



فصلنامه زمین ساخت

پاییز ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۷

doi 10.22077/jt.2025.9222.1201

مدل سازی عددی دوبعدی حوضه تراکشی در امتداد گسل های راستالغز دهشیر بافت-قم زفره، ایران مرکزی

پریسا شکری^۱، سید احمد علوی^{۲*}، محمدرضا قاسمی^۳، سید مهدی گنجیانی^۴

۱- دانشجوی دکتری تکنیک، گروه حوضه های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۲- استاد زمین ساخت، گروه حوضه های رسوبی و نفت، دانشکده علوم زمین، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- استاد پژوهشکده علوم زمین، سازمان زمین شناسی و اکتشافات معدنی کشور، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مکانیک، دانشگاه تهران، تهران، ایران

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۶/۱۶

در این مطالعه مدل سازی المان محدود دوبعدی با رئولوژی کشسان نیوتنی با استفاده از نرم افزار آباکوس^۱ برای بررسی هندسه و فرگشت حوضه تراکشی لوزی شکل در امتداد پله های رهایی در سامانه گسل راستالغز راست بر دهشیر بافت-قم زفره در کمان ماگمایی ارومیه-دختر انجام شده است. مدل ها سه هندسه پله رهایی گسل را در نظر می گیرند: پله های رهایی غیر هم پوشان، خنثی و هم پوشان. تحلیل هندسه های آن ها حوضه های دوکی شکل، Z شکل باز و لوزی شکل را به ترتیب نشان داد. یافته های ما نشان می دهند که افزایش هم پوشانی منجر به الگوی تغییر شکل گسترده و کشیده می شود، در حالی که نبود هم پوشانی باعث چرخش بلوک و الگوی تغییر شکل باریک می شود. حوضه تراکشی نمونه ای از فرگشت پیشرونده پله های هم پوشان است که با گذشت زمان شکل لوزی کشیده تا دوزنقه ای به خود می گیرد. علاوه بر این، نتایج نشان می دهند که میزان هم پوشانی بین گسل های راستالغز موازی بر تنش و کرنش تأثیر می گذارد. در پله رهایی، تنش نرمال متوسط در مرکز گسل به شکل کششی و در رأس گسل، به شکل فشارشی تمرکز دارد. جفت ناحیه های با بیشینه و کمینه مقادیر تنش به ترتیب در بخش های داخلی و بیرونی رأس های پاره های گسلی تمرکز یافته است. این پژوهش با بررسی پله رهایی گسل راستالغز راست بر دهشیر-بافت، قم-زفره و توزیع تنش و کرنش درون حوضه تراکشی در این منطقه بینش های ارزشمندی در مورد فرآیندهای ژئودینامیکی و فرگشت زمین ساختی منطقه قم-زفره، دهشیر-بافت ارائه می دهد.

کلمات کلیدی: حوضه تراکشی، پله رهایی، روش المان محدود، نرم افزار آباکوس، گسل های قم-زفره و دهشیر-بافت



Two-Dimensional Numerical Modeling of a Transtensional Basin along the Dehshir–Baft–Qom–Zefreh Strike-Slip Faults, Central Iran

Parisa Shokri¹; Seyed Ahmad Alavi^{2*}; Mohammad Reza Ghassemi³; Seyed Mehdi Ganjiani⁴

1- PhD Candidate in Tectonics, Department of Sedimentary and Oil Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

2- Professor of Structural Geology, Department of Sedimentary and Oil Basins, Faculty of Earth Sciences, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Professor, Research Institute for Earth Sciences, Geological Survey of Iran, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Department of Mechanical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran

Abstract

In this study, two-dimensional finite element modeling with Newtonian elastic rheology was conducted using ABAQUS software to investigate the geometry and evolution of a rhomb-shaped transtensional basin formed along releasing step-overs in the right-lateral strike-slip Dehshir–Baft–Qom–Zefreh fault system, located within the Urumieh-Dokhtar magmatic arc. The models examine three geometries of fault releasing steps: underlapping, neutral, and overlapping configurations. The geometric analysis of these models revealed spindle-shaped, open Z-shaped, and rhomb-shaped basins, respectively. Our findings indicate that increased overlap between faults leads to an extended and diffuse deformation pattern, while the absence of overlap results in block rotation and a more localized deformation style. The transtensional basin exemplifies the progressive evolution of overlapping step-overs, gradually transitioning from an elongated rhomboidal to a trapezoidal geometry over time. Furthermore, the results demonstrate that the degree of overlap between parallel strike-slip faults significantly affects the distribution of stress and strain. Within the releasing step-over, average normal stress concentrates as extensional in the fault center and as compressional near the fault tips. Paired zones of maximum and minimum stress values are concentrated at the inner and outer edges of the fault tips, respectively. By examining the releasing step-over of the right-lateral Dehshir–Baft–Qom–Zefreh fault and analyzing the stress-strain distribution within the transtensional basin, this research offers valuable insights into the geodynamic processes and tectonic evolution of the Qom–Zefreh and Dehshir–Baft regions.

Keywords: Transtensional basin, Releasing step-over, Finite element method, ABAQUS software, Qom–Zefreh and Dehshir–Baft faults.

*Email: a-alavi@sbu.ac.ir

Tel: +989123906608

۱. مقدمه

حوضه تراکشی در پله‌های گسل‌های راستالغز (گسل قم-زفره و گسل دهشیر-بافت) در امتداد کمان ماگمایی ارومیه دختر ایجاد شده است. حوضه‌های تراکشی می‌توانند در منطقه هم‌پوشانی پله‌ها و خم‌های گسلی ایجاد شوند.

مؤلفه پله گسلی به صورت چپ‌پله یا راست‌پله است، وقتی که مؤلفه پله با مؤلفه لغزش کلی یکسان باشد، پله‌های گسلی رهایی یا کششی (مانند چپ‌پله در راستای گسل چپ‌گرد و راست‌پله در راستای گسل راست‌گرد) توسعه می‌یابد (Misra and Mukherjee, 2015; Mann et al., 1983; Cunningham and Mann, 2007). سامانه‌های گسل راستالغز مانند سامانه گسلی قم-زفره؛ دهشیر-بافت، معمولاً پیچیدگی‌هایی به شکل پله‌های گسلی رهایی نشان می‌دهند و بسیاری از این مناطق در نزدیکی مناطق پرجمعیت (به‌عنوان مثال، گسل راستالغز پیرانشهر و سیه چشمه-خوی) واقع شده‌اند. در حالی که گسل‌های راستالغز ممکن است در مقیاس بزرگ به‌عنوان ساختارهای پیوسته و خطی ظاهر شوند، معمولاً ناپیوسته بوده و از بخش‌های گسلی تشکیل شده‌اند که توسط پله‌ها از هم جدا شده‌اند و اثر سطحی خمیده‌ای نشان می‌دهند.

پله‌ها پیامدهای مهمی برای ارزیابی خطر لرزه‌ای دارند، زیرا توانایی گسیختگی گسل برای انتشار از یک بخش به بخش دیگر از طریق پله، طول کل گسیختگی و در نتیجه اندازه احتمالی زمین‌لرزه‌ها را تعیین می‌کند (Shaw and Dieterich, 2007). درک توانایی گسیختگی برای انتشار در فواصل بزرگ پله‌ها و انتقال به سرعت‌های فوق‌برشی در سامانه پله‌ای گسلی در این منطقه برای ارزیابی خطر لرزه‌ای بسیار مهم است (Cunningham and Mann, 2007).

هندسه منطقه مورد مطالعه به صورت پله‌های گسلی رهایی است، که این پله‌ها ناهنجاری‌هایی در امتداد گسل‌های راستالغز هستند و نقش تعیین‌کننده‌ای در تعیین میدان‌های تنش و کرنش در این ناحیه دارند (Dooley and Schreurs, 2012). ماهیت پله‌ها، چه فشارشی (تراکمی) و چه کششی (رهايي)، به جهت پله‌های گسلی نسبت به جهت حرکت راستالغز بستگی دارد.

با گذشت زمان، پله‌ها می‌توانند به خم‌های پیوسته گسلی تبدیل شوند، زیرا گسل‌های شاخه‌ای گسترش یافته و در سراسر آن‌ها به هم متصل می‌شوند (Zhang et al., 1989). مشابه پله‌ها، خم‌ها در گسل‌های راستالغز می‌توانند فشارشی (خم‌های تراکمی) یا کششی (خم‌های رهایی) باشند. این خم‌های راستالغز معمولاً به‌عنوان مناطق تمرکز تغییر شکل پوسته عمل می‌کنند و باعث ایجاد رشته‌کوه‌های فشارشی در بالای خم‌های تراکمی و حوضه‌های کششی در بالای خم‌های رهایی می‌شوند. آن‌ها همچنین اغلب با پایان و گاهی آغاز گسیختگی‌های زمین‌لرزه‌ای مرتبط هستند (Wesnousky, 2006; Kase and Kuge, 2001; Oglesby et al., 2005).

مطالعات متعددی به مدل‌سازی عددی تشکیل حوضه‌های کششی و تنش و کرنش در سازه‌های تحت تأثیر گسل راستالغز پرداخته‌اند. این مطالعات مدرن با ارائه مدل‌های مبتنی بر کرنش نقطه شروع موثری در تجزیه و تحلیل پهنه تغییر شکل در دو و سه بعد هستند. وو و همکاران (Wu et al., 2009) مدل‌های آنالوگ^۱ جعبه ماسه مقیاس‌بندی شده برای بررسی تکامل چهاربعدی حوضه‌های واگشوده تشکیل‌شده در بالای پله‌های رهایی در هر دو سامانه گسل راستالغز خالص و تراکشی بررسی کرد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که حوضه‌های واگشوده در حالت متفاوت‌تری در مقایسه با راستالغز خالص ایجاد می‌شوند. هر دو نوع مدل، سامانه‌های سیگموئیدال^۲ تا لوزی شکل کشیده واگشوده، را تولید کردند. در تراکشی، یک سامانه گرابن در بالای پهنه جابجایی اصلی (PDZs) تشکیل شد در مقطع عرضی، واکنش تراکشی به‌عنوان گرابن‌های نامتقارن که توسط گسل‌های مایل کششی مسطح محدود شده‌اند آغاز می‌شوند. با افزایش جابجایی روی PDZها، نشست حوضه باعث شد که این گسل‌ها به دلیل فروپاشی بلوک گسل به سمت داخل حوضه کوژ به سمت بالا و در زاویه شیب کمتر شوند. علاوه بر این، تقسیم‌بندی کرنش باعث شد که لغزش گسل به طور عمده کششی یا راستالغز تبدیل شود. مدل‌ها از نزدیک با هندسه حوضه‌های کششی

1. Analogue
2. Sigmoidal



طبیعی از جمله سامانه گسلی جنوب دریای مرده و حوضه وین، اتریش مقایسه می شوند.

