

## مطالعه عددی اندرکنش تونل‌های زیرزمینی با گسل نرمال

صادق قوامی جمال\*، دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشکده مهندسی عمران،

دانشگاه علم و صنعت ایران

علیرضا سعیدی عزیزکندی، استادیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

محمد حسن بازیار، استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

حمید جهان بخش، دانشجوی دکتری راه و ترابری، دانشگاه صنعتی امیرکبیر

Email: s\_ghavamijamal@civileng.iust.ac.ir

دریافت: ۱۳۹۸/۰۶/۲۸ - پذیرش: ۱۳۹۸/۰۸/۲۸

### چکیده

در بسیاری از موارد، تونل‌ها به عنوان زیرساخت‌های حیاتی در حمل‌ونقل شهری در مناطق لرزه‌خیز و در مجاورت گسل‌ها احداث می‌شوند. در هنگام وقوع زلزله، در اثر جابجایی تفاضلی طرفین گسل، سطح زمین دچار گسیختگی شده و می‌تواند به سازه‌های زیرسطحی در مجاورت گسل خسارات جدی وارد سازد. بررسی زلزله‌های گذشته مانند زلزله‌های ترکیه و تایوان در سال ۱۹۹۹ نشان می‌دهد که با اجتناب از ساخت و ساز در پهنه‌ی گسل نمی‌توان به‌طور کامل سازه‌ها را از تهدیدات ناشی از گسلش در امان داشت. بنابراین، درک درست مکانیزم‌های موجود در فرایند انتشار گسلش و اندرکنش آن با سازه‌های زیرسطحی می‌تواند در طراحی منطقی و کاهش خطرات ناشی از گسلش راهگشا باشد. در این تحقیق، پس از صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی المان محدود ABAQUS با نتایج مدل فیزیکی، به مطالعه اندرکنش گسل نرمال با تونل‌های زیرزمینی پرداخته می‌شود. تأثیر پارامترهای مختلف مانند موقعیت تونل نسبت به مسیر گسلش در حالت آزاد، عمق تونل، صلبیت تونل و زاویه گسل بر اندرکنش گسل و تونل بررسی می‌گردد. نتایج نشان می‌دهد که قرارگیری تونل در ناحیه برشی در خاک موجب انحراف مسیر گسلش می‌شود و مشخص شد که عمق مدفون تونل و قطر آن از پارامترهای مؤثر در گسترش ناحیه برشی در گسلش نرمال در خاک و تغییر شکل سطحی زمین است. مقایسه نتایج عددی بیانگر این است که میزان تغییر مکان سطحی در حالت گسل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به حالت ۶۰ درجه بیشتر است.

واژه‌های کلیدی: گسل نرمال، تونل‌های زیرزمینی، اندرکنش، مدل‌سازی عددی

### ۱. مقدمه

به عنوان زیرساخت‌های حیاتی زیرزمینی از جمله راهکارهای حل مشکلات ترافیکی و استفاده بهینه از زمین است. در بسیاری از موارد، تونل‌های زیرزمینی در

در شهرهای پرجمعیت، با افزایش تقاضای سفرهای درون شهری و افزایش حجم تردد خودروها، استفاده از تونل‌ها

