



فصلنامه زمین ساخت

تابستان ۱۴۰۲، سال هفتم، شماره ۲۶

doi 10.22077/jt.2025.8288.1190

تأثیر توپوگرافی بر رخنمون گسل هادر پهنه فشارشی و امتداد لغز بر اساس شواهد آزمایشگاهی

زکيه عدالتی پور^{۱*}، سیدسعیدالرضا اسلامی^۲، غلام رضا مقامی مقیم^۳

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد تکتونیک، دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان

۲- استادیار تکتونیک گروه زمین شناسی دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان

۳- دانشیار ژئومورفولوژی گروه جغرافیا دانشکده علوم زمین دانشگاه دامغان

چکیده:

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۱۱/۲۸

در این پژوهش، تأثیر توپوگرافی به عنوان عاملی مؤثر بر مکان یابی و هندسه قطعات گسلی و معماری پهنه های گسلی در شرایط تنش فشارشی و امتداد لغز بررسی شده است. به این منظور، پنج سری آزمایش در پهنه های فشارشی و سه سری آزمایش در پهنه های امتداد لغز با استفاده از مدل های فیزیکی گل رس و دستگاه های شبیه ساز زمین ساختی طراحی و اجرا شد. نتایج نشان داد که تغییرات توپوگرافی، از جمله ارتفاع و موقعیت آن، به طور قابل توجهی بر تمرکز تنش، جهت یابی شکستگی ها، و الگوی دگر ریختی شکننده تأثیر می گذارد. به عنوان نمونه، در آزمایش های فشارشی، ساختارهای سیگموئیدال و شکستگی های کششی در نزدیکی محدوده های مرتفع مشاهده شد، در حالی که در آزمایش های امتداد لغز، توپوگرافی سبب تغییر تنش های محلی و توزیع شکستگی ها در محدوده های تراکشنی و ترفاشی گردید. تحلیل نهایی نشان داد که توپوگرافی، علاوه بر نقش معمول خود به عنوان معلول فعالیت گسل ها، می تواند به عنوان عاملی محیطی در تکامل قطعات گسلی و مهاجرت گسل ها نقش ایفا کند. داده های دقیق تر از جمله تعداد و محل شکستگی ها و الگوی دگر ریختی در آزمایش ها، تغییرات قابل توجهی را در توزیع و جهت شکستگی ها نشان داد. یافته های این پژوهش درک بهتری از تأثیر متقابل عوامل سطحی و نیروهای تکتونیکی بر معماری گسل ها ارائه می دهد و می تواند در پیش بینی الگوهای گسلش و تحلیل زمین لرزه ها مورد استفاده قرار گیرد.

کلیدواژه ها: توپوگرافی، معماری گسل، مهاجرت گسلی، مدل سازی زمین ساختی



The effect of topography on the fault outcrops in the compressive and strike-slip fault zones based on experimental observations

Zakieh Edalatipour¹, S Saeedorreza Eslami², Gholamreza Maghami Moghim³

1- Master's student in Tectonics, School of Earth Sciences, Damghan University

2- Assistant Professor, School of Earth Sciences, Damghan University

3- Associate Professor, School of Earth Sciences, Damghan University

Abstract

In this study, the impact of topography as a significant factor on the localization and geometry of fault segments and the architecture of fault zones under compressive and strike-slip stress conditions was examined. For this purpose, five series of experiments were conducted in compressional zones and three series in strike-slip zones using clay models and tectonic simulation devices. The results showed that topographic variations, including elevation and its position, significantly influenced stress concentration, fracture orientation, and brittle deformation patterns. For instance, in compressive experiments, sigmoid structures and tensile fractures were observed near elevated regions, while in strike-slip experiments, topography caused changes in local stresses and the distribution of fractures in extensional and compressional fault zones. The final analysis revealed that topography, in addition to its usual role as a consequence of fault activity, can act as an environmental factor in the evolution of fault segments and fault migration. More precise data, including the number and location of fractures and deformation patterns in the experiments, revealed significant changes in the distribution and direction of fractures. The findings of this study provide a better understanding of the interaction between surface factors and tectonic forces on fault architecture and can be applied in predicting fault patterns and analyzing earthquakes.