(Strijker et al. 2013) با استفاده از روش اجزاء محدود، توزیع تنش، نیمرخ های لغزش و الگوهای دگرریختی در چهار الگو یک شکستگی، پله گسلی تراکشی، پله گسلی ترافشارشی، ترکیبی از پله های تراکشی و ترافشارشی با جهت گیری ها و طول های شکستگی ها متفاوت و همچنین دسته شکستگی از پیش موجود پلکانی در شرایط فشار یک جهتی دور میدان را پژوهش نمودند. در مدل ترافشارشی، ربع های فشارشی رأس های داخلی شکستگی، در داخل پهنه واگذاری گسله^۱ قرار می گیرند و ارتباطی بین شکستگی ها در پهنه یاد شده که یک پهنه تنش بالا است، روی نمی دهد. در مقابل ناحیه های با در نزدیکی رأس های بیرونی شکستگی ها توسعه می یابد که سبب انتشار ترک های بال مانند در این راستا می شود. کاهش فاصله بندی شکستگی ها سبب درهم آمیختگی پهنه های برشی در پیرامون پایانه های شکستگی ها می شود که این درهم آمیختگی می تواند در صورت افزایش کرنش خمیری توسعه یابد. نتیجه ها نشان داده است که لغزش آرایه های ترافشارشی، به غیر از حالت عدم همپوشانی شکستگی ها در زاویه همگرایی ۴۵ درجه، کمتر از آرایه های شکستگی تراکشی است. صادقی فرشباف و همکاران (Sadeghi-Farshbaf et al., 2024) با تمرکز بر مدل سازی عددی دوبعدی، به تحلیل مکانیک شکست بلوک ها در گسل های نرمال تحت شرایط تکتونیک کششی پرداخته است. پژوهش با طراحی یک مدل دو لایه شامل پوسته شکننده و پوسته ویسکوز-پلاستیک، انتقال برش از لایه پایین تر به لایه بالاتر را شبیه سازی کرده و تأثیر نرخ کشش و ضخامت پوسته شکننده بر تنش لازم برای گسیختگی را بررسی نموده است. نتایج نشان داد که برای شکست پوسته شکننده با ضخامت حدود ۱۲ کیلومتر در مرحله بین لرزه ای، حدود ۱۶۰ مگاپاسکال تنش لازم است. این مدل با رویکردی نوآورانه به تحلیل گسل های نرمال، رفتار پوسته شکننده و نقش نرخ کشش پرداخته و به بهبود درک از خطر لرزه ای در مناطق فعال کششی کمک می کند.

صادقی فرشباف و همکاران (Sadeghi-Farshbaf et al., 2019) به تحلیل نواحی تمرکز تنش در اطراف گسل های اصلی فعال در استان آذربایجان شرقی ایران با استفاده از شبیه سازی های عددی سه بعدی، رفتار مکانیکی و هندسه پیچیده گسل ها پرداخته تا مناطق مستعد تمرکز تنش شناسایی شوند. این مدل ها شامل داده های ساختاری و نرخ های لغزش گسل های منطقه، ویژگی های مکانیکی پوسته، و اثرات توپوگرافی و ویژگی های هندسی گسل ها هستند. نتایج مطالعه نشان داد که گسل های فعال می توانند باعث تجمع تنش های بیشتر در مناطقی خاص از پوسته شوند که این تنش ها با وقوع زمین لرزه های آینده همراه است. این تحقیق به ویژه بر نقش مدل های عددی سه بعدی در پیش بینی مناطق دارای خطر لرزه ای بالا تأکید دارد و نشان می دهد که پیچیدگی هندسی گسل ها و توزیع فضایی آن ها نقش کلیدی در تمرکز تنش ها دارند. یافته ها می توانند به بهبود ارزیابی خطر لرزه ای و برنامه ریزی ایمنی در مناطق لرزه خیز کمک کنند.

در منطقه مورد پژوهش ما، مطالعات میدانی و مدل های آنالوگ پیشین، بینش هایی در مورد الگوهای تغییر شکل ارائه داده اند، با این وجود مکانیک اختلال تنش، تقسیم کرنش و فرگشت گسل در رابطه با پیکربندی های آن ها هنوز به خوبی درک نشده است. در این پژوهش، ما با استفاده از المان محدود کشسان دوبعدی، درک نقش قطعه بندی، جدایش و هم پوشانی گسل های راستالغز-قم-زفره، دهشیر-بافت در فرگشت حوضه تراکشی، تأثیر زوایای واگرایی مختلف بر توزیع تنش و کرنش در پله های رهایی این گسل ها، تأثیر هندسه های مختلف پله های رهایی گسل (غیرهم پوشان، خنثی و هم پوشان) بر الگوهای تغییر شکل حوضه تراکشی ایجاد شده در این منطقه را ارائه می دهیم.

مدلسازی عددی دوبعدی ما درک نوآورانه ای از سامانه تنش های منطقه ارائه می دهد و نشان دهنده همبستگی قابل توجهی بین گسل های راستالغز و وقوع ساختارهای لوزی شکل است که تأثیر سیستماتیک گسل ها بر تشکیل آن ها را برجسته میکند. یافته های ما بینش های ارزشمندی در مورد فرآیندهای زمین شناسی پیچیده این منطقه ارائه می دهد و به درک عمیق تری از فرگشت

یک سامانه برشی، از کرتاسه پسین در طول همگرایی صفحات عربستان و ایران مرکزی، باید در نظر گرفته شود (Khalatbari Jafari et al., 2016; Moghadam et al., 2010; Javadi et al., 2015; Walker and Jackson, 2004; Naeimi et al., 2015; Yamani et al., 2010; MohammadiNia et al., 2024).

در نهایت، با ادامه همگرایی صفحات و فروانش مایل، ماگماتیسیم ناشی از فروانش از همان کافت قدیمی لبه صفحه و از طریق شکاف‌های ایجادشده شروع به صعود کرد و کمر بند ماگماتیسیم ارومیه-دختر را تشکیل داد. در واقع، وجود افولیت‌ها و زبان‌های ماگمایی بعدی ناشی از فروانش را می‌توان به ایجاد یک حوضه کششی در کف اقیانوس و تشکیل یک کافت اقیانوسی نسبت داد، که پس از پسروی دریا، کافت قدیمی را به یک حوضه کششی برای ظهور ماگما تبدیل کرد (Khalatbari Jafari et al., 2016; Moghadam et al., 2010; Javadi et al., 2015; Walker and Jackson, 2004; Naeimi et al., 2015; Yamani et al., 2010; MohammadiNia et al., 2024).

عکس هوایی منطقه مورد مطالعه ساختار لوزی شکل را در انتهای جنوب شرقی گسل قم-زفره و در امتداد گسل دهشیر-بافت نشان می‌دهد که این گسل‌ها تأثیر قابل توجهی بر روند کلی تشکیل حوضه تراکشی در پله راست این گسل‌های راستالغز در منطقه ارومیه-دختر داشته است (Khalatbari Jafari et al., 2016) (شکل ۱).

۳. روش

رویکردهای اصلی برای بررسی اندرکنش گسل‌ها، به ویژه حوضه‌های کششی، شامل استفاده از مدل‌های آنالوگ و عددی است (McClay and Dooley 1995; Dooley and McClay 1997; Basile and Brun 1999; Zwaan et al. 2016) or numerical modeling (Rodgers 1980; Gölke et al. 1994; Katzman et al. 1995; Petrunin and Sobolev 2008; Ben-Avraham et al. 2010; Shokri et al. 2024).

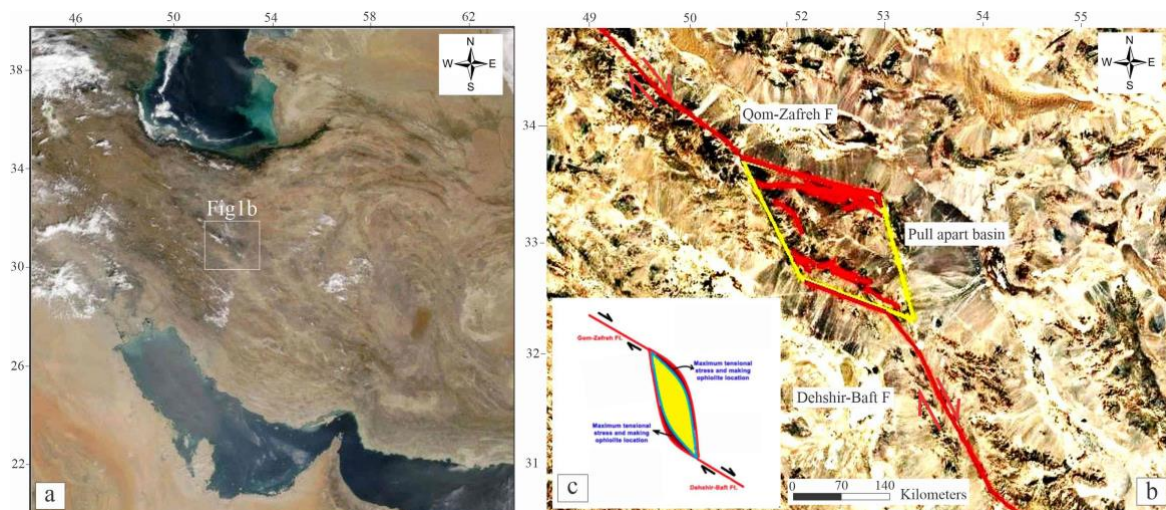
این مطالعه به بررسی مکانیک تغییر شکل پوسته در اطراف پله‌های گسل‌های راستالغز می‌پردازد. مدل‌سازی آنالوگ، با وجود محدودیت در ارائه اطلاعات کم از مکانیک‌های زیرسطحی، بینش‌های

زمین‌ساختی پویای منطقه و حوضه تراکشی کمک می‌کند.

۲. زمین‌شناسی منطقه مورد مطالعه

منطقه ارومیه-دختر به دلیل جایگاه زمین‌ساختی پیچیده و تاریخ ماگمایی منحصر به فرد آن مورد توجه می‌باشد. تحقیقات قبلی در این منطقه اغلب بر روی دینامیک فرآیندهای فروانش و فعالیت‌های ماگمایی حاصل از آن متمرکز شده است (Agard et al., 2011). به طور خاص، مطالعات نقش این منطقه را در همگرایی صفحات عربستان و اوراسیا برجسته کرده‌اند که ساختار زمین‌شناسی آن را از طریق فعالیت‌های کوه‌زایی شدید شکل داده است (Jackson, 1992; Derakhshani and Eslami, 2011; Agard et al., 2011). در طول کرتاسه پسین، صفحه عربستان تأثیر قابل توجهی بر صفحه ایران داشت و باعث ایجاد فشار قابل توجهی در بخش مرکزی ایران شد. تنش‌های مداوم در مناطق اطراف ایران مرکزی را می‌توان به کشسانی ایجادشده توسط این فشار نسبت داد که ناشی از نیروی فروانش مایل نئوتتیس به زیر فلات ایران است. اعتقاد بر این است که پس از بسته شدن پالئوتتیس در تریاس، ایران مرکزی و منطقه سندج-سیرجان در پاسخ به فشار نئوتتیس تثبیت و ادغام شدند (Jackson et al. 2002; Reilinger et al. 2006; Zanchi et al. 2006; Shokri et al. 2020).

تأثیر تنش فروانش مایل زمین‌ساختی منجر به تقسیم صفحه ایران به مناطق مختلف شد که کافت‌های محلی را تشکیل دادند و برخی از آن‌ها منجر به توسعه پوسته اقیانوسی شدند. وجود گسل‌های راستالغز و ساختارهای لوزی شکل مجاور، همراه با فعالیت‌های آتشفشانی هم‌راستا با این گسل‌ها، نشان‌دهنده یک سامانه زمین‌ساختی برشی-کششی است. این سامانه صعود ماگما از بخش‌های عمیق‌تر را با ایجاد حوضه‌های کششی در پوسته تسهیل می‌کند. از سوی دیگر، مشاهده سنگ‌های افولیتی در کنار ساختارهای لوزی شکل، تشکیل توالی کامل افولیتی در مناطق دهشیر و وجود گدازه‌های بالشی نزدیک گسل دهشیر-بافت و جنوب‌ناین نشان‌دهنده کشش فعال در این مناطق است. بنابراین، فعالیت‌های کششی در



شکل ۱. الف) نقشه ماهواره ای ایران؛ ب) محل حوضه کششی در عکس هوایی، ج) مدل شماییک حوضه تراکشی
برگرفته از مقاله (MohammadiNia et al., 2024)

حاکم بر تغییر شکل ساختار زمین‌شناسی را تحلیل می‌کنند (Dawson, 2000; Albertz and Sanz, 2012; Lesueur et al., 2020). این رویکرد مزیت قابل توجهی نسبت به مدل‌های جنبش‌شناختی دارد، زیرا امکان در نظر گرفتن طیف وسیع‌تری از تغییر شکل‌ها و رفتارهای گسلی را فراهم می‌کند. در مقابل، مدل‌های جنبش‌شناختی بر دو جهت خاص صفحه برش و انواع مختلف تغییر شکل، مانند برش ساده، فشرده‌سازی و کشش متمرکز هستند (Simpson and De Paor, 1993; Mookerjee and Mitra, 2009). در این مطالعه، ما زمین‌شناسی ساختاری حوضه را با تکنیک‌های مدل‌سازی المان محدود بررسی می‌کنیم.