است. بررسی‌های میدانی در زمینه پدیده گسلش نشان می‌دهد که فاکتورهای اصلی کنترل‌کننده خصوصیات عمومی گسلش سطحی عبارتند از: (۱) نوع حرکت گسل (نرمال، معکوس و امتداد لغز)، (۲) شیب صفحه گسل، (۳) مقدار جابجایی گسل، (۴) عمق و هندسه مصالح روی گسل و (۵) ماهیت مصالح موجود (بری، ۲۰۰۱). لین و همکاران (۲۰۰۷) به بررسی اندرکنش گسل معکوس با زاویه ۶۰ درجه و تونل با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی Ig و شبیه‌سازی عددی پرداخته‌اند. نتایج این تحقیقات حاکی از آن است که اگر تونل در محل فرودیواره (مصالح واقع بر زیر صفحه گسل) قرار گیرد آسیب‌ها حداقل بوده و در صورتی که در ناحیه فرادیواره (مصالح واقع بر صفحه گسل) و محدوده برشی قرار گیرد این آسیب‌ها بیشتر می‌باشد. نبی‌زاده (۲۰۱۴) با انجام تعدادی تست سانتریفیوژ تحت شتاب 80g نشان داد که در پدیده‌ی گسلش، حضور تونل باعث انحراف مسیر گسلش نسبت به حالت بدون حضور تونل می‌شود و ناحیه‌ی بیشتری در سطح زمین تحت تأثیر جابجایی قرار می‌گیرد. بازیار و همکاران (۲۰۱۶) پاسخ تونل‌های زیرزمینی به گسلش معکوس را با مدل‌سازی عددی ارزیابی کردند. نتایج مدل‌سازی عددی در انطباق با نتایج آزمایشگاهی نشان داد که حضور تونل می‌تواند مسیر گسیختگی ناشی از گسل معکوس را منحرف کند. مشخصات خاک و عمق مدفون تونل از عوامل مؤثر بر مسیر انتشار گسلش معکوس شناخته شد. کیانی و همکاران (۲۰۱۶) با انجام مدل‌سازی فیزیکی اندرکنش گسل نرمال با تونل‌های قطعه‌ای در سانتریفیوژ ژئوتکنیک به این نتیجه رسیدند که خرابی در تونل‌های قطعه‌ای ناشی از گسلش نرمال ناگهانی نیست و پوشش تونل توانایی تحمل بخشی از گسلش را بدون خرابی دارد. نوع پوشش تونل، ضخامت خاک سربار و زاویه‌ی گسل نسبت به مقطع تونل از عوامل مؤثر بر عملکرد تونل‌های قطعه‌ای تحت گسلش مشخص شدند.

مناطق لرزه‌خیز و مجاور گسل‌ها ساخته می‌شوند. آیین‌نامه‌ها معمولاً توصیه می‌کنند در محدوده گسل ساخت‌وساز صورت نگیرد و یا اگر صورت می‌گیرد با ضوابط ویژه و طراحی خاص باشند. در اجرای قوانین آیین‌نامه‌ای مشکلات فراوانی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به نبود نقشه‌های دقیق زمین‌شناسی از موقعیت گسل‌ها و تاریخچه فعالیت آنها و همچنین اختلاف نظر در مورد ساختار و نوع فعالیت گسل‌ها در بین زلزله‌شناسان اشاره کرد (قوامی و همکاران، ۲۰۱۸). از طرفی، به دلیل رشد فزاینده‌ی جمعیت و نیاز به گسترش شهرها، اجتناب از ساخت‌وساز در پهنه‌ی گسل‌ها امکان‌پذیر نمی‌باشد و در ساخت سازه‌های طویل مانند پل‌ها، تونل‌ها و لوله‌های مدفون نمی‌توان از احداث آنها در مجاورت حوزه‌ی خطر گسل‌ها اجتناب کرد. به لحاظ تاریخی، تأسیسات زیرزمینی در مقابل زلزله نرخ پایین‌تری از خرابی را نسبت به سازه‌های روزمینی تجربه کرده‌اند. با وجود این، بعضی از سازه‌های زیرزمینی در زلزله‌های بزرگ اخیر دچار خسارات قابل توجهی شده‌اند. خسارات ناشی از زلزله‌ها بر تونل‌ها به سه دسته تقسیم می‌شود: (۱) خسارات ناشی از گسیختگی زمین مانند روانگرایی و زمین‌لغزش، (۲) خسارات ناشی از جابجایی گسل و (۳) خسارات ناشی از لرزش زمین (دوونینگ و روزن، ۱۹۷۸). زلزله‌های مهیب سال ۱۹۹۹ در ترکیه و تایوان موارد متعددی از تأثیرات زیان بار گسیختگی‌های گسل بر سازه‌های زیرسطحی را نشان می‌دهد (سوگیمورا و همکاران، ۲۰۰۱؛ دالگیک، ۲۰۰۲؛ کتوگانی و استیروس، ۲۰۰۳). بنابراین، باید تمهیدات مناسبی برای کاهش خطر ناشی از انتشار گسلش در خاک در نظر گرفته شود. درک درست مکانیزم‌های موجود در فرایند انتشار گسلش و اندرکنش آنها با سازه‌های زیرسطحی می‌تواند در طراحی منطقی و کاهش خطرات ناشی از گسلش راهگشا باشد.