Keywords: Topography, Fault architecture, Fault migration, Tectonic modelling

*Email: zkyh.edlt120@gmail.com

Tel: +989901825066

۱- مقدمه

ساختار و معماری پهنه‌های گسلی، شامل موقعیت مکانی و هندسی قطعات گسلی، تحت تأثیر سه گروه اصلی از عوامل قرار دارد: نخست، نیروهای مؤثر شامل حالت، جهت و شدت تنش‌های وارده؛ دوم، ویژگی‌های فیزیکی توده سنگی که به جنس و خصوصیات پوسته زمین مرتبط است؛ و سوم، شرایط محیطی حاکم که بر تعامل تنش‌ها و توده سنگی تأثیر می‌گذارد. از جمله عوامل مرتبط با شرایط محیطی، موضوع پستی و بلندی‌ها یا توپوگرافیمی باشد و بر این اساس سؤال اصلی تحقیق قابل تعریف می‌شود، بدین ترتیب که آیا توپوگرافی (که خود تا حد زیادی تحت تأثیر فعالیت‌پهنه‌های گسلی می‌باشد)، می‌تواند موقعیت مکانی و هندسی قطعات گسلی و در نتیجه معماری پهنه گسلی را در کنترل داشته باشد؟ اگر پاسخ این پرسش اولیه مشخص شود آنگاه می‌توان در مورد میزانتأثیر توپوگرافی و نیز نسبت تأثیر آن در مقایسه با سایر عوامل پیش‌گفته به تحقیق برخاست. از آنجا که شواهد صحرایی امکان پاسخ به سؤال ابتدایی فوق را فراهم نمی‌سازند، به‌ناچار تلاش گردیده تا با کمک شواهد آزمایشگاهی (غیر متوازن) پاسخ اولیه برای پرسش فوق حاصل گردد. مدل‌سازی تجربیک ابزار اصلی برای آزمون فرضیه‌ها و اعتبارسنجی در تحقیقات زمین‌شناسی است که امکان مشاهده روند تکامل دگر ریختی ساختاری را فراهم می‌کند در مدل‌سازی زمین‌ساختی، با ایجاد مدل‌های ساده‌سازی و مقیاس شده از مواد دارای رفتار مشابه مدل طبیعی، فرایند ایجاد ساختارهای زمین‌شناسی شبیه‌سازی می‌شود و عوامل مؤثر مورد بررسی قرار می‌گیرد (Rosenau et al., 2017). در واقع مدل‌سازی تجربی این امکان را می‌دهد که به آزمایشات تأثیر عواملی که در شکل‌گیری و رشد و تکامل ساختارها مؤثر هست، پرداخته شود. همچنین می‌توان به درک جامع‌تری از موقعیت و روند ساختارها در صورت وجود عوامل سطحی چون توپوگرافیدست‌یافت. یکی از اهداف مطالعات آزمایشی، پیش‌بینی تشکیل موقعیت‌احتمالی ساختاری چون گسل می‌باشد که تحلیل ساختاری در طبیعت بر مبنای نتایج آزمایشگاهی می‌تواند به مدیریت بهتر مخاطرات زمینی چون زمین‌لرزه، زمین‌لغزش، فرونشست‌های تکتونیک و نیز به کشف

ذخایر منابع آب زیرزمینی و منابع معدنی کمک کند. هدف از این تحقیق مشاهده تأثیر توپوگرافی بر معماری و هندسه گسل‌ها در مقیاس رخنمون می‌باشد. سازه‌های برشی ریدل الگوهای گسل رایجی هستند که در پهنه‌های برش‌شناسایی شده و به مراحل جنینی تشکیل گسل مربوط می‌شوند. سازه‌های ریدل شبکه‌ای از نوارهای برشی هستند که معمولاً در مناطق برشی ساده در مراحل اولیه گسل ایجاد می‌شوند. ساختار برشی ریدل که برای اولین بار توسط ریدل در سال ۱۹۲۹ در آزمایش‌های کیک رسی گزارش شد، به‌عنوان یک سازه اساسی در مناطق برشی شناخته شد (Riedel, 1929).

نتایج شبیه‌سازی‌های آزمایشگاهی با استفاده از مدل‌های رسی نشان داده است که چین‌های سطحی ابتدا شکل می‌گیرند و سپس یا همزمان با آن‌ها، انواع گسل‌ها از جمله گسل‌های امتداد لغز مزدوج (ریدل) به وجود می‌آیند. در این شبیه‌سازی‌ها، چین‌خوردگی‌ها در مراحل ابتدایی تغییر شکل ظاهر می‌شوند و با نوارهای لغزش مزدوج، معکوس یا گسلش معمولی همراه هستند. تغییر شکل‌ها ممکن است در هر مرحله متوقف شوند یا این که ادامه یابند تا زمانی که لغزش در امتداد ناحیه پیچشی منجر به تشکیل گسل چرخشی و جدا شدن بخش‌های بریده‌شده از سازه‌های اولیه شود. حرکت مورب بلوک‌های گسل در طرف مقابل گسل چرخشی باعث واگرایی یا همگرایی می‌شود و بر روی سازه‌های کششی و فشاری اثر می‌گذارد، موجب افزایش یا کاهش آن‌ها خواهد شد (wilcox et al., 1973).

در پهنه‌های برشی امتداد لغز، آزمایش‌های تجربی متعددی به بررسی الگوهای پیچیده‌تری پرداخته‌اند که با ساختارهای مشاهده‌شده تطابق دارند. در یکی از تحقیقات آزمایشگاهی، هندسه و تکتونیک سازه‌ها در بخشی از زون گسلی جنوب سان‌آندریاس مورد بررسی قرار گرفت و مکانیسم تغییر شکل زیرزمین به‌وضوح نشان داده شد. این تغییر شکل‌ها می‌توانند با چین‌خوردگی لایه‌های رسوبی بالایی مرتبط باشند در این گزارش مشخص شد که گسل‌های راست‌الغز با شکل نردبانی، باعث ایجاد پهنه‌های ساختاری فشارشی یا کششی در فاصله بین خود می‌شوند. برای درک



بهتر این فرآیندها، مدل سازی های زیادی در زمینه های تراکشی و ترافشارشی انجام گرفت (Sylvester & Smith, 1976).