از آنجا که نرم افزار آباکوس یک نرم افزار با قدرت تحلیل بالاست، ما در این مطالعه از نرم افزار آباکوس برای شبیه‌سازی ویژگی‌های تنش و کرنش و فرگشت دینامیکی حوضه تراکشی را در پله رهایی گسل با استفاده از مدل‌های جنبش‌شناختی دوبعدی با جابه‌جایی محدود بررسی کنیم. بخش‌های گسل می‌توانند هندسه‌های غیرهم‌پوشان، خنثی یا هم‌پوشان داشته باشند، که همه این‌ها به طور طبیعی رخ می‌دهند و در مطالعات زمین‌شناسی به خوبی مستند شده‌اند (Cunningham and Mann, 2007). ویژگی‌های هندسی پله‌های گسل تأثیر قابل توجهی بر ساختار و هندسه حوضه‌های کششی تشکیل شده بین این بخش‌های گسل دارند (Jayko and Bursik, 2012;).

دقیقی در مورد تکامل کرنش‌های محدود به زمین‌شناسی محلی ارائه نمی‌دهد. برای رفع این محدودیت، از شبیه‌سازی‌های عددی به منظور بازسازی میدان‌های جابجایی، تنش و کرنش در شرایط شبه پایدار استفاده شده است.

مدلسازی دو بعدی به‌طور دقیق شرایط واقعی زمین‌شناسی را بازتاب نمی‌دهد با این حال، از آنجا که رفتار مکانیکی (رئولوژی) مدل یک تخمین خطی از فرآیندهای غیرخطی است، ما از این مدل‌های الاستیک فقط برای بررسی الگوهای فضایی و دامنه‌های نسبی تغییر شکل استفاده می‌کنیم. این محدودیت‌ها ناشی از ساده‌سازی‌های مدل‌سازی المان محدود هستند. مدل‌های عددی ابزار ارزشمندی برای درک ساختارهای زمین‌شناسی هستند، زیرا امکان بررسی تغییر شکل و فرگشت میدان تنش را فراهم می‌کنند (Nemcok et al., 2002; Peacock and Zhang, 1994).

بنابراین، هدف ما پیش‌بینی میزان دقیق بالاآمدگی، نشست یا لغزش در امتداد گسل‌ها نیست، بلکه فقط نمایش یک الگوی نسبی از تغییر شکل و تغییرات میدان تنش و کرنش در پله‌های گسلی رهایی در منطقه زمین‌ساختی دهشیر-بافت، قم-زفره می‌باشد.

مدل‌های مکانیکی، با استفاده از روش المان محدود، برای شبیه‌سازی تغییر شکل‌های ناهمگن و لغزش گسل استفاده می‌شوند. این مدل‌ها معادلات ریاضی

مواد برای ماسه‌سنگ‌ها هستند از نسبت پواسون^۱ (v) ۰,۲۴ و مدول یانگ^۲ (E) ۲۲ گیگا پاسکال استفاده شد. فرض بر این است که خواص مواد در تمام لایه‌های مدل یکنواخت و از جنس ماسه است (Jaeger, 2007; Pollard and Fletcher, 2005). پارامترهای الاستیک (شامل مدول یانگ و نسبت پواسون) برای همه مدل‌ها ثابت نگه داشته شده‌اند. مطالعات عددی پیشین نشان داده‌اند که تغییر پارامترهای الاستیک تأثیر قابل توجهی بر نتایج مدل‌سازی ندارد (Bertoluzza, 1997; Gölke et al., 1994).

مرزهای چپ و پایین مدل به صورت $0 = u$ و $0 = v$ جهت‌های x و y ثابت شده‌اند تا از چرخش و انتقال جسم صلب جلوگیری شود (شکل ۲) (Nevitt et al., 2014). این شرایط مرزی خاص صفحات برشی موازی با پله‌های گسل و موازی با بخش‌های گسل داخلی ایجاد می‌کند، که نسبت به پله‌های گسل مایل هستند (Westaway, 1995). ویژگی‌های ماده در تمام لایه‌های مدل یکنواخت و شبیه ماسه در نظر گرفته شده‌اند. در مطالعات عددی قبلی مشخص شده است که تغییرات در ویژگی‌های ماده تأثیر ناچیزی بر نتایج مدل‌سازی دارند (Bertoluzza and Perotti, 1997); برای تکرار شرایط واقعی، حداکثر تنش کششی نرمال ۶۰ مگاپاسکال (Strijker et al., 2013). علاوه بر این، شرایط مرزی جابه‌جایی در مرز راست اعمال شده است تا کوتاه‌شدگی کلی ۴٪ در عرض مدل ایجاد شود (شکل ۲). این تحقیق بر بررسی تأثیر هندسه‌های مختلف پله بر توزیع تنش و کرنش با استفاده از یک جفت گسل راست‌الغز راست‌بُرد به عنوان مطالعه موردی متمرکز است.

شکل ۳ پارامترهای اصلی گسل‌های مدل‌شده شامل زاویه شیب، زاویه پله‌های گسل و هندسه پله‌های گسل را نشان می‌دهد. این مطالعه نسبت‌های مختلف هم‌پوشانی به جدایی، از جمله نبود هم‌پوشانی، هم‌پوشانی و خنثی را بررسی می‌کند و پله‌های گسل بررسی شده مایل هستند و در زوایای ۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه نسبت به محور Y در نمای نقشه قرار دارند. زاویه انحراف^۳ (θ) برای نشان دادن میزان هم‌پوشانی

van Wijk et al., 2017; Shokri et al. 2024; Wu et al., 2009). در مدل‌سازی پله رهایی گسل و حوضه کششی، از رویکرد المان محدود برای شبیه‌سازی رفتار جامدات کشسان خطی و کرنش در صفحات گسل در دو بعد استفاده شده است.

هدف اصلی این مطالعه بررسی اندرکنش بین دو گسل راست‌الغز راست‌بُرد موازی، هم‌اندازه، عمودی، مسطح و راست‌لغز در پله رهایی، با رعایت مدل اصطکاک کولن است. مطالعه ما شامل یک سری آزمایش‌های عددی با استفاده از زوایای واگرایی مختلف (۳۰°، ۴۵° و ۶۰°) و همچنین مدل‌های جنبش‌شناختی مختلف پله رهایی گسل (غیرهم‌پوشان، خنثی و هم‌پوشان) است. علاوه بر این، شرایط مرزی مختلفی برای ثبت سناریوهای واقع‌بینانه در نظر گرفته شده است. برای این تحقیق، ضریب اصطکاک ۰,۴ در نظر گرفته شده است، با فرض رفتار ماده غیرچسبنده (Pollard and Fletcher, 2005) با استفاده از روش المان محدود، ما شبیه‌سازی‌های عددی را برای تکرار رفتار حوضه کششی انجام دادیم و تحلیل دقیقی از توزیع تنش و کرنش حاصل ارائه دادیم. هدف تحقیق ما ارائه بینش‌هایی در مورد فرآیندهای اساسی حاکم بر فرگشت حوضه و مشخص کردن نقش پله رهایی گسل در این زمینه بود. نتایج مطالعه ما به درک عمیق‌تری از مکانیک و دینامیک پیچیده مرتبط با سامانه‌های گسل راست‌الغز کمک می‌کند و پیامدهایی برای تحقیقات زمین‌ساختی منطقه‌ای دارد.

جفت پله رهایی گسل به صورت مایل نسبت به تنش نرمال اعمال شده جهت‌گیری شده است، که منجر به تغییر شکل کششی در مرز می‌شود. این مدل‌ها نمایش بهتری از تغییر شکل دائمی بلندمدت ناشی از گسل، به ویژه در نزدیکی رأس گسل‌ها که تمرکز تنش رخ می‌دهد، ارائه می‌دهند. منطقه مطالعه ابعادی 20×20 کیلومتر دارد. هر بخش گسل ۲۰ کیلومتر طول دارد و از ۲۲۲۲۰ المان چهارضلعی با ۳۶۱۴۰ گره تشکیل شده است.

فرض بر این است که رئولوژی پوسته بالایی همگن و همسانگرد کشسان در نظر گرفته شده است (Turcotte and Schubert, 2014). کرنش صفحه دوبردی و رئولوژی الاستیک بر اساس مقادیر میانگین خواص مکانیکی

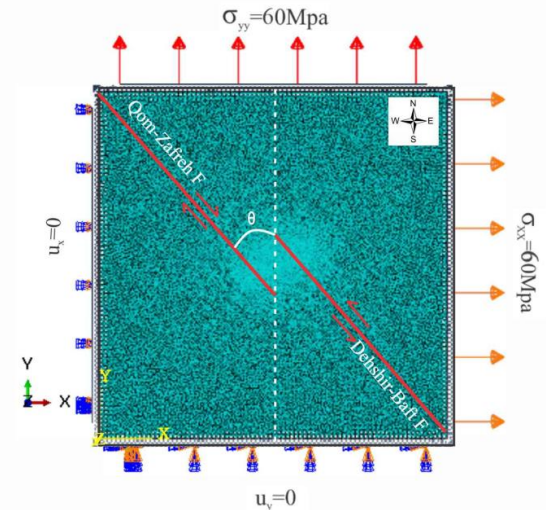
1. Poisson's ratio
2. Young's modulus
3. Offset Angle

al., 2009; Strijker et al., 2013; and van Wijk et al., 2017) مقایسه کرده و الگوهای کرنش تولید شده در این مدل ها با نتایج حاصل از مدل های آنالوگ و داده های میدانی برای پیکربندی های مشابه از جمله پله ها و خم ها همخوانی دارد.

در راستای مدل سازی دوبعدی و انجام تحلیل دینامیکی گسل های مورد نظر، از المان های چهارگره ای بهره گیری شده است (Seed et al., 1976; Pagliaroli, et al., 2019). انتخاب این نوع المان با هدف تأمین دقت لازم در شرایط مدل سازی ژئوتکنیکی و حفظ یکنواختی و نظم در شبکه مش بندی صورت پذیرفته است. به منظور تعیین اندازه بهینه مش و حصول تعادلی میان دقت نتایج عددی و زمان محاسبات، تحلیل همگرایی مش مورد بررسی قرار گرفت. در این تحلیل، چهار اندازه متفاوت از مش در مدل اعمال شد و به عنوان شاخص همگرایی، مدنظر قرار گرفت. نتایج حاصل از این ارزیابی در جدول ۱ نشان دهنده این است که با کاهش اندازه مش، روند تغییرات تنش نرمال متوسط به صورت یکنواخت افزایش یافته و از مرحله C به بعد، میزان اختلافات به کمتر از ۱ درصد رسیده که از دیدگاه مهندسی، قابل صرف نظر کردن می باشد. بر این اساس، اندازه مش انتخاب شده در این مطالعه شکل C، با اندازه مش ۱۰ میلی متر انتخاب شد که از نظر دقت و کارایی در سطح مطلوبی قرار دارد و به عنوان گزینه بهینه تلقی می گردد (شکل ۴).