انتشار گسیختگی گسل در خاک توسط محققین به صورت عددی و آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته

شدند و نیز کاهش زمان تحلیل، مدل‌های عددی ارائه شده در این پژوهش همگی دوبعدی می‌باشند. امتداد گسل موازی با امتداد محور تونل در نظر گرفته شد. روش تحلیل صریح دینامیک استفاده شد تا بتوان اثر زمان را در مدل‌سازی‌ها مد نظر قرار داد. در این روش، مش‌ها می‌توانند بدون نیاز به مش‌بندی مجدد، جابجایی بیشتری داشته باشند و از دقت تحلیل کاسته نمی‌شود. برای مدل‌سازی تونل از المان پوسته‌ای استفاده شد. خاک ماسه‌ای با استفاده از مش پیوسته چهارضلعی چهارگره‌ای مدل‌سازی شده است و در شبکه‌بندی سعی شد تا در محل تونل از المان‌های ریزتری استفاده شود. برای مرزهای قائم، جابجایی افقی مقید و جابجایی قائم آزاد گذاشته شد. برای مرز افقی سنگ بستر تکیه‌گاه مفصلی در نظر گرفته شده است. شکل ۱ تصویر شماتیک و شکل ۲ مش‌بندی مدل ساخته شده در نرم‌افزار را نشان می‌دهند. در مطالعه پارامتریک، قطر تونل برابر با ۴ یا ۶ متر و ضخامت پوشش تونل ۰/۲۴ یا ۰/۳۶ متر در نظر گرفته شد. موقعیت مرکز تونل نسبت به خط گسلش در حالت آزاد و سطح زمین به ترتیب با پارامترهای X و Y مشخص شده است (شکل ۱).

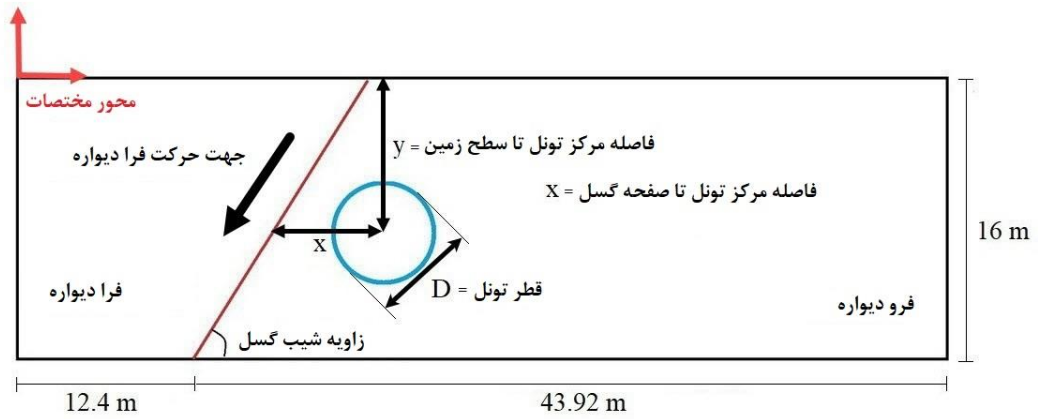
برای تعریف مدل رفتاری خاک از مدل رفتاری الاستیک-پلاستیک موهرکولمب استفاده شد. جدول ۱، مشخصات خاک مورد استفاده در تحلیل عددی و مشخصات تونل در مدل‌سازی عددی را نشان می‌دهد. تونل به صورت الاستیک خطی با سختی بالا مدل شده است. در سطح تماس بین خاک با تونل از رفتار عمودی اصطکاکی استفاده شد و المان‌ها در سطح تماس اجازه جداشدگی و انفصال دارند. در مدل عددی، تونل از جنس بتن در نظر گرفته شده است.