حسنى آبدرى و اسلامى نتايج مقايسه آزمون هاى فيزيكى با استفاده از خاك رس را گزارش کرده اند كه نشان مى دهد اين آزمون ها از تكرار پذيرى مناسبى برخوردارند. در اين تحقيق نتايج حاصل از تأثير سه عامل متغير مؤثر شامل ضخامت مدل، محتوای آب و نرخ جابجایی بر تكامل نواحى لغزش ارائه شده است. مقايسه نتايج برای آزمون هاى پايه نشان داد كه افزايش ضخامت، چنين تغيير شامل تاخير در حد گسيختگى گسل آزمون هاى، کاهش حداكثر جابه جايى سطحى گسل و کاهش تراكم گسل تجمعى در پوشش رسوبى را در تكامل پهنه هاى امتداد لغز برجسته مى كند، با توجه به آزمون تغيير رفتار مدل (افزايش محتوای آب)، نتايج به دست آمده در طى مقايسه با نتايج آزمون هاى پايه نشان داد كه اين عامل متغير باعث افزايش حداكثر جابه جايى گسل ها و تراكم گسل ها مى شود، اما تأثيرى بر زمان رخنمون گسل آزمون هاى ندارد. کاهش نرخ جابجايى دستگاه باعث تاخير در زمان رخنمون گسل آزمون هاى نسبت به دو آزمون ديگر و همچنين افزايش تراكم قطعات گسل در پوشش رسوبى پسته گردید. شباهت نتايج تجربى فوق و نمونه هاى طبيعى در مقیاس هاى مختلف مشاهدات مانند: ترك ها و گسيختگى هاى سيگمويدي، پهنه گسل امتداد لغز بر روى نقشه نيز نشان داده شده است. همان طور كه در اين تحقيق و همچنين تحقيقات گذشته نشان داده شده است، مدل هاى تجربى ساخته شده با خاك رس مرطوب رفتارى مشابه پسته زمين از خود نشان مى دهند، بنابراين مى توان از مدل رسوبى نشان دادن چگونگى تغيير شكل هاى طبيعى در پسته استفاده كرد (حسنى آبدريو اسلامى، ۱۴۰۲). در يك تحقيق كه در سال ۲۰۱۳ منتشر شد، تفاوت هاى تخمين نرخ لغزش گسل ها در جنوب كاليفرنيا بررسى گردید. اين مطالعه نشان داد كه مدل هاى كينماتيكي كه اثرات جريان پس از زلزله را در نظر مى گيرند، مى توانند نرخ لغزش هاى فعلی را به طور دقيق تری توضیح دهند. همچنين اين تحقيق تفاوت هاى موجود در نرخ لغزش گسل ها را بين مدل هاى ژئودتيكى و زمين شناسى بررسى کرده و

اهميت مدل هاى ويسكوالاستيك در اين زمينه را مورد تأكيد قرار داد (Johnson, 2013). در سال ۲۰۱۶، تحقيقى برای بررسى تأثيرات توپوگرافى بر توسعه گسل هاى امتداد لغز با استفاده از مدل سازی آنالوگ انجام شد. نتايج اين تحقيق نشان داد كه تغييرات توپوگرافى تأثير زيادى بر رفتار گسل ها و الگوهاى گسل بندى دارند. مدل ها نشان دادند كه در نواحى مسطح، يك سيستم گسلى ريديل شكل مى گيرد، در حالى كه در مناطق با توپوگرافى بالاتر، گسل اصلى تنها در مراحل پايانى آزمون ها از روى پله ها عبور مى كند. اين نتايج نشان دهنده اهميت تغييرات مورفولوژيكي در كنترل توسعه گسل هاى امتداد لغز و تأثير آنها بر تمرکز كرنش و لرزه خيزى است. (Tomas et al., 2016).

Zeng و Shen مقاله اى منتشر كردند كه به تخمين نرخ لغزش گسل ها در كاليفرنيا پرداخته است. اين مطالعه با استفاده از داده هاى GPS و مدل هاى زمين ساختى، تفاوت هاى قابل توجهى در نرخ لغزش گسل ها را در مناطق مختلف كاليفرنيا نشان مى دهد. اين تفاوت ها مى تواند تحت تأثير هندسه هاى مختلف گسل هاى UCERF3 و اثرات توپوگرافى باشد (Zeng & Shen, 2016).

Omosanya و همكاران با استفاده از داده هاى سه بعدى لرزه اى با كيفيت بالا وقوع گسل هاى امتداد لغز را در منطقه گرین سوان، غرب بارنتس سى، بررسى كردند. اين مطالعه نشان مى دهد كه گسل هاى امتداد لغز در اين منطقه تحت شرايط گسترشى از اواخر ژوراسيك تا اوایل کرتاسه توسعه یافته و در دوران کرتاسه ميانه دوباره فعال شده اند. گسل هاى اصلى چپ گرد در گرین سوان با حركت چپ گرد در سطح كم عمق به يكديگر پيوند خورده اند. نتايج اين مطالعه نشان دهنده تعامل گسل هاى امتداد لغز با گسلش پس لرزه اى و تغييرات ساختارى در اين ناحيه تحت تأثير فرآيندهاى تكتونيكي منطقه اى و هالوكينيزيس هستند (Omosanya et al., 2017).

Wang و همكاران از روش تفاضل محدود شبكه منحنى برای بررسى تأثير توپوگرافى نامنظم محلى بر فرآيند شكست ديناميكي گسل امتداد لغز عمودى و توزيع حركات زمين استفاده كرد. نتايج نشان داد كه مقیاس و ارتفاع توپوگرافى تأثير زيادى بر روند گسترش شكست

بالکان در جنوب شرقی اروپا تطبیق داده و تأثیرات کرنش در این مناطق را تحلیل کرده است (Krstekanić et al., 2021).