شماره	نوع مش	اندازه مش (mm)	تنش نرمال متوسط (MPa)
۱	درشت	۱۰۰	۴,۳
۲	متوسط	۵۰	۶,۸
۳	ریز	۱۰	۷,۵
۴	خیلی ریز	۵	۷,۴۲

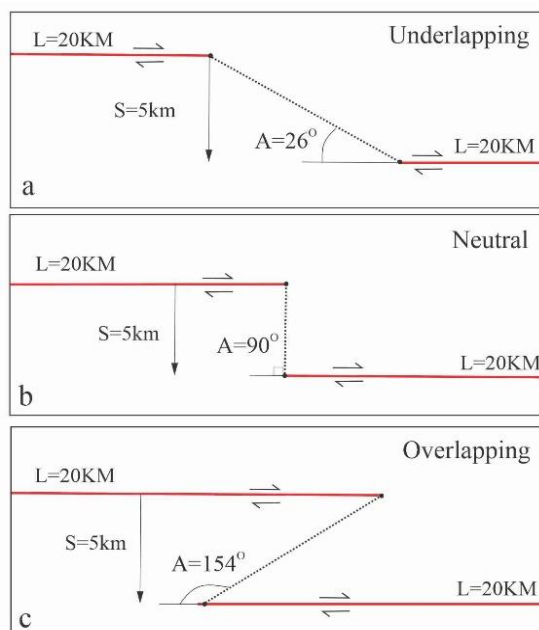
جدول ۱. آنالیز حساسیت مش بندی با تنش نرمال متوسط



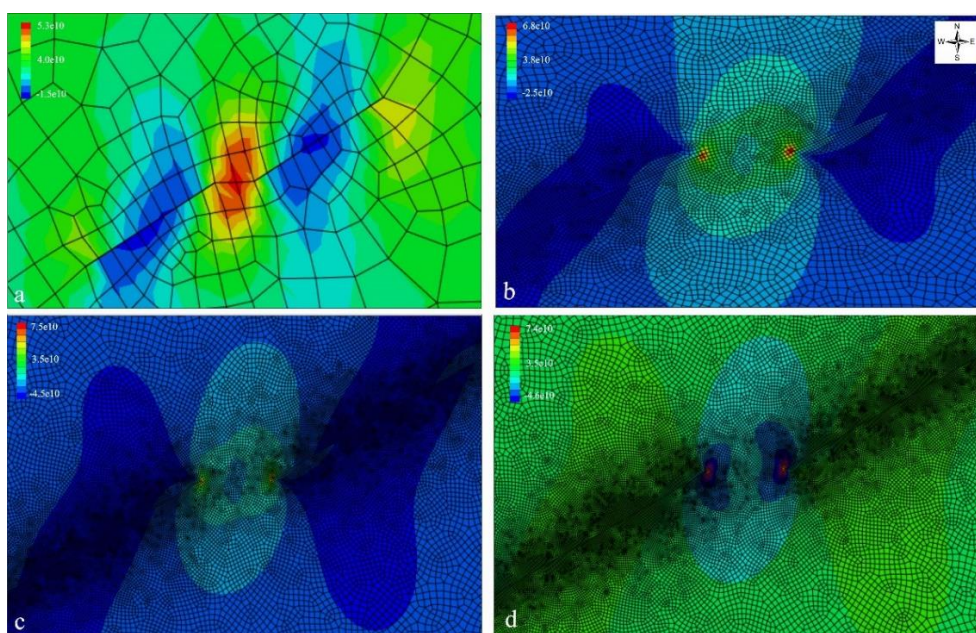
شکل ۲. المان های محدود، پیکربندی مدل، دو بخش گسل و شرایط مرزی مربوطه، کاهش تدریجی اندازه مش از محیط مدل به سمت بخش های گسل و تراکم مش بیشتر نزدیک حوضه کششی در مرکز شکل در نظر گرفته شده است.

و غیرهم پوشانی استفاده می شود. (شکل ۲). تمرکز بر توزیع تنش و کرنش است، که شاخص های کلیدی برای توسعه بالقوه شکستگی و گسل شوندگی بعدی هستند. هندسه های پله هم پوشان (O) و غیرهم پوشان (U) بین بخش های گسل اصلی موازی با روند گسل اعمال می شوند. جدایی (S) به صورت عمود بر روند گسل اصلی اندازه گیری می شود و ۱۲,۵٪ (یعنی ۱,۲۵ کیلومتر) از طول بخش های گسل است (Corti and Dooley, 2015; Dooley and Schreurs, 2012; McClay and Bonora, 2001). موارد هم پوشان (O و U) طول هم پوشانی ۲۵ درصد از طول

بخش گسل دارند (یعنی ۲,۵ کیلومتر). بنابراین، نسبت هم پوشانی به جدایی ۲:۱ است. علاوه بر این، زاویه واگرایی پله های گسل ۲۶ درجه در مورد پله غیرهم پوشان، ۹۰ درجه برای پله خنثی و ۱۵۴ درجه برای پله هم پوشان است (شکل ۲). این زوایا بین بخش های گسل اصلی و رأس گسل ها در منطقه پله رهایی اندازه گیری می شوند. سایر پارامترها مانند جدایش بین بخش های گسل اصلی و منطقه آسیب گسل (یعنی اندازه هم پوشانی و غیرهم پوشانی) ثابت باقی می ماند (شکل ۳). در نتیجه، ما مدل عددی خود را با آزمایش های دستگاهی قبلی انجام شده توسط محققان دیگر، مانند (Dooley et al., 2004; Wu et



شکل ۳. روابط جدایش و زاویه‌ای پله‌های گسلی در سه مدل ارائه شده (Corti and Dooley, 2015) طول قطعات گسل (L)، زاویه شیب (A)، فاصله جدایش (S) بین قطعات گسل



شکل ۴. تحلیل‌های انجام شده به منظور تعیین اندازه مناسب مش در نرم افزار آباکوس.

۴. بحث

ما در مدل‌های پله رهایی، اثرات پله‌های رهایی گسل‌های غیرهم‌پوشان، خشی و هم‌پوشان را بررسی کردیم. در مورد پله‌های رهایی غیرهم‌پوشان ($\theta < 90^\circ$) میدان‌های کرنش رأس گسل‌های جدا شده با یکدیگر اندرکنش می‌کنند، که منجر به یک منطقه فرونشست متصل می‌شود. میدان تنش عمدتاً راست‌الغز است، به جز در نزدیکی رأس گسل‌ها که کششی می‌شود. کرنش موضعی بین رأس گسل‌ها در مقایسه با مدل

میزان هم‌پوشانی و ناهم‌پوشانی گسل‌های اصلی یکی از عوامل هندسی مهمی است که بر توسعه پله‌ها تأثیر می‌گذارد. غیرهم‌پوشانی زمانی رخ می‌دهد که پله‌های رهایی گسل به یکدیگر نزدیک می‌شوند، که منجر به اندرکنش بین میدان‌های کرنش آن‌ها می‌شود. از سوی دیگر، هم‌پوشانی زمانی رخ می‌دهد که رأس گسل‌ها از یکدیگر عبور کرده‌اند.



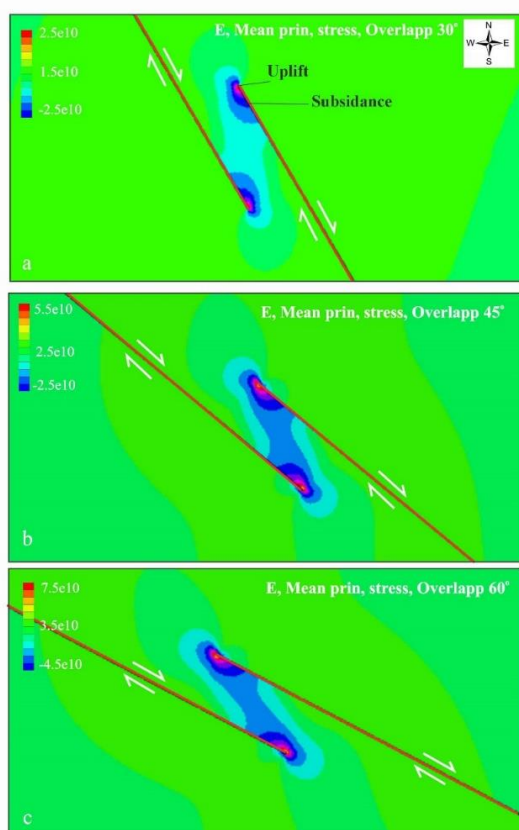
کرنش برشی نسبتاً کمی نشان می دهند و تفاوت قابل توجهی در کرنش برشی بین طرف های داخلی و خارجی بخش های گسل و درون منطقه تراکشی مشاهده نمی شود. علاوه بر این، کرنش برشی در رأس گسل ها با افزایش کمی در خارج از منطقه تراکشی افزایش می یابد. تمام مدل های مورد بررسی در این مطالعه الگوی متنوعی از مسیرهای کرنش و تنش را نشان می دهند، که نشان دهنده تغییر شکل ناهمگن است. تجمع کرنش در تمام مدل ها مشاهده می شود، که نشان دهنده تمرکز کرنش در مناطق خاص است.

نتایج مدل المان محدود نشان می دهد که حرکت نسبی، کاملاً توسط تغییر شکل در امتداد بخش های گسل ها جذب می شود. با این حال، اطراف ناحیه گسل، منطقه ای با گرادیان جابجایی وجود دارد که نشان دهنده کشش (تراکشی) در داخل پله های همپوشان است. در نتیجه، نشست بر روی پله های گسل آزاد پیش بینی می شود. توزیع تنش مدل شده در داخل پله های گسل و اطراف رأس های بخش های گسل نامتقارن است.

نتیجه های مدل ها الاستیک نشان می دهد که تنش نرمال متوسط در پله گسلی، کششی است در حالی که در ناحیه های بیرون از پله گسلی، تنش نرمال متوسط فشارشی تمرکز دارد. تنش نرمال متوسط کششی در پله های گسلی کششی (پهنه تراکشی) تمرکز یافته است و جفت ناحیه های با بیشینه و کمینه مقادیر تنش به ترتیب در بخش های داخلی و بیرونی رأس های پاره های گسلی تمرکز یافته است. به طور مؤثر، تنش متوسط نشان دهنده بالابردگی (تراکم) و فرونشست (کشیدگی) مربوط به گسلش است. الگوی تغییر شکل آرایه پلکانی کششی راستالغز به شرایط مرزی اعمال شده و میزان همپوشانی بین دو گسل اصلی راستالغز بستگی دارد. هنگامی که میزان همپوشانی دو گسل اصلی راستالغز افزایش می یابد، تغییر شکل سطح گسترده تر و طولانی تر می شود، اما زمانی که همپوشانی بین دو گسل اصلی راستالغز صفر شود، چرخش بلوک به طور قابل توجهی مشاهده می شود و تنها تغییر شکل سطح باریک و کوچک به دست می آید. این نتایج نشان می دهد که همپوشانی بین دو گسل اصلی راستالغز عامل مهمی در کنترل شکل، اندازه و مورفولوژی تشکیل حوضه تراکشی است.