از آنجا که اندرکنش تونل با گسل نرمال و تأثیر پارامترهای مختلف بر این اندرکنش به صورت عددی بررسی نشده است، در تحقیق حاضر، با استفاده از نرم‌افزار المان محدود به بررسی اندرکنش گسل نرمال با تونل‌های زیرزمینی پرداخته می‌شود. در شبیه‌سازی عددی، صرفاً جابجایی ناشی از گسل بررسی گردیده و تأثیر امواج لرزه‌ای در نظر گرفته نشده است. از آنجایی که مدل‌سازی عددی در نهایت مواجه با مسأله صحت‌سنجی نتایج حاصله است، در نتیجه نیازمند مطالعات میدانی و ارزیابی شواهد میدانی پدیده‌ها و همچنین نتایج مدل‌سازی فیزیکی در آزمایشگاه، که امکان کنترل شرایط مدل‌سازی در آن‌ها میسر است، می‌باشد. بنابراین، به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، نتایج با مدل‌های فیزیکی نبی‌زاده (۲۰۱۴) مقایسه گردید. تأثیر پارامترهای مختلف مانند موقعیت تونل نسبت به مسیر گسلش در حال آزاد، عمق تونل، صلیب تونل و زاویه‌ی گسل بر اندرکنش گسل و تونل مورد مطالعه قرار می‌گیرد.

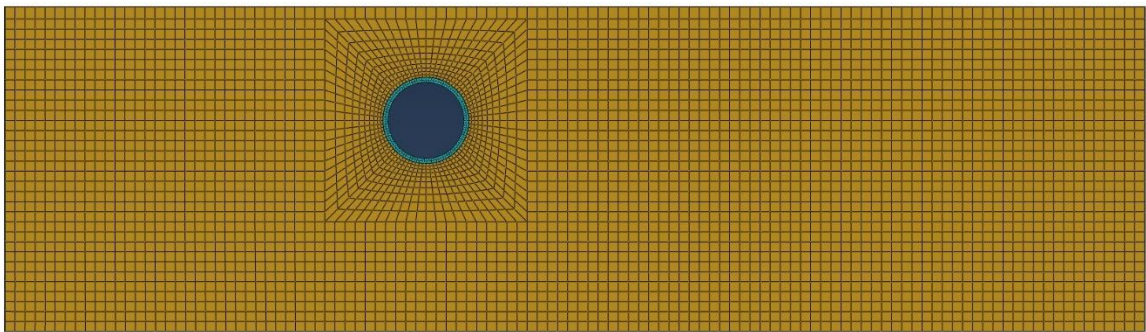
## ۲. روش تحقیق

### ۲-۱. مدل‌سازی عددی

تحقیقات نشان می‌دهد که نرم‌افزار ABAQUS مبتنی بر روش المان محدود (FEM) برای شبیه‌سازی انتشار گسیختگی گسل در خاک بسیار مورد استفاده قرار گرفته و نتایج موفقیت‌آمیزی داشته است (لین و همکاران، ۲۰۰۷؛ بازیار و همکاران، ۲۰۱۶؛ سعیدی عزیزکندی و همکاران، ۲۰۱۹). به همین منظور، برای بررسی اندرکنش گسل نرمال با تونل‌های زیرزمینی از نرم‌افزار ABAQUS استفاده شد. به علت برقراری شرایط کرنش مسطح در مدل‌های آزمایشگاهی که جهت صحت‌سنجی استفاده