مطالعات قبلی نشان می‌دهند که ارزیابی دقیق‌تر آسیب‌ها و تغییرات توپوگرافی در مناطق زلزله‌خیز، نیازمند توجه ویژه به مدل‌های زمین‌شناسی و ژئودتیکی است. این مطالعات به ما نشان داده‌اند که تعامل پیچیده گسل‌ها و تأثیرات توپوگرافی بر رخنمون گسل‌ها در پهنه‌های فشارشی و امتدادلغز چگونه می‌تواند بر الگوهای تشکیل و تکامل گسل‌ها تأثیر بگذارد. با توجه به این اهمیت، پژوهش حاضر به دنبال بررسی تأثیر توپوگرافی بر رخنمون گسل‌ها در این پهنه‌ها است، که با استفاده از شواهد آزمایشگاهی به تحلیل آن می‌پردازد. این پژوهش به دنبال آن است که مشخص کند چگونه تغییرات توپوگرافی، به‌ویژه در محیط‌های تکنیکی فشارشی و امتدادلغز، می‌توانند بر الگوهای تشکیل و تکامل گسل‌ها تأثیر بگذارند. همچنین، هدف از این پژوهش این است که با تکیه بر داده‌های حاصل از آزمایش‌های فیزیکی، ارتباط میان شکل‌گیری توپوگرافی و عملکرد گسل‌ها را در شرایط مختلف فشارشی و امتدادلغز تحلیل و مدل‌سازی کرده تا به درک بهتری از رفتار زمین‌ساختی این پهنه‌ها برسیم.

۲- روش انجام آزمایش‌ها

برای آنکه درک مناسبی از چگونگی تأثیر عامل سطحی توپوگرافی بر رخنمون گسل‌ها در شرایط تنش فشارشی ایجاد شود، ۵ سری آزمایش مختلف طراحی و انجام پذیرفت. در شکل (۱) تجهیزات مورد استفاده در شبیه‌ساز حرکت تراکمی - کششی و نیز شبیه‌ساز حرکت برشی نشان داده شده است. طراحی بدین صورت است که نمونه به ابعاد ۳۰ در ۴۰ سانتی‌متر و ارتفاع ۵ سانتی‌متر تهیه شد. سپس نمونه در جعبه دستگاه قرار داده شد و تنش فشارشی دوطرفه با نرخ متوسط به نمونه وارد گردید تا زمانی که همگرایی به ۵/۰ درصد رسید. در سطح نمونه مارکرهایی قرار داده شد تا کرنش شکل‌پذیر قبل از ایجاد اولین شکستگی بررسی گردد.

و توزیع حرکات زمین دارد. توپوگرافی کوهستانی مانع از ایجاد فوق-شیب ناشی از سطح آزاد می‌شود و تأثیر مهمی در فرآیند شکست و حرکت زمین ایجاد می‌کند. این مطالعه به نقش مهم تنش اولیه بر توزیع حرکات زمین و وقوع فوق‌شیب پرداخته است (Wang et al., 2018).

Visage و همکاران با استفاده از مدل‌سازی آنالوگ، اثرات هندسه و فرآیندهای کینماتیکی بر توسعه تغییرات خارج از گسل‌ها بررسی کرد. این مطالعه نشان داد که با افزایش تجمع تغییر شکل‌ها، منطقه‌های تغییر شکله تدریج در اطراف گسل‌ها به وجود می‌آید، که این موضوع می‌تواند به عنوان تغییر شکل‌های فرعی (OFD) شناخته شود. این مطالعه همچنین نشان داد که این تغییر شکل‌ها ابتدا به صورت تغییر شکل‌های گسترده و پراکنده ظاهر می‌شوند و با حرکت گسل‌ها و ایجاد سامانه‌های گسلی جایگزین، می‌توانند مجدداً فعال شوند (Visage et al., 2023).

Langer و همکاران با استفاده از یک مدل پیشرفته برای تحلیل داده‌های GPS و مشاهدات زمین‌شناسی در مناطق زلزله‌خیز شیلی و نپال، تأثیر توپوگرافی بر برآوردهای لغزش در زمین‌لرزه‌ها را موردبررسی قرار دادند. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که توپوگرافی، مانند شیب‌ها و ارتفاعات، تأثیر قابل توجهی بر تخمین لغزش‌ها دارد. به‌ویژه در نواحی با شیب‌های شدید، اثرات توپوگرافی بر مدل‌های لغزش بیشتر می‌شود، و در این مناطق نیاز به اصلاحات پیچیده‌تری برای مدل‌های لغزش وجود دارد. این تحقیق نشان می‌دهد که برای بهبود مدل‌های پیش‌بینی لغزش در زمین‌لرزه‌ها، باید اثرات توپوگرافی به‌طور دقیق در نظر گرفته شود (Langer et al., 2020). Krstekanić و همکاران با استفاده از مدل‌سازی آنالوگ در مقیاس پوسته‌ای، تأثیر هندسه پیش‌رونده‌ها^۱ و فرآیندهای کینماتیکی بر تقسیم‌بندی کرنش و انتقال تغییر شکل از گسل‌های امتدادلغز به مناطق تراست و کششی را بررسی کردند. نتایج آن‌ها نشان داد که هندسه پیش‌رونده‌ها عامل اصلی در کنترل انتقال کرنش و شکل‌گیری حوضه‌های کششی است. این مطالعه ارتباط این الگوها را با سامانه گسلی کارپاتو-



جمع آوری شده از شواهد آزمایشگاهی در شکل (۲) ارائه شده است. آزمایش اول به عنوان آزمایش پایه بدون وجود توپوگرافی طراحی و انجام شد. در سطح نمونه مارکرهایی قرار داده شد تا کرنش شکل پذیر قبل از ایجاد اولین شکستگی بررسی گردد. کرنش شکل پذیر نشان داد، تمرکز تنش ها در بخش میانی نمونه بیشتر و در اطراف تنش به صورت تالامدگی خود را نشان دادند. سپس با ایجاد اولین کرنش شکننده به بررسی شکستگی ها در نمای نقشه پرداخته شد. همان طور در تصاویر ردیف اول شکل مشاهده می شود، تمرکز شکستگی های فشارشی در بخش میانی مدل دیده می شود و شکستگی های کششی در دو طرف نمونه و در مراحل پایانی نمود بیشتر دارد.

