., Díaz-Azpiroz, M., 2009. "Triclinic transpression zones with inclined extrusion", *Journal of Structural Geology*, 31, p. 1255-1269.
- Frehner, M., 2016. "3D fold growth in transpression", *Tectonophysics*, 693, p. 183-196.
- Jones, R.R., Holdsworth, R.E., Clegg, P., McCaffrey, K., Tavarnerelli, E., 2004. "Inclined transpression", *Journal of Structural Geology*, 26, p. 1531-1548.
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, M.R., Shirzaei, M., 2016. "Analysis of transpression within contractional planar fault steps using the finite-element method", *Geological Society of America Annual Meeting, Abstracts with Programs*, 48, p. 7.
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, M.R., Frehner, M., 2017a. "Analysis of transpression within contractional fault steps using finite-element method", *Journal of Structural Geology*, 96, p. 1-20.
- Nabavi, S.T., Díaz-Azpiroz, M., Talbot, C.J., 2017b. "Inclined transpression in the Neka Valley, eastern Alborz, Iran", *International Journal of Earth Sciences*, 106, p. 1815-1840.
- Nabavi, S.T., Rahimi-Chakdel, A., Khademi, M., 2017c. "Structural pattern and emplacement mechanism of the Neka Valley nappe complex, eastern Alborz, Iran", *International Journal of Earth Sciences*, 106, p. 2387-2405.
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Frehner, M., 2017d. "3D FE-modelling of inclined, brittle-ductile transpression", 15<sup>th</sup> Swiss Geoscience Meeting, Davos, 17<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> November 2017, Abstract volume, p. 33-34.
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Frehner, M., Mohammadi, M., Ghassemi, M.R., 2017e. "Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: insights from 3D elasto-plastic finite element models", 15<sup>th</sup> Swiss Geoscience Meeting, Davos, 17<sup>th</sup>-18<sup>th</sup> November 2017, Abstract volume, p. 34-35.
- Nabavi, S.T., Alavi, S.A., Mohammadi, S., Ghassemi, 2018. "Mechanical evolution of transpression zones affected by fault interactions: insights from 3D elasto-plastic finite element models", *Journal of Structural Geology*, 106, p. 19-40.
- Sanderson, D.J., Marchini, W.R.D., 1984. "Transpression". *Journal of Structural Geology*, 6, p. 449-458.
- Sylvester, A.G., 1988. "Strike-slip faults", *Geological Society of America Bulletin*, 100, p. 1666-1703.