شکل ۱. تصویر شماتیک مدل



شکل ۲. نحوه مش‌بندی مدل

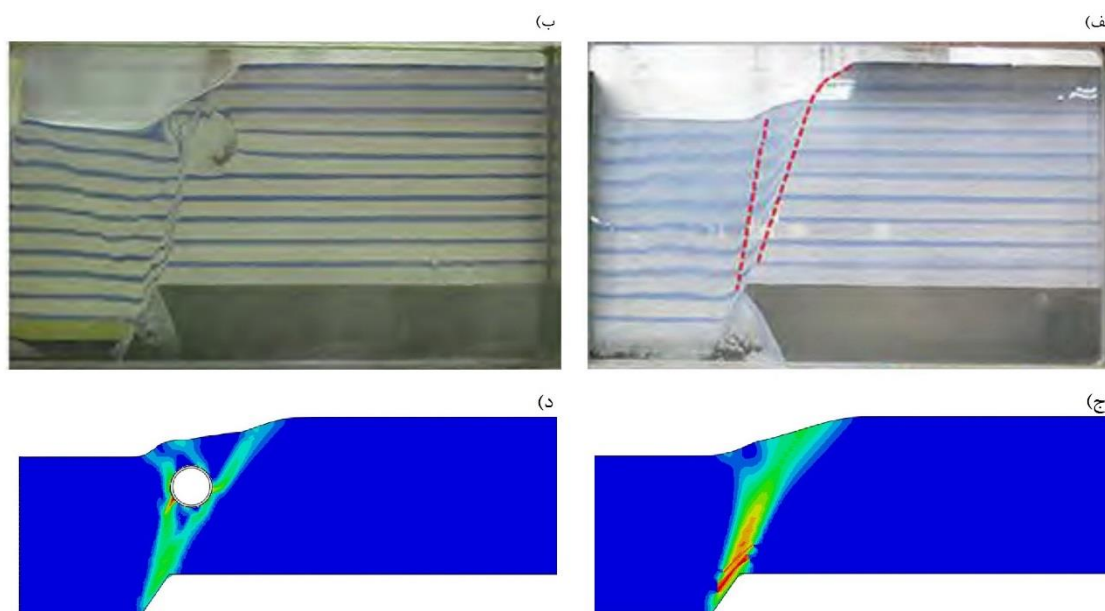
جدول ۱. مشخصات خاک ماسه‌ای و تونل در مدل‌سازی عددی

| پارامتر                       | مقدار                   |
|-------------------------------|-------------------------|
| خاک                           |                         |
| چگالی ( $\gamma$ )            | 15.65 kN/m <sup>3</sup> |
| مدول الاستیک (E)              | 25 MPa                  |
| نسبت پواسون ( $\nu$ )         | 0.3                     |
| زاویه اصطکاک داخلی ( $\phi$ ) | 35°                     |
| زاویه اتساع خاک ( $\psi$ )    | 6°                      |
| تونل                          |                         |
| چگالی ( $\gamma$ )            | 24 kN/m <sup>3</sup>    |
| مدول الاستیک (E)              | 25 GPa                  |
| نسبت پواسون ( $\nu$ )         | 0.28                    |

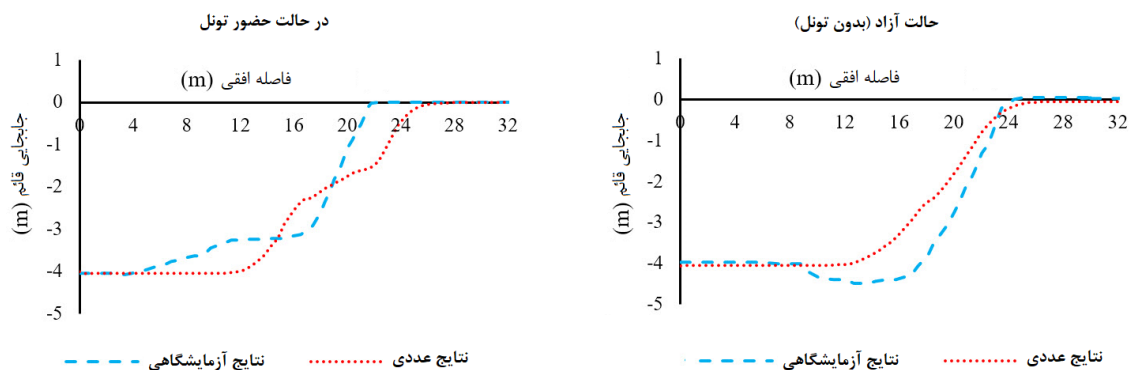
۲-۲. صحت‌سنجی مدل عددی

اندرکنش گسلش نرمال و تونل در جابجایی قائم ۴ متر در شکل ۴ آمده است. علت اختلافی که بین تغییر مکان سطحی در مدل سازی عددی و آزمایشگاهی است ناشی از لغزش زیاد اعمالی می باشد. در لغزش های زیاد، ریزش خاک در گسلش رخ داده و با توجه به اینکه نرم افزار المان محدود ABAQUS محیط پیوسته را مدل می کند، لذا نمی تواند ریزش خاک در لغزش های زیاد گسل را مدل کند. مطالعات بازیار و همکاران (۲۰۱۶) نشان می دهد که در جابجایی های قائم کمتر در پدیده گسلش، انطباق نتایج عددی و آزمایشگاهی بیشتر است. همچنین حداقل میزان نسبت جابجایی قائم گسل ( $h$ ) به ضخامت لایه خاک ( $H$ ) جهت رسیدن گسلش به سطح زمین توسط محققین حدود ۱۰ درصد گزارش شده است (برنسی و همکاران، ۲۰۰۸؛ آشتیانی و همکاران، ۲۰۱۸). از این رو در مطالعه پارامتریک، جابجایی قائم گسل ۲ متر ( $h/H=0.125$ ) در نظر گرفته شد.