آزمایش دوم با دو متغیر وجود توپوگرافی مایل برجهت همگرایی و تنش یک طرف از سمت راست تصویر نمای سطح طراحی انجام شد. همان طور که در تصاویر ردیف دوم شکل (۲) مشاهده می شود در این شرایط، در بخش مرتفع از قبل تعبیه شده، شکستگی وجود ندارد و بخش مرتفع همانند جسم صلب عمل نموده و تنش بسیار کمی را متحمل شده و دگر ریختی شکننده به اطراف منتشر گردیده است که با نتایج به دست آمده از آزمایش شبیه سازی برخورد با جسم صلب در آسیای شرقی که توسط تاپونیر و همکاران^۲ (۱۹۸۲) انجام گرفت مطابقت دارد و نکته قابل توجه دیگری که قابل مشاهده است این است که امتداد شکستگی های فشارشی در نزدیکی مرز محدوده مرتفع از قبل تعبیه شده به صورت مایل ایجاد شدند. نمونه طبیعی آن را در می توان در گسل های ترانسفورم اقیانوسی دید (Tapponnier et al., 1982). شاید بتوان این طور تحلیل کرد محدوده مرتفع از قبل تعبیه شده سبب تغییر در تنش های اصلی می شود که با نتایج تحقیق رستمیان و همکاران (۱۳۹۳) مطابقت دارد. ایشان در پژوهشی مشابه اثرات ناپیوستگی های موجود بر مکان و هندسه سازه ها را به صورت تجربی مورد بررسی قرار دادند و بر اساس نتایج به دست آمده مشاهده کردند، یکی از عوامل اصلی تأثیر گذار بر حرکت و هندسه سازه ها، ناپیوستگی های از پیش موجود است. بنابراین، هندسه



(الف)



(ب)

شکل (۱). تجهیزات مورد استفاده در طراحی آزمایش ها الف: دستگاه، شبیه ساز حرکت تراکمی - کششی ب: دستگاه شبیه ساز حرکت برشی (امتداد لغز)

در مجموع ۵ آزمایش مختلف طراحی و انجام شد که مشخصات آن در جدول (۱) ارائه شده است. عواملی چون جنس، ابعاد نمونه، همگن، نوع تنش، نرخ تنش در ۵ آزمایش ثابت و توپوگرافی در جهات مختلف و نیز تنش یک طرفه متغیر در نظر گرفته شد. جدول (۱). مشخصات آزمایش های طراحی شده در پژوهش

شماره آزمایش	تعداد متغیر مستقل	متغیرهای مستقل
۱	۰	آزمایش پایه بدون وجود توپوگرافی
۲	۲	وجود توپوگرافی مایل بر جهت همگرایی و تنش یک طرفه
۳	۱	وجود بخش مرتفع مایل بر جهت همگرایی
۴	۱	تغییر روند بخش مرتفع به موازات جهت همگرایی
۵	۱	تغییر روند بخش مرتفع عمود بر جهت همگرایی

۳- بحث

همان طور که اشاره شد به منظور رسیدن به درکی از چگونگی تأثیر عامل سطحی توپوگرافی بر رخنمون گسل ها در شرایط تنش فشارشی به طراحی و انجام ۵ آزمایش انجامید. که خلاصه ای از تصاویر

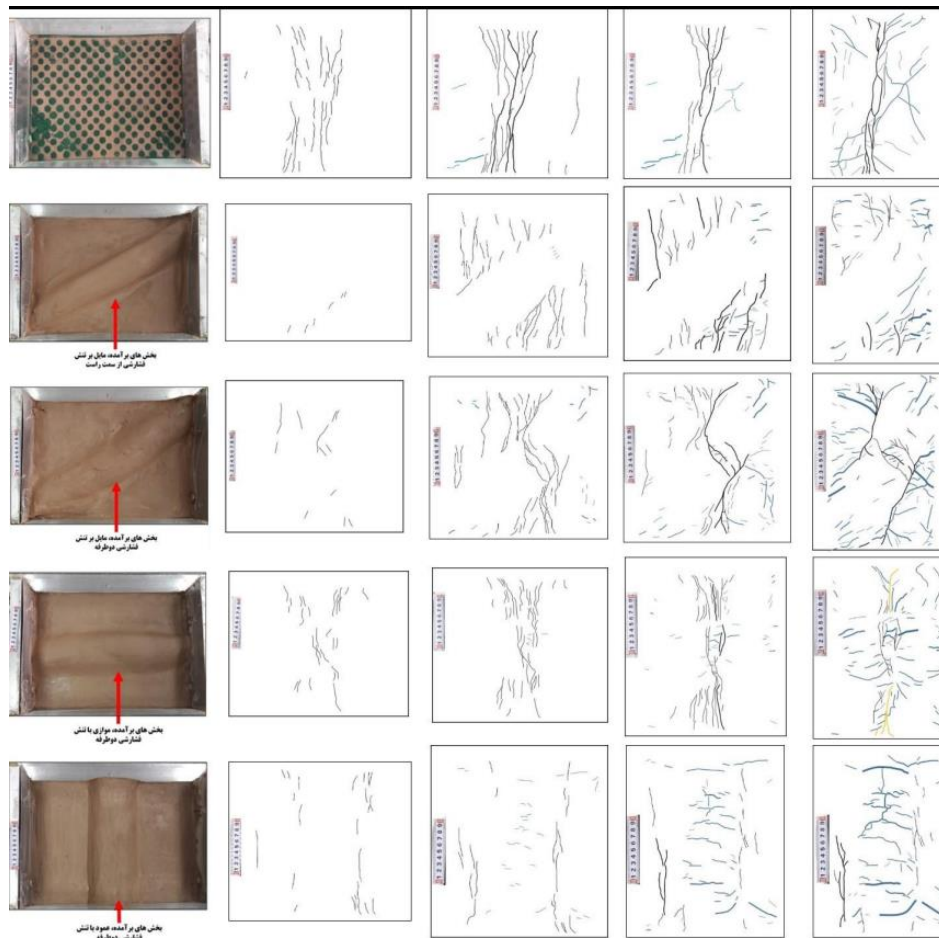


راندگی دو طرف نمونه به همدیگر؛ به‌طور محلی تنش کششی غالب بر تنش فشارشی شده و گسل‌ها تغییر مکانیسم‌دادند و تبدیل به گسل‌های نرمال شدند و این حد نهایی تحمل فشارشی است. در طبیعت نیز شاهد این نوع گسل‌ها هستیم.