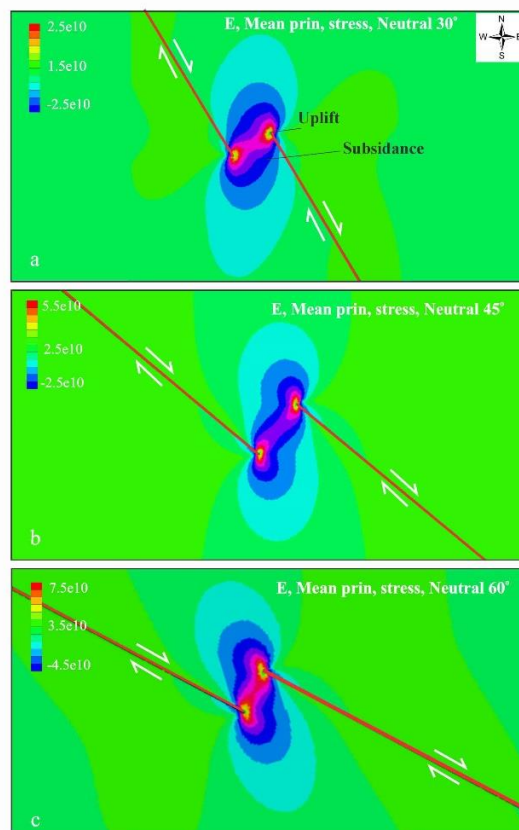
مرجع بیشتر است، زیرا باید کرنش در پله را جبران کند که توسط گسل های غیرهمپوشان قابل تحمل نیست. با نزدیک شدن رأس گسل ها به یکدیگر، کرنش خارج از گسل ضعیف می شود، زیرا گسل می تواند حرکت نسبی بلوک ها را بیشتر تحمل کند. هنگامی که بخش های گسل همپوشانی می کنند ($\theta > 90^\circ$)، تقسیم کرنش و اختلال تنش در اطراف پله به طور قابل توجهی تغییر می کند. فرونشست درون پله متمرکز می شود و حداکثر نرخ فرونشست کمی بیشتر از حالت غیرهمپوشان است.

پله های رهایی گسل های همپوشان باعث تنش برشی کمی بیشتر و کرنش ضعیف تر درون پله می شوند. این به این دلیل است که حرکت نسبی زمانی که گسل ها همپوشانی می کنند به طور مؤثرتری تحمل می شود. این نتایج با مطالعات قبلی که اندرکنش گسل را بررسی کرده اند، سازگار است. گسل های همپوشان نزدیک به هم در تحمل لغزش گسل کارآمدتر هستند، در حالی که گسل های غیرهمپوشان تمایل به تشکیل گرابن های لوزی کشیده در پله های رهایی دارند. مدل های آنالوگ نشان داده اند که زوایای انحراف مختلف منجر به هندسه های حوضه متمایز می شوند، مانند گرابن های لوزی کشیده برای زوایای انحراف 30° - 75° ، حوضه های کششی لوزی کوتاه برای پله های جانبی حدود 90° و گرابن های جعبه ای با دیواره های حوضه بسیار متصل برای زوایای انحراف 115° - 150° . علاوه بر این، گرانروی پوسته پایینی و گوشته بالایی در رفتار پله نقش دارد. کاهش گرانروی موجب تمرکز کرنش در ناحیه داخلی پله رهایی می شود، که نتیجه آن فرونشست با دامنه کمتر و نرخ بیشتر و محدود به منطقه ای با وسعت کمتر می باشد. در مقابل، گرانروی بالاتر باعث توزیع تنش برشی در ناحیه وسیع تر در اطراف پله شده و کرنش ایجاد شده به صورت گسترده تر و یکنواخت تر توزیع می شود. در این مدل، تنش اصلی حداکثر با جهت فشردگی هم راستا است، در حالی که تنش اصلی حداقل با جهت کشش هم راستا است. الگوهای کرنش در مدل های مرجع ما نشان داده شده است (شکل های ۵، ۶ و ۷). به طور کلی، تغییر شکل (تراکشی) شروع به تمرکز در منطقه ای می کند که پله های رهایی گسل همپوشانی می کنند. تمام مدل ها



شکل ۶. پله‌های هم‌پوشان در زوایای واگرایی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بررسی شده‌اند. توزیع تنش اصلی حداقل برای حوضه تراکشی، فرونشست درون حوضه (آبی پررنگ تا آبی روشن)، رأس بخش‌های گسل نشان‌دهنده بالا آمدن کناره‌های حوضه (زرد تا قرمز) است. افزایش هم‌پوشانی منجر به تشدید فرونشست و کشیدگی حوضه تراکشی می‌شود. پله‌های گسل هم‌پوشان شکل‌های حوضه ساعت شنی ایجاد می‌کنند.

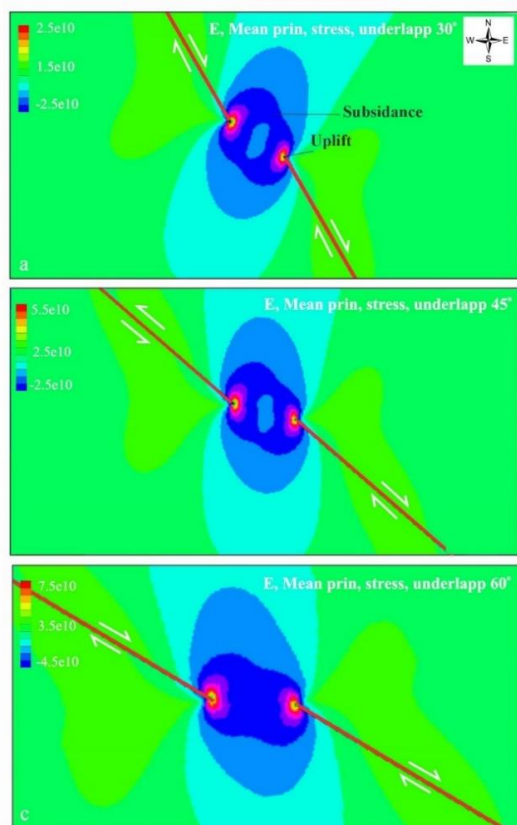
در مورد پله‌های هم‌پوشان و واگرایی مایل ۶۰، مدل‌ها مراحل زیر را نشان دادند که منجر به توسعه حوضه‌های لوزی شکل کشیده می‌شوند: (۱) بالا آمدن ساختاری متصل: در مرحله اولیه، یک بالا آمدن ساختاری متصل در حوضه مشاهده می‌شود، (۲) مراکز فرونشست دوگانه نامتقارن متمایز: با فرگشت حوضه، مراکز فرونشست دوگانه با ویژگی‌های نامتقارن متمایز در انتهای مخالف حوضه تشکیل می‌شوند، (۳) حوضه‌های دوکی شکل: شکل حوضه به یک شکل دوکی تبدیل می‌شود، شبیه به یک بیضی یا بیضی باریک، (۴) حوضه سیگموئیدی: فرگشت بیشتر منجر به حوضه‌ای با شکل سیگموئیدی می‌شود، شبیه به



شکل ۵. پله‌های گسل خنثی در زوایای واگرایی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بررسی شده‌اند. توزیع تنش اصلی حداقل برای حوضه تراکشی، فرونشست درون حوضه (آبی پررنگ تا آبی روشن)، رأس بخش‌های گسل نشان‌دهنده بالا آمدن کناره‌های حوضه (زرد تا قرمز) است. پله‌های گسل خنثی شکل‌های حوضه مانند دوکی، S باز یا Z شکل ایجاد می‌کنند.

اندرکنش بین گسل‌ها و جابه‌جایی کلی راستالغز تحت تأثیر ضریب اصطکاک قرار دارد. تغییر ضریب اصطکاک در گسل (کمتر از ۰٫۵) در مقایسه با لیتوسفر اطراف (۰٫۵) باعث حداکثر مشارکت گسل‌ها در جابه‌جایی می‌شود. در نتیجه، تشکیل حوضه‌های رسوبی محدود نمی‌شود. هنگامی که ضریب اصطکاک در لیتوسفر بیش از ۰٫۵ باشد، تغییر شکل راستالغز عمدتاً بین گسل‌ها تجمع پیدا نمی‌کند. در عوض، در سراسر پوسته بالایی پراکنده می‌شود، که مانع از توسعه حوضه‌های عمیق و باریک می‌شود. ضرایب اصطکاک کم در گسل‌های اصلی، کمتر از ۰٫۵، برای تجمع تغییر شکل راستالغز به طور خاص در و بین گسل‌های هم‌پوشان در حوضه ضروری است.

گسل ها یا شکستگی های ثانویه، مانند شکستگی های بال و آرایه های شکستگی دم اسبی کمک می کنند.



شکل ۷. پله های غیرهم پوشان در زوایای واگرایی ۳۰، ۴۵ و ۶۰ بررسی شده اند. توزیع تنش اصلی حداقل برای حوضه تراکشی، فرونشست درون حوضه (آبی پر رنگ تا آبی روشن)، رأس بخش های گسل نشان دهنده بالا آمدن کناره های حوضه (زرد تا قرمز) است. پله های گسل غیرهم پوشان منجر به حوضه هایی با شکل لوزی بلند و کشیده می شوند.

شکستگی های بال مانند در ربع کششی یک شکستگی مد II تشکیل می شوند و مسیرهای تنش فشارشی اصلی حداکثر را دنبال می کنند. در رأس شکستگی های مد II یا گسل های راستالغز، اختلال محلی میدان تنش اصلی منجر به توسعه گسل های شاخه ای می شود. این گسل های شاخه ای سه حوضه متمایز را در بر می گیرند که توسط ساختارهای برشی، فشارشی و کششی غالب هستند. تأثیر تغییر روند بر هندسه اتصال را بررسی کرده اند. این حوضه ها با دو بخش گسل راست بر پیش موجود مرتبط بودند و تحلیل بر تأثیر تنش

منحنی "S"، ۵) شکل لوزی کشیده: در نهایت، حوضه شکل لوزی کشیده به خود می گیرد. این تغییرات در شکل حوضه نتیجه اندرکنش بین واگرایی مایل و سایر عوامل مانند هندسه پله های گسل، نسبت هم پوشانی به جدایش است.

آغاز یا فعال سازی مجدد گسل ها را می توان از طریق تمرکز موضعی کرنش در مناطق گسلی پیش بینی کرد. تحلیل الگوهای تنش و کرنش در پله های رهایی گسلی غیرهم پوشان، خنثی و همپوشان، ویژگی های نواحی تراکشی را آشکار می سازد. در پله های غیرهم پوشان، به دلیل عدم حرکت بلوک ها در راستای گسل، تنش و کرنش به طور پراکنده در خارج از ناحیه تراکشی توزیع می شوند. در مقابل، در پله های خنثی و همپوشان، حرکت همزمان بلوک ها سبب تمرکز تنش و کرنش در ناحیه تراکشی می گردد. به ویژه، پله های همپوشان تمرکز قابل توجهی از تنش را نشان می دهند که می تواند موجب اتصال گسل های ثانویه یا شکستگی هایی رأس گسل ها می شود. در پله های غیرهم پوشان، تنش اصلی حداقل، که در امتداد آن گسل های عبوری از حوضه ممکن است تشکیل شوند، رأس بخش های گسل را به هم متصل می کند. در پله های خنثی، ممکن است رأس بخش های گسل را به هم متصل کند. این الگوهای تنش بینش هایی در مورد تشکیل و اتصال بالقوه گسل های عبوری از حوضه در هندسه های مختلف پله گسل ارائه می دهند. در پله های گسل هم پوشان (شکل ۶)، کشش موازی با بخش های گسل مشاهده می شود. با این حال، توجه به این نکته مهم است که توسعه گسل های عبوری از حوضه در پله های هم پوشان در مقایسه با پله های غیرهم پوشان و خنثی کمتر مشهود است. این موضوع را می توان در شکل ۷ مشاهده کرد،

جایی که تنش های اصلی حداقل، که با تشکیل بالقوه گسل های عبوری از حوضه مرتبط هستند، به خوبی در پله هم پوشان توسعه نیافته اند. در نتیجه، گسل های عبوری از حوضه در این منطقه تشکیل نمی شوند. این یافته ها نشان می دهند که حتی در مواد همسانگرد، اندرکنش گسل ها منجر به مسیرهای کرنش غیرهم محور و میدان های تنش پیچیده درون مناطق تراکشی می شود. این میدان های تنش به توسعه

در نزدیکی نوک گسل‌ها که به تنش کششی تبدیل می‌شود. کرنش موضعی بین نوک گسل‌ها در مقایسه با مدل مرجع بالاتر است، زیرا کرنش در ناحیه پله‌ای را که توسط گسل‌های غیرهمپوشان قابل تحمل نیست جبران می‌کند.