به منظور بررسی عملکرد صحیح نرم افزار ABAQUS و تحلیل عددی، از نتایج آزمایش های انجام شده توسط نبی زاده (۲۰۱۴) برای اندرکنش گسلش و تونل زیرزمینی استفاده شد. مدل فیزیکی شامل لایه خاک به ضخامت ۱۶ متر بود که تحت گسلش نرمال با جابجایی قائم ۴ متر قرار داشت. تونل با قطر ۴ متر و ضخامت ۰/۲۴ متر در موقعیت  $y = 10 \text{ m}$  و  $x = 4.4 \text{ m}$  قرار گرفت. مسیر گسلش در مدل سانتی فوژ و شبیه سازی عددی در شکل ۳ نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می شود، خاک در قسمت فرودیواره بر عکس فرادیواره تغییر قابل توجهی نداشته است و با بررسی مسیر گسلش نرمال در مدل عددی و مقایسه آن با نتایج مدل فیزیکی می توان گفت که آنالیز المان محدود پیش بینی قابل قبولی برای محل رخنمون گسل در سطح خاک و همچنین مسیر گسلش در حالت حضور تونل داشته است. مقایسه تغییر مکان سطحی در نتایج آزمایشگاهی و مدل سازی عددی



شکل ۳. مقایسه نتایج آزمایشگاهی نبی زاده (۲۰۱۴) با مدل عددی. الف) نمونه ی آزمایشگاهی در حالت زمین آزاد، ب) نمونه آزمایشگاهی در حالت حضور تونل، ج) کانتورهای کرنش پلاستیک در مدل سازی عددی در حالت زمین آزاد و د) کانتورهای کرنش پلاستیک در مدل سازی عددی در حالت حضور تونل



شکل ۴. مقایسه‌ی تغییر مکان سطحی در نتایج آزمایشگاهی نبی‌زاده (۲۰۱۴) و مدل‌سازی عددی

### ۳. نتایج

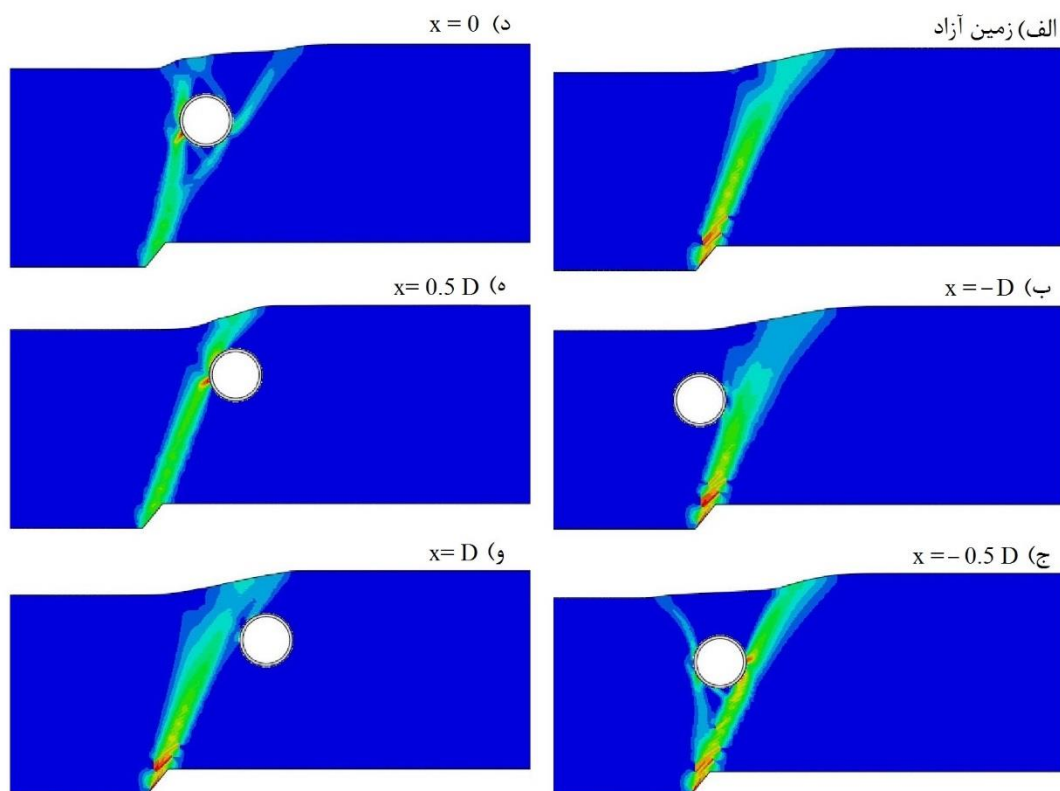
#### ۳-۱. اثر موقعیت تونل نسبت به مسیر گسلش در