آزمایش پنجم با تغییر روند بخش مرتفع عمود بر جهت همگرایی انجام شد. تصاویر ردیف پنجم شکل ۱ مربوط به این آزمایش است در این آزمایش مشابه سایر آزمایش‌ها پس از بالا آمدگی هادگر ریختی شکننده با شروع شکستگی‌های فشارشی در سطح آغاز گردید. شکستگی‌های فشارشی در دو طرف محدوده مرتفع از قبل تعبیه‌شده، ایجاد شده و رشد کردند و در نهایت پس از برخورد با محدوده مرتفع از قبل تعبیه‌شده، متوقف شدند و به شدت شکستگی‌های کششی بخش مرتفع از قبل تعبیه‌شده افزوده شده است. در کل نمونه سه بالا آمدگی در سطح دیده می‌شود. بخش مرتفع میانی بر اثر چین‌خوردگی و دوبالا آمدگی دو طرف نمونه بر اثر دوبلکس‌های راندگی است. برخلاف آزمایش شماره ۴، تغییر مکانیسم در گسل‌های فشارشی در زمان برخورد با محدوده مرتفع از قبل موجود ایجاد نشد بلکه راندگی‌های نسل جدید ادامه یافتند و به حد نهایی تحمل فشارشی نرسیدند. همچنین به‌منظور شبیه‌سازی و مقایسه شرایط فوق، ۳ آزمایش در پهنه امتداد لغز نیز تکرار شد تا نتایج کامل‌تری حاصل شود. ابعاد، جنس، همگنی و نرخ تنش در این مدل‌ها ثابت و مشابه آزمایش‌های پهنه‌ی فشارشی در نظر گرفته شد. تنها عامل متغیر در آزمایش‌های پهنه‌ی امتداد لغزی، موقعیت قرارگیری محدوده مرتفع می‌باشد که با دو زاویه ۴۵ درجه مخالف هم نسبت به زون برشی تعبیه شدند (تصاویر سمت چپ شکل ۳).

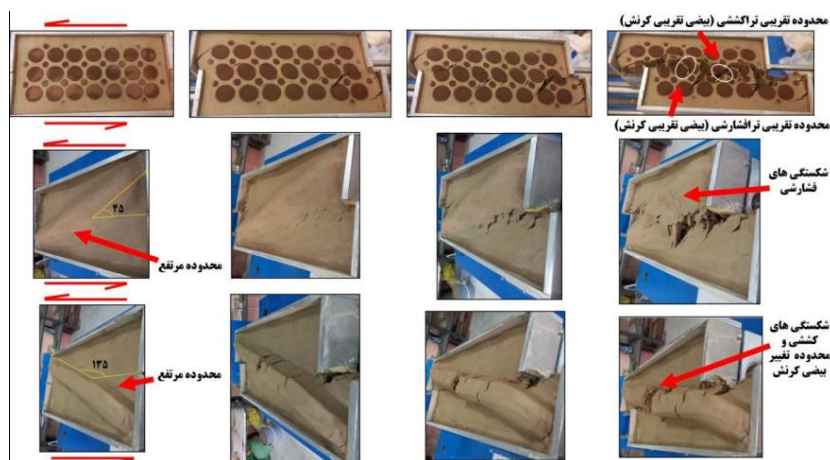
در آزمایش اول (تصاویر ردیف اول از شکل ۳) آزمایش بدون محدوده مرتفع انجام شد. در این آزمایش شاهد شکستگی‌های ریدل و آنتی‌ریدل و همچنین محدوده‌های ترافشارشی و تراکششی محلی که در فواصل بین شکستگی‌های ایجاد شده، هستیم. آزمایش دوم (تصاویر ردیف دوم از شکل ۳) محدوده مرتفع با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جهت برش چپ‌گرد تعبیه شد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود رخنمون شکستگی‌های پهنه برشی با رسیدن به محدوده مرتفع