کرنش خارج از گسل زمانی که نوک گسل‌ها به یکدیگر نزدیک می‌شوند کاهش می‌یابد، زیرا گسل بهتر می‌تواند حرکت نسبی بلوک‌ها را تحمل کند. کرنش موضعی افزایش یافته مشاهده شده بین نوک گسل‌ها در مقایسه با مدل مرجع را می‌توان به تعامل پیچیده بین گسل‌ها نسبت داد. هنگامی که گسل‌ها با هم تعامل می‌کنند، تغییرات در کرنش را تحمل می‌کنند. خمش و اتصال گسل‌ها به توزیع کرنش کمک می‌کند و کرنش پله‌ای را که نمی‌تواند توسط گسل‌های زیرین جذب شود، متعادل می‌سازد. این تعادل ظریف، پایداری و قطعه‌قطعه شدن بخش‌های کششی را تضمین می‌کند.

هنگامی که دو گسل راستالغز راست‌بر هم‌پوشانی ندارند، دو حوضه غیرهمپوشان تشکیل می‌شوند که توسط یک منطقه بالا آمده گسترده از هم جدا می‌شوند. با این حال، در صورت هم‌پوشانی گسل‌ها، حوضه‌ها با هم ادغام می‌شوند. در صورتی که هم‌پوشانی بین گسل‌ها سه برابر فاصله جدایی باشد، امکان تشکیل حوضه‌های عمیق در مناطق فرونشست گسترده، که شامل منطقه گسل داخلی است، وجود دارد. نبود تقارن فضایی در مناطق گسلی ممکن است ناشی از نرخ‌های جابه‌جایی متفاوت گسل‌های راستالغز راست‌بر باشد، با نبود تقارن بیشتر به سمت گسل‌های فعال‌تر. مدل‌سازی پله‌های رهایی در گسل راستالغز راست‌بر نشان می‌دهد که در طول رشد منطقه هم‌پوشانی، جهت‌گیری در پله‌ها به سمت موازی شدن با گسل‌های تراکمی بر اساس نتایج به دست آمده برای پله‌های فشارشی می‌چرخد. الگوی تنش متوسط درون پله محدود است، با یک مقدار حداکثر دو جفت موقعیت محلی با ربع فشارشی حداکثر گسل‌های راستالغز راست‌بر و ربع کششی حداقل در رأس گسل‌های در حال گسترش تشکیل می‌شوند. در حوضه‌های تراکشی، میدان‌های تنش و کرنش از عوامل تعیین‌کننده در فرآیند گسترش و بازشدگی

فشارشی اعمال شده از دور متمرکز بود.

تکامل حوضه‌های کششی تراکشی تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله هندسه اولیه پله‌های گسل، نسبت همپوشانی به جدایی و زاویه واگرایی مایل قرار دارد. این پژوهش با اعمال زوایای واگرایی مختلف (۳۰، ۴۵ و ۶۰ درجه) بر مدل‌های تعامل قطعات گسل که نماینده پله‌های غیرهمپوشان، خنثی و همپوشان هستند، تأثیر این عوامل را بر تکامل حوضه بررسی کرده است. نتایج مدل‌ها نشان داد که فرگشت حوضه‌های تراکشی تحت تأثیر چندین عامل، از جمله هندسه اولیه پله‌های گسل، نسبت هم‌پوشانی به جدایی و زاویه واگرایی مایل قرار دارد. زاویه انحراف بین بخش‌های گسل به عنوان یک پارامتر کلیدی در کنترل هندسه حوضه شناسایی شد. زاویه بین گسل‌های عادی و راستالغز کاملاً به شرایط مرزی کلی مدل بستگی دارد، در حالی که ویژگی‌های ماده و نسبت هم‌پوشانی به جدایی به عنوان عوامل کنترل ثانویه در نظر گرفته می‌شوند. زاویه بین گسل‌های عادی و راستالغز از ۱۰-۶۵ درجه برای شرایط کششی تا ۱۰۰-۱۲۰ درجه برای شرایط فشارشی متغیر است.

درجه همپوشانی و عدم همپوشانی گسل‌های اصلی از جمله عوامل هندسی مهمی است که بر توسعه پله‌های گسل تأثیر می‌گذارد. در اینجا، اثرات گسل‌های غیرهمپوشان و همپوشان در چارچوب یک پله رهایی مورد مطالعه قرار گرفته است. به طور کلی، زمانی که دو گسل راستالغز راست‌گرد همپوشانی نداشته باشند، دو حوضه غیرهمپوشان تشکیل می‌شود که توسط یک ناحیه مرتفع گسترده از هم جدا شده‌اند. با این حال، در صورت همپوشانی گسل‌ها، حوضه‌ها با هم ادغام می‌شوند. در مدل‌ها، عدم همپوشانی زمانی رخ می‌دهد که قطعات جابه‌جا شده گسل به یکدیگر نزدیک می‌شوند و منجر به برهمکنش بین میدان‌های کرنش آنها می‌شود. علاوه بر این، همپوشانی زمانی اتفاق می‌افتد که نوک گسل‌ها از مقابل یکدیگر عبور می‌کنند. در مورد گسل‌های اصلی غیرهمپوشان با زاویه (θ) کمتر از ۹۰ درجه، یک برهمکنش بین میدان‌های کرنش نوک گسل‌های جدا شده رخ می‌دهد که منجر به تشکیل یک ناحیه فرونشست متصل می‌شود. میدان تنش غالب عمدتاً از نوع راستالغز است، به جز



حوضه‌ها به‌شمار می‌آیند. نتایج حاصل از این مطالعه نشان‌دهنده این است که هندسه پله‌های گسلی در تشکیل حوضه فرونشست تاثیر درد همپچنین کاهش میزان غیرهم‌پوشانی میان پله‌های گسل، از حالت غیرهم‌پوشان به وضعیت خنثی، منجر به بهم پیوستن حوضه‌های فرونشست می‌شود. در مقابل، افزایش هم‌پوشانی بین پله‌ها سبب ایجاد یک حوضه تراکشی منفرد با فرونشست متمرکز در ناحیه مرکزی می‌گردد. علاوه بر این، هندسه و مکان بالا آمدن‌های ساختاری درون حوضه و نبود تقارن حوضه به شرایط مرزی اعمال شده، به ویژه حرکت واگرایی مایل و هندسه پله‌های گسل بستگی دارد.

به طور کلی، مدل‌های حوضه‌های تراکشی مراکز فرونشست متصل با اشکال حوضه خاص را نشان می‌دهند. پله‌های گسل خنثی شکل‌های حوضه مانند دوکی، S باز یا Z شکل ایجاد می‌کنند (شکل ۵)، پله‌های گسل هم‌پوشان حوضه‌های ساعت‌شنی شکل ایجاد می‌کنند (شکل ۶)، و پله‌های گسل غیرهم‌پوشان منجر به حوضه‌هایی با شکل لوزی بلند و کشیده می‌شوند (شکل ۷). این حوضه‌ها گسل‌های دیواره‌ای مایل-کشی پلکانی را نشان می‌دهند، که می‌توانند به صورت سخت یا نرم به هم متصل شوند و یک رد کمانی در هر دو نمای دوبعدی و مسطح تشکیل دهند (Dooley and McClay, 1997). این هندسه مشابه بسیاری از حوضه‌های کشی و مدل‌های آنالوگ قبلی حوضه‌های کشی است (McClay et al., 2001; Gutowski and Koyi, 2007). به عنوان مثال، حوضه خلیج عقبه و حوضه دریای مرده، که در امتداد مرز صفحه آفریقا-عربستان قرار دارند، به ترتیب نمونه‌هایی از حوضه‌های ساعت‌شنی شکل و لوزی شکل در امتداد پله‌های گسل هم‌پوشان هستند (Reilinger et al., 2004; Mahmoud et al., 2005; Wdowinski et al., 2004). انتقال شکل حوضه‌ها از پله‌های غیرهم‌پوشان به پله‌های هم‌پوشان با افزایش انحنا در گسل‌های درون حوضه تراکشی همراه است (ten Brink and Ben-Avraham, 1989).

مقادیر متوسط تنش نرمال برای پله‌های رهایی گسلی خنثی (شکل ۵) پله‌های رهایی گسلی هم‌پوشان (شکل ۶) و پله‌های رهایی گسلی غیر هم‌پوشان

(شکل ۷) تعیین شد. مدل‌سازی کشسان نشان می‌دهد که تنش نرمال متوسط درون پله با کشش مشخص می‌شود، در حالی که منطقه خارج از پله (رأس گسل) تنش نرمال متوسط فشارشی را تجربه می‌کند. الگوی تنش نرمال متوسط درون پله رهایی، همراه با دو جفت حداکثر و حداقل تنش‌های محلی در طرف‌های پیشرو و عقب رأس بخش‌های گسل مشخص می‌شود. تنش متوسط به طور مؤثری بالا آمدگی (تراکم) و فرونشست (کشش) مرتبط با گسش را نشان می‌دهد (Aydin and Schultz, 1990; Brankman and Aydin, 2004). برای پله‌های رهایی هم‌پوشان در تمام زوایای واگرایی، نتایج مدل نشان می‌دهد که تنش‌های متوسط نسبتاً بالایی در رأس گسل‌ها تجمع می‌کنند و با اندرکنش دو بخش به سمت مناطق مرکزی کاهش می‌یابند. تنش‌های متوسط در پیکربندی‌های خنثی (شکل ۵)، در مقایسه با پله‌های هم‌پوشان (شکل ۶)، بیشتر در رأس گسل‌ها تجمع می‌کنند اما در مقابل، برای پله‌های رهایی غیرهم‌پوشان (شکل ۷)، تمرکز کمی از تنش متوسط بالاتر بین بخش‌ها وجود دارد. با این حال، بالا آمدن نزدیک رأس بخش‌های گسل هم‌پوشان نسبت به فرونشست حوضه نسبتاً کم است. در اصل، عمق و توسعه مراکز فرونشست به دلیل اندرکنش بین گسل‌ها افزایش می‌یابد. با افزایش زاویه واگرایی مایل از ۳۰° به ۶۰°، تنش فشارشی حداقل اصلی مدل‌شده به تدریج موازی با بخش‌های گسل مرزی می‌شود. در تمام مدل‌ها، مقادیر حداکثر تنش متوسط از تنش تفاضلی بیشتر است. نتایج نشان می‌دهند که ربع‌های کشی رأس بخش‌های گسل داخلی درون منطقه اتصال قرار دارند، که منجر به یک منطقه نسبتاً کم در این منطقه برای بیشتر مدل‌ها می‌شود. در مورد پله‌های گسل هم‌پوشان، انتظار می‌رود که گسل‌های بال مانند دم اسبی تشکیل شوند، که با جهت تنش اصلی حداکثر هم‌راستا هستند و از رأس گسل‌های بیرونی به سمت بیرون و از رأس گسل‌های داخلی به سمت منطقه اتصال گسترش می‌یابند.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد میزان هم‌پوشانی بین گسل‌های راست‌الغز راست‌گرد در تشکیل حوضه کشی الگوی توزیع و تمرکز حداکثر تنش را کنترل می‌کند. علاوه بر این، الگوهای توزیع

متوسط حداکثر و حداقل در مناطق عمودی گسل‌های مرزی مشهود هستند، جایی که تنش تفاضلی بالاتر است. گرا دیان تنش متوسط حداکثر گرا دیان‌های فشار بالقوه برای جریان سیال به سمت خارج از پله‌ها ایجاد می‌کند، در حالی که گرا دیان تنش متوسط حداقل گرا دیان‌های فشار بالقوه برای جریان سیال به سمت داخل پله‌ها ایجاد می‌کند. لغزش در جهت گسل مرزی اتصالی انواع مختلف پله‌های گسل باعث می‌شود که سیال در جهت پله‌های گسل جریان یابد، به طوری که شدت این جریان با کاهش جدایی بخش‌های گسل راست‌الغز راست‌بر افزایش می‌یابد.

پله‌های رهایی گسلی در امتداد گسل‌های راست‌الغز دهشیر-بافت، قم-زفره موجب تغییر در حرکت نسبی بلوک‌ها می‌شوند که منجر به تنش انحرافی بالا در منطقه اطراف می‌شود که این افزایش تنش باعث تجمع کرنش خارج از گسل‌های فعال می‌شود، که می‌تواند گسل‌های پیش‌موجود را دوباره فعال کند یا گسل‌های جدیدی را آغاز کند. این فرآیند کارایی مکانیکی سامانه گسل را با توزیع مجدد کرنش بهبود می‌بخشد. پارامترهای اصلی کنترل‌کننده تجمع کرنش موضعی شامل استحکام نسبی گسل، هندسه سامانه گسل و مدل کشسان فرض شده است. پیش‌بینی می‌شود که دلیل تنش نرمال متوسط فشارشی بین پله‌های تراکمی و تنش نرمال متوسط کششی بین پله‌های رهایی، تمرکز کرنش برشی و توسعه ساختارهای شکننده در پله‌های رهایی و مناطق کششی بیشتر از پله‌های تراکمی و مناطق رانده باشد.

هرچند مدل‌های ارائه‌شده عددی، دوبعدی و تعمیم‌یافته هستند، اما الگوهای کرنش تولیدشده در این مدل‌ها با نتایج حاصل از مدل‌های آنالوگ و داده‌های میدانی برای پیکربندی‌های مشابه از جمله پله‌ها و خم‌ها همخوانی دارد. همچنین در این منطقه برای اولین بار مدلسازی عددی انجام گرفته است و میدان‌های تنش و کرنش حاصل از شبیه‌سازی‌های ما می‌توانند در درک علل تغییر شکل‌های متنوع پوسته در اطراف این ساختارها مفید واقع شوند.

۵. نتیجه‌گیری

در این پژوهش از یک مدل المان محدود کشسان

بردار جابه‌جایی عمدتاً تحت تأثیر هم‌پوشانی و شرایط مرزی اعمال شده در زمین‌ساخت کششی قرار می‌گیرند. تمام مدل‌ها وجود یک میدان تنش کششی محوری را نشان می‌دهند. مناطق کششی بزرگ مرتبط با بخش‌های گسل هم‌پوشان تحت تأثیر کشش کلی قرار دارند، یعنی هر دو محور تنش کششی اصلی و مقادیر آن‌ها با افزایش نسبت هم‌پوشانی به جدایی و تغییر از شرایط خنثی به کششی افزایش می‌یابند. مناطق با حداکثر کشش در نزدیکی رأس بخش‌های گسل درون مناطق هم‌پوشانی قرار دارند. گسل‌های کششی که حوضه‌های کششی را محدود می‌کنند، موازی با مسیرهای تنش فشارشی اصلی هستند.

شروع یا فعال‌سازی مجدد گسل‌ها را می‌توان با تمرکز بر موضعی شدن کرنش در خارج از مناطق گسل پیش‌بینی کرد. پیکربندی بهینه گسل برای پله‌های مورد مطالعه با مقایسه نتایج مدل با مشاهدات تعیین شده است. تجزیه و تحلیل الگوهای تنش و کرنش در پله‌های گسل غیرهمپوشان، خنثی و همپوشان، ویژگی‌های منطقه تراکشی را روشن می‌سازد.

در پله‌های غیرهمپوشان، تنش و کرنش در خارج از منطقه تراکشی پراکنده می‌شوند که ناشی از عدم حرکت بلوک‌های موازی با گسل است. در مقابل، در پله‌های خنثی و همپوشان، حرکت هماهنگ بلوک‌ها باعث تمرکز تنش و کرنش در منطقه تراکشی می‌گردد. منطقه همپوشان تمرکز قابل توجه تنش را نشان می‌دهد که ممکن است منجر به اتصال گسل‌ها یا شکستگی‌های ثانویه بین نوک گسل‌ها شود و در نتیجه قطعات گسل/شکستگی هندسی جفت‌شده‌ای ایجاد کند که به عنوان گسل‌های عبوری از حوضه شناخته می‌شوند.

مدل‌های این پژوهش در شکل ۵، ۶ و ۷ نشان می‌دهد که تنش انحرافی در اطراف همه پله‌ها افزایش می‌یابد، در نزدیکی رأس گسل‌ها، تمرکز تنش رخ می‌دهد، که منجر به تغییر شکل و چرخش قابل توجه می‌شود. در مقابل، در فاصله‌های دورتر از گسل‌ها، سطح تنش نسبتاً کم است، که منجر به چرخش جزئی می‌شود. در طول لغزش واگرایی نسبی بر روی گسل‌ها، تنش در پله‌های رهایی کاهش می‌یابد. در تمام مراحل توسعه پله، و برای پله‌های رهایی، گرا دیان‌های تنش



References

- دویعدی با استفاده از نرم افزار آباکوس استفاده شد و به طور سیستماتیک تأثیر اندرکنش هندسه های مختلف پله های رهایی گسل راستالغز راست گرد (هم پوشان، غیرهم پوشان، خنثی) و زوایای واگرایی مختلف (30° ، 45° و 60°) بر تغییرات میدان های تنش و کرنش و تشکیل حوضه تراکشی در پله رهایی راست گرد گسل های راستالغز دهشیر بافت-قم زفره بررسی شد. یکی از یافته های کلیدی این پژوهش، چگونگی توزیع تنش و کرنش در حوضه تراکشی است. تحلیل دقیق توزیع لغزش گسل و الگوهای کرنش، واگرایی مایل، شرایط مرزی و هندسه های مختلف پله های رهایی گسل (هم پوشان، غیرهم پوشان، خنثی) فرگشت سامانه های گسل و حوضه تراکشی را توضیح می دهد. نتایج این پژوهش نشان می دهد الگوی توزیع و تمرکز حداکثر تنش توسط میزان هم پوشانی بین گسل های راستالغز راست گرد در تشکیل حوضه کششی کنترل می شود. یافته های ما نشان می دهند که شکل و تعداد مراکز فرونشست تشکیل شده تحت تأثیر هر دو هندسه پله های گسل و مایل بودن زاویه واگرایی قرار دارند. با کاهش غیرهم پوشانی، از یک پله غیرهم پوشان به یک پله خنثی، مراکز فرونشست دوگانه ادغام می شوند. در مقابل، افزایش هم پوشانی منجر به توسعه یک حوضه تراکشی منفرد با یک فرونشست مرکزی می شود. به طور کلی، مدل های حوضه های تراکشی مراکز فرونشست متصل با اشکال حوضه خاص را نشان می دهند. پله های رهایی خنثی منجر به شکل دوکی یا S باز یا Z شکل شدند، پله های رهایی غیرهم پوشان اشکال لوزی شکل کشیده تا سیگموییدی و پله های رهایی هم پوشان منجر به تشکیل حوضه های ساعت شنی شدند. در نهایت، بر اساس بررسی های هندسه پله های رهایی گسلی در مدلسازی انجام شده، بهترین و مناسب ترین مدل برای حوضه های تراکشی در منطقه زمین ساختی دهشیر-بافت-قم زفره، پله رهایی هم پوشان انتخاب گردید.
- Agard, P., Omrani, J., Jolivet, L., Whitechurch, H., Vrielynck, B., Spakman, W., ... and Wortel, R. 2011. Zagros orogeny: a subduction-dominated process. *Geological Magazine* 148(5-6), 692-725.
- Albertz, M., and Sanz, P. F. 2012. Critical state finite element models of contractional fault-related folding: Part 2. Mechanical analysis. *Tectonophysics* 576, 150-170.
- Asaadi, N., Ribe, N. M., and Sobouti, F. 2011. Inferring nonlinear mantle rheology from the shape of the Hawaiian swell. *Nature* 473(7348), 501-504.
- Atallah, M., Niemi, T. M., and Mustafa, H. 2002. Deformation at a strike-slip, stepover zone along the southeastern margin of the Dead Sea pull-apart basin, Jordan. *EGU Stephan Mueller Special Publication Series* 2, 49-62.
- Aydin, A., Schultz, R.A., 1990. Effect of mechanical interaction on the development of strike-slip faults with echelon patterns. *J. Struct. Geol* 12, 123-129.
- Basile, C., and Brun, J. P. 1999. Transtensional faulting patterns ranging from pull-apart basins to transform continental margins: an experimental investigation. *Journal of Structural Geology*, 21(1), 23-37.
- Ben-Avraham, Z., Lyakhovsky, V., and Schubert, G. 2010. Drop-down formation of deep basins along the Dead Sea and other strike-slip fault systems. *Geophysical Journal International*, 181(1), 185-197.
- Bertoluzza, L., Perotti, C.R., 1997. A finite-element model of the stress field in strike-slip basins: implications for the Permian tectonics of the Southern Alps (Italy). *Tectonophysics* 280, 185



- Mid-Polish Trough. *Basin Research* 19, 67–86.
- Jackson, J. 1992. Partitioning of strike-slip and convergent motion between Eurasia and Arabia in eastern Turkey and the Caucasus. *J. Geophys. Res. Solid Earth* 97, 12471–12479.
- Jackson, J., Priestley, K., Allen, M., and Berberian, M. 2002. Active tectonics of the south Caspian basin. *Geophysical Journal International* 148(2), 214–245.
- Jaeger, J.C., Cook, N.G.W., Zimmerman, R.W., 2007. *Fundamentals of rock mechanics*, Fourth edition. Blackwell, 3–43.
- Javadi, H. R., Esterabi Ashtiani, M., Guest, B., Yassaghi, A., Ghassemi, M. R., Shahpasandzadeh, M., and Naeimi, A. 2015. Tectonic reversal of the western Doruneh fault system: implications for Central Asian tectonics. *Tectonics* 34(10), 2034–2051.
- Joshi, G. R., and Hayashi, D. 2010. Finite element modelling of the pull-apart formation: implication for tectonics of Bengo Co pull-apart basin, southern Tibet. *Natural Science*, 2(06), 654.
- Kase, Y., and Kuge, K. 2001. Rupture propagation beyond fault discontinuities: Significance of fault strike and location. *Geophysical Journal International* 147(2), 330–342.
- Katzman, R., ten Brink, U. S., and Lin, J. 1995. Three-dimensional modeling of pull-apart basins: Implications for the tectonics of the Dead Sea Basin. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 100(B4), 6295–6312.
- Khalatbari Jafari, M., Sepehr, H., and Mobasher, K. 2016. Tectonomagmatic evolution of the south Dehshir ophiolite, Central Iran. *Geological* 197.
- Brankman, C.M., Aydin, A., 2004. Uplift and contractional deformation along a segmented strike-slip fault system: The Gargano Promontory, southern Italy. *J. Struct. Geol.* 26, 807–824.
- Corti, G., Dooley, T.P., 2015. Lithospheric-scale centrifuge models of pull apart basins. *Tectonophysics* 664, 154–163.
- Cunningham, W. D., and Mann, P. 2007. Tectonics of strike-slip restraining and releasing bends. *Geological Society, London, Special Publications* 290(1), 1–12.
- Dawson, P.R. 2000. Computational crystal plasticity. *INT J SOLIDS STRUCT* 37(1-2): 115–130
- Derakhshani, R., and Eslami, S. S. 2011. A new viewpoint for seismotectonic zoning. *Am. J. Environ. Sci* 7, 212–218.
- Dooley, T.P., McClay, K.R., 1997. Analog modelling of strike-slip pull-apart basins. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull* 81, 804–826.
- Dooley, T.P., Monastero, F., Hall, B., McClay, K.R., Whitehouse, P., 2004. Scaled sandbox modelling of transtensional pull-apart basins: applications to the Coso geothermal system. *Geotherm. Res. Counc. Trans* 28, 637–641.
- Dooley, T.P., Schreurs, G., 2012. Analogue modelling of intraplate strike-slip tectonics: a review and new experimental results. *Tectonophysics* 574–575, (1–71).
- Gölke, M., Cloetingh, S., and Fuchs, K. 1994. Finite-element modelling of pull-apart basin formation. *Tectonophysics*, 240(1-4), 45–57.
- Gutowski, J., Koyi, H.A., 2007. Influence of oblique basement strike-slip faults on the Mesozoic evolution of the south-eastern segment of the

- 711-714.
- McClay, K.R., Bonora, M., 2001. Analog models of restraining stepovers in strike-slip fault systems. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull* 85, 233–260.
- Misra, A. A., and Mukherjee, S., 2015. Tectonic inheritance in continental rifts and passive margins pp. 1-86. Berlin: Springer International Publishing.
- Moghadam, H. S., Stern, R. J., and Rahgoshay, M. 2010. The Dehshir ophiolite (central Iran): Geochemical constraints on the origin and evolution of the Inner Zagros ophiolite belt. *Bulletin* 122(9-10), 1516-1547.
- Moghadam, H. S., Li, Q. L., Griffin, W. L., Chiaradia, M., Hoernle, K., O'Reilly, S. Y., et al. 2022. The Middle-Late Cretaceous Zagros ophiolites, Iran: linking of a 3000 km swath of subduction initiation fore-arc lithosphere from Troodos, Cyprus to Oman. *Bulletin* 134, 1414–1442.
- MohammadiNia, A., Rashidi, A., Shafieibafti, S., Mousavi, S. M., Nemati, M., Kianimehr, H., ... and Derakhshani, R. 2024. Unraveling the role of dextral faults in the formation of pull-apart basin structures and their implications on the genesis of ophiolites and pluto-volcanics. *Frontiers in Earth Science* 12, 1399447.
- Mookerjee, M., and Mitra, G. 2009. Understanding kinematic data from the Moine thrust zone in terms of a kinematics-based mathematical model of deforming thrust wedges. *Journal of Structural Geology* 31(12), 1556-1572.
- Naeimi, A. 2015. Tectonic reversal of the western Doruneh fault system: implications for Central Asian tectonics. *Tectonics* 34(10), 2034-2051.
- Magazine, 153(4) 557-577.
- King, G., and Nábělek, J. 1985. Role of fault bends in the initiation and termination of earthquake rupture. *Science*, 228(4702) 984-987.
- Lesueur, M., Poulet, T., and Veveakis, M. 2020. Three-scale multiphysics finite element framework (FE3) modelling fault reactivation. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering* 365, 112988.
- Mahmoud, S., Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Tealeb, A., 2005. GPS evidence for northward motion of the Sinai block: implications for E. Mediterranean tectonics. *Earth and Planetary Science Letters* 238, 217–224.
- Mandal, N. K. 2017. Ratchetting damage of railhead material of gapped rail joints with reference to free rail end effects. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit* 231(2), 211-225.
- Mann P., Hempton M.R., Bradley D.C. and Burke K. - 1983. Development of pull-apart basins. *Journal of Geology* 91 (5), 529-554.
- Mann, P., 2007. Global catalogue, classification and tectonic origins of restraining and releasing bends on active and ancient strike-slip fault systems. In: Cunningham, W.D., Mann, P. (Eds.), *Tectonics of strikeslip restraining and releasing bends*. *Geol. Soc. Lond., Spec. Publ.*, 290, pp. 13–142.
- McClay, K. R., and Buchanan, P. G. 1992. Thrust faults in inverted extensional basins. In *Thrust tectonics* (pp. 93-104). Dordrecht: Springer Netherlands.
- McClay, K. R., and Dooley, T. 1995. Analogue models of pull-apart basins. *Geology*, 23(8),



- G. 2006. GPS constraints on continental deformation in the Africa-Arabia-Eurasia continental collision zone and implications for the dynamics of plate interactions. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 111(B5).
- Rodgers, D. A. 1980. Analysis of pull-apart basin development produced by en echelon strike-slip faults. Sedimentation in oblique-slip mobile zones, 27-41.
- Rivest, L. P. 1989. Spherical regression for concentrated Fisher-von Mises distributions. *The Annals of Statistics* 307-317.
- Sadeghi-Farshbaf, P. 2024. A numerical model of extensional tectonics for estimating the stress required for the collapse of normal fault blocks. *Researches in Earth Sciences*, 15(4), 97-110.
- Sadeghi-Farshbaf, P., Khatib, M. M., and Nazari, H. 2019. Future stress accumulation zones around the main active faults by 3D numerical simulation in East Azerbaijan Province, Iran. *Acta Geodaetica et Geophysica*, 54, 461-481.
- Seed, H. B., Murarka, R., Lysmer, J., and Idriss, I. M. (1976). Relationships of maximum acceleration, maximum velocity, distance from source, and local site conditions for moderately strong earthquakes. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 66(4), 1323-1342
- Shaw, B. E., and Dieterich, J. H. 2007. Probabilities for jumping fault segment stepovers. *Geophysical Research Letters* 34(1).
- Shokri, P., Alavi, S. A., Ghassemi, M. R., and Ganjiani, S. M. 2024. Evolution of the Piranshahr pull-apart basin at releasing stepovers of the strike-slip fault systems Nemčok, M., Henk, A., Gayer, R. A., Vandycke, S., and Hathaway, T. M. 2002. Strike-slip fault bridge fluid pumping mechanism: insights from field-based palaeostress analysis and numerical modelling. *Journal of Structural Geology* 24(12), 1885-1901.
- Nevitt, J.M., Pollard, D.D., Warren, J.M., 2014. Evaluation of transtension and transpression within contractional fault steps: comparing kinematic and mechanical models to field data. *J. Struct. Geol* 60, 55–69.
- Oglesby, D. D. 2005. The dynamics of strike-slip step-overs with linking dip-slip faults. *Bulletin of the Seismological Society of America* 95(5), 1604-1622.
- Pagliaroli, A., Pergalani, F., Ciancimino, A., Chiaradonna, A., Compagnoni, M., de Silva, F., ... and Luzi, L. (2019) Site response analyses for complex geological and morphological conditions: relevant case histories from 3rd level seismic microzonation in Central Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 1-37.
- Peacock, D.C.P., Zhang, X., 1994. Field examples and numerical modelling of oversteps and bends along normal faults in cross-section. *Tectonophysics* 234, 147–167.
- Petrinin, A. G., and Sobolev, S. V. 2008. Three-dimensional numerical models of the evolution of pull-apart basins. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 171(1-4), 387-399.
- Pollard, D.D., Fletcher, R.C., 2005. *Fundamental of structural geology*. Cambridge University Press.
- Reilinger, R., McClusky, S., Vernant, P., Lawrence, S., Ergintav, S., Cakmak, R., ... and Karam,

- California. *Tectonophysics* 719, 37-50.
- Walker, R., and Jackson, J. 2004. Active tectonics and late Cenozoic strain distribution in central and eastern Iran. *Tectonics* 23(5).
- Wesnowsky, S. G. 2006. Predicting the endpoints of earthquake ruptures. *Nature* 444(7117), 358-360.
- Westaway, R. 1995. Deformation around stepovers in strike-slip fault zones. *Journal of Structural Geology* 17(6), 831-846.
- Wdowinski, S., Bock, Y., Baer, G., Prawirodirdjo, L., Bechor, N., Naaman, S., Knafo, R., Forrai, Y., Melzer, Y., 2004. GPS measurements of current crustal movements along the Dead Sea Fault. *Journal of Geophysical Research* 109, B05.
- Wu, J.E., McClay, K.R., Whitehouse, P., Dooley, T.P., 2009. 4D analogue modelling of transtensional pull-apart basins. *Mar. Pet. Geol* 26, 1608–1623.
- Yamani, M., Ghasemmi, M. R., Alavi Panah, S. K., and Goorabi, A. 2010. Morphotectonic of dehshir area using geomorphometric techniques. *Physical Geography Research* 42(71).
- Zanchi, A., Berra, F., Mattei, M., Ghassemi, M. R., and Sabouri, J. 2006. Inversion tectonics in central Alborz, Iran. *Journal of Structural Geology* 28(11), 2023-2037.
- Zwaan, F., Schreurs, G., Naliboff, J., and Buiter, S. J. 2016. Insights into the effects of oblique extension on continental rift interaction from 3D analogue and numerical models. *Tectonophysics*, 693, 239-260.
- in Northwest of Iran: Insights from two-dimensional numerical modeling. *Journal of Mountain Science* 21(12), 4282-4298.
- Shokri, P., Dehbozorgi, M., and Hakimi Asiabar, S. 2020. Recent tectonic activity in Central Alborz Mountain, Iran: morphometric analysis and knickpoint identification. *Journal of Mountain Science* 17(12), 3137-3161.
- Silva, T. A., Gomes, I. F., Miranda, T. S., Correia Filho, O. J., Medeiros, C. E. B., Carvalho, B. R. B. M., ... and amp; Falcão, T. C. 2024. Quantifying damage zones width in strike-slip faults: Insights from a two-dimensional finite-element modeling approach. *Journal of Structural Geology*, 186, 105201.
- Simpson, C., and De Paor, D. G. 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology* 15(1), 1-20.
- Strijker, G., Beekman, F., Bertotti, G., Luthi, S.M., 2013. FEM analysis of deformation localization mechanisms in a 3-D fractured medium under rotating compressive stress orientations. *Tectonophysics* 593, 95–110.
- Ten Brink, U.S., Ben-Avraham, Z., 1989. The anatomy of a pull-apart basin; seismic reflection observations of the Dead Sea Basin. *Tectonics* 8, 333–350
- Turcotte, D.L., Schubert, G., 2014. *Geodynamics*, Third edition. Cambridge University Press.
- van Wijk, J., Axen, G., Abera, R., 2017. Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: implications for opening of the Gulf of California. *Tectonophysics* 719–720 (37-50).
- Van Wijk, J., Axen, G., and Abera, R. 2017. Initiation, evolution and extinction of pull-apart basins: Implications for opening of the Gulf of