#### حالت آزاد

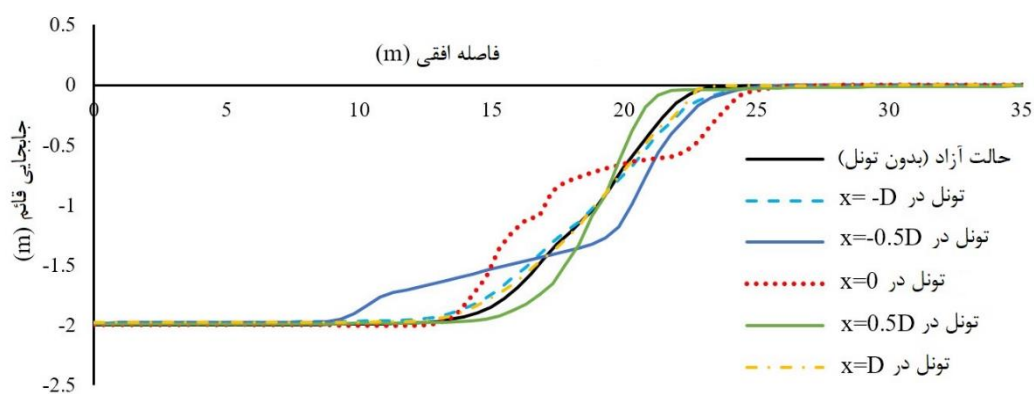
قبل از مدل‌سازی اندرکنش گسل نرمال و تونل، باید حوزه‌ی آزاد (بدون حضور تونل) به منظور تعیین موقعیت تونل نسبت به مسیر گسلش (X) شبیه‌سازی شود. شکل ۵ نتایج مدل عددی گسلش نرمال با زاویه‌ی ۶۰ درجه در حالت آزاد و اندرکنش آن با تونل با ابعاد هندسی یکسان و در عمق برابر در موقعیت‌های مختلف  $(x=-D, -0.5D, 0, 0.5D, D)$  را نشان می‌دهد. مرکز تونل یک بار به سمت فرادیواره و یک بار به سمت فرودیواره و هر بار به اندازه نصف قطر تونل جابجا شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، قرارگیری تونل در ناحیه برشی در خاک موجب انحراف مسیر گسلش می‌شود. در

این حالت، مسیر گسیختگی اصلی به دو مسیر گسیختگی در طرفین تونل تقسیم می‌گردد. هنگامی که تونل در فرودیواره قرار می‌گیرد، به طوری که از ناحیه برشی دور است، تأثیر ناچیزی بر مسیر گسلش دارد (شکل ۵-و). این اتفاق در حالتی که تونل در قسمت فرادیواره قرار می‌گیرد نیز صادق است. اما در این حالت، تونل به دلیل حرکت بلوک فرادیواره به سمت پایین، جابجایی زیادی را متحمل می‌شود.

همان‌طور که از شکل ۶ مشخص است، جابجایی‌های سطحی زمین در حالتی که تونل در ناحیه برشی قرار می‌گیرد