اینناپیوستگی‌ها با توجه به جهت تنش باعث ایجاد شرایط گوناگونی در سینماتیک توده سنگ و سپس هندسه ساختار نهایی می‌شود (رستمیان و همکاران، ۱۳۹۵). آزمایش سوم با یک متغیر نسبت به آزمایش پایه که وجود بخش مرتفع مایل بر جهت همگرایی است، طراحی و انجام شد. در تصاویر ردیف سوم شکل (۲) مشاهده می‌شود با تمرکز دگر ریختی در بخش میانی نمونه حتی در بخش‌های مرتفع از قبل تعبیه‌شده، ساختارها شکل گرفتند. این حالت مشابه آزمایش پایه است با این تفاوت که روند شکستگی‌ها در نزدیکی بخش مرتفع از قبل تعبیه‌شده تغییر یافته و نسبت به آن مایل شدند. این تمایل روند ساختارها به بخش مرتفع در دو طرف آن حالت معکوس دارند و یک حالت سیگموئیدال را در مقیاس بزرگ ایجاد کردند که یک حالت چرخشی به بخش میانی مدل داده است. دو گسل اصلی در طرف محدوده مرتفع از قبل تعبیه‌شده شکل گرفته که توسط پهنه گسلی بخش میانی از محدوده مرتفع از قبل موجود به هم متصل هستند و دو پایانه آن متفاوت است. پایانه شمالی تصویر فشارشی (دوبلکس‌های راندگی) و پایانه جنوب تصویر کششی (اختلاف ارتفاع بیشتر و شکستگی‌های کششی) است. در نهایت شاهد افزایش تراکم شکستگی‌های کششی هستیم که کشش سطحی ناشی از افزایش ارتفاع سبب ایجاد شکستگی‌های کششی شده است. آزمایش چهارم با تغییر روند بخش مرتفع به موازات جهت همگرایی تکرار شد. تصاویر ردیف چهارم شکل (۲) مربوط به این آزمایش است. این آزمایش شباهت زیادی به آزمایش پایه دارد با این تفاوت که یک مقدار تمایل روند ساختارها به سمت بخش مرتفع از قبل تعبیه‌شده مشاهده می‌شود. نکته قابل توجه در این آزمایش این است که دگر ریختیر خلافاً آزمایش‌های ۲ و ۳ در بخش مرتفع از قبل موجود تمرکز یافته است که نشان می‌دهد در این آزمایش بخش مرتفع از قبل موجود به‌صورت جسم صلب عمل نکرده بلکه خود مقدم بر دریافت تنش‌های اعمالی بوده است. شاهد آن می‌تواند پدیدار شدن اولین شکستگی‌های مزدوج کششی در بخش میانی محدوده مرتفع از قبل موجود بعد از شکستگی‌های فشارشی بخش میانی نمونه باشد. در مراحل پایانی، با برخورد محدوده‌های دوبلکس‌های



تکامل دگرریختی در روند همگرایی

شکل (۲). خلاصه‌ای از مجموع تصاویر ۵ آزمایش انجام‌شده در پهنه فشارشی. از سمت چپ به راست روند تکامل رخنمون شکستگی‌ها را نشان می‌دهد



شکل (۳). خلاصه‌ای از مجموع تصاویر ۳ آزمایش انجام‌شده در پهنه امتداد لغز. از سمت چپ به راست روند تکامل رخنمون شکستگی‌ها را نشان می‌دهد.

محیطی حاکم بر تقابل نیروی درونی‌پسته باشد. با توجه به مفهوم مهاجرت گسلی در پهنه‌های مختلف، می‌توان توپوگرافی را عاملی مؤثر در شکل‌گیری قطعات جدید گسلی و تحولات آن‌ها در طول تکامل پهنه‌های گسلی دانست. این فرآیند نشان می‌دهد که مهاجرت گسلی در مقیاس قطعات گسل به‌طور خاص تحت تأثیر شرایط محیطی منحصربه‌فرد هر قطعه قرار دارد. در نتیجه، برای درک بهتر مهاجرت گسلی، ضروری است که مسیر استنتاج بر اساس اصول کلی پذیرفته‌شده در این زمینه دنبال شود. یافته‌های این تحقیق نیز نشان می‌دهد که توپوگرافی در شکل‌گیری قطعات جدید گسلی و تغییرات آن‌ها نقش کلیدی ایفا می‌کند، که با نظریات قبلی (Berberian & Yeats, 1999) و (اسلامیو خطیب، ۱۳۸۵) مبنی بر تأثیر شرایط محیطی خاص قطعات گسل بر مهاجرت گسلی هم‌راستا است. برای درک جامع‌تر فرآیند مهاجرت گسلی و تکامل پهنه‌های گسلی، توجه به اصول کلی پذیرفته‌شده و تحلیل دقیق آن‌ها امری ضروری است.

مراجع

- Berberian, M., & Yeats, R. S., 1999, Patterns of Historical Earthquake Rupture in the Iranian Plateau. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 89(1). https://doi.org/10.1785/bssa08_90_010120
- Johnson, K. M., 2013, Slip rates and off-fault deformation in Southern California inferred from GPS data and models. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 118(10). <https://doi.org/10.1002/jgrb.50365>
- Krštekanić, N., Willingshofer, E., Broerse, T., Matenco, L., Toljić, M., & Stojadinovic, U. 2021, Analogue modelling of strain partitioning along a curved strike-slip fault system during backarc-convex orocline formation: Implications for the Cerna-Timok fault system of the Carpatho-Balkanides. *Journal of Structural Geology*, 149. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2021.104386>
- Langer, L., Ragon, T., Sladen, A., & Tromp, J., 2020,.

متوقف شدند و رخنمون شکستگی‌های در بخشی از محدوده مرتفع که در مسیر پهنه برشی واقع شده است به‌صورت شکستگی‌های فشارشی نمایان شدند و این شاهد ساختاری نشان‌دهنده توزیع تنش ترا فشارشی در محدوده مرتفع واقع بر پهنه‌ی برشی است. آزمایش سوم (تصاویر ردیف سوم از شکل ۳) محدوده مرتفع با زاویه ۱۳۵ درجه نسبت به جهت برش چپ‌گرد تعبیه شد. همان‌طور که در تصویر مشاهده می‌شود، چون مساحت بیشتری از محدوده مرتفع بر روی پهنه برشی واقع شده است،

رخنمون شکستگی‌های نیز به محدوده مرتفع نفوذ کردند با این تفاوت نسبت به آزمایش اول که تراکم آن‌ها بسیار کمتر و فقط شکستگی‌های کششی رخنمون یافتند. نکته بسیار قابل توجه در این آزمایش این است که محدوده ترا فشارشی در دو آزمایش قبلی تبدیل به محدوده ترا کششی شد که نشان می‌دهد موقعیت و جهت‌افتنگی توپوگرافی (مثبت یا منفی) چقدر می‌تواند مؤثر باشد که حتی تنش محلی را تحت تأثیر خود قرار داد و امکان پیش‌بینی‌های دور از انتظار را برای ما فراهم کند

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق تلاش گردید تا با کمک از شواهد آزمایشگاهی به این پرسش اولیه پاسخ داده شود که آیا ممکن است توپوگرافی که خود معلول فعالیت گسل‌ها در سطح زمین می‌باشد، به‌عنوان عاملی مؤثر بر مکان و هندسه قطعات گسلی و در نتیجه معماری پهنه گسلی نقش ایفا نماید. تحلیل نتایج در شرایط بزرگنمایی نقش توپوگرافی، نشان داد که پستی و بلندی‌ها و نحوه توزیع آن‌ها نسبت به رژیم‌های فشارشی و امتداد لغز و جهت تنش‌های جاری در پوسته، می‌توانند عواملی مؤثر در معماری پهنه‌های گسلی باشند.

بر اساس این نتایج و در یک تحلیل منطقی می‌توان نتیجه گرفت که شکل‌گیری ساختارهای دوپلکس در عمق و سطح، طرح‌هایی هم‌بافته در سطح، ساختارهای گلی مثبت و منفی و مانند آن‌ها، پس از تأثیرپذیری از عوامل مرتبط با نیروهای وارده (و جابجایی‌های رخ داده بر روی قطعات گسلی) و نیز عوامل مرتبط با ویژگی‌های فیزیکی پوسته، تا حد قابل قبولی می‌تواند تحت تأثیر توپوگرافی به‌عنوان یکی از عوامل مرتبط با شرایط

- to.2023.229704
- Wang, M., Zheng, A., Yu, X., & Zhang, W. ,2018, Study on the influence of local mountainous topography to fault dynamic rupture. *Acta Seismologica Sinica*, 40(6). [https://doi.org/ 10.11939/jass.20180022](https://doi.org/10.11939/jass.20180022)
- wilcox, R. E., Harding, T. P., & Seely, D. R. ,1973, Basic Wrench Tectonics . *American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 57(1). [https:// doi . org/10.1306/819a424a-16c5-11d7-8645000102c1865d](https://doi.org/10.1306/819a424a-16c5-11d7-8645000102c1865d)
- Zeng, Y., & Shen, Z. K. ,2016, A fault-based model for crustal deformation, fault slip rates, and off-fault strain rate in California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 106(2), 766–78 4. <https://doi.org/10.1785/0120140250>
- اسلامی، س. س. و خطیب، م. ،۱۳۸۵، مهاجرت گسل در پهنه‌های گسلی امتدادلغز؛ مطالعه موردی: پهنه گسلی فعال اردکول - خاور ایران. *فصلنامه علوم زمین*، ۱۶، ۱۳۸-۱۵۷.
- حسینی آبدری، و. و، اسلامی، س. س. ،۱۴۰۲، معیاربندی نتایج مدلسازی آزمایشگاهی در تحقیقات زمین‌ساختی. *دانشگاه دامغان*.
- رستمیان، م. و، اسلامی، س. س. و نوری، م. و محمدی، ل. ،۱۳۹۵، سطح ناپیوستگی قدیمی: عاملی اثرگذار بر موقعیت مکانی و هندسی ساختارها. *ماهنامه علوم زمین و معدن*، ۱۲۷، ۱۶.
- Impact of topography on earthquake static slip estimates. *Tectonophysics*, 791. [https://doi.org/ 10.1016/j.tecto.2020.228566](https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228566)
- Omosanya, K. O., Zervas, I., Mattos, N. H., Alves, T. M., Johansen, S. E., & Marfo, G. ,2017, Strike-Slip Tectonics in the SW Barents Sea During North Atlantic Rifting (Swaen Graben, Northern Norway). *Tectonics*, 36(11). [https:// doi.org/ 10.1002/2017TC004635](https://doi.org/10.1002/2017TC004635)
- Riedel, W. ,1929, Zur Mechanik geologischer Brucherscheinungen. *Zentralblatt Für Mineralogie, Geologie, Und Paleontologie, B*.
- Rosenau, M., Leever, K., & Oncken, O. ,2017, Experimental Tectonics: Convergent Plate Margins. In *Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences*. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.09497-5>
- Sylvester, A. G., & Smith, R. R. (1976). Tectonic Transpression and Basement Controlled Deformation in San Andreas Fault Zone, Salton Trough, California. *AAPG Bulletin (American Association of Petroleum Geologists)*, 60(12). <https://doi.org/10.1306/c1ea3a73-16c9-11d7-8645000102c1865d>
- Tapponnier, P., Peltzer, G., Le Dain, A. Y., Armijo, R., & Cobbold, P. ,1982, Propagating extrusion tectonics in Asia: new insights from simple experiments with plasticine. *Geology*, 10(12). [https://doi.org/10.1130/0091-7613 \(1982\)10<611::PETIAN>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1982)10<611::PETIAN>2.0.CO;2)
- Tomas, R., Duarte, J., Rosas, F., Schellart, W., & Strak, V. (2016). Analogue modelling of the effect of topographic steps in the development of strike-slip faults.
- Visage, S., Souloumiac, P., Cubas, N., Maillot, B., Antoine, S., Delorme, A., & Klinger, Y.,2023, Evolution of the off-fault deformation of strike-slip faults in a sand-box experiment. *Tectonophysics*, 847. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.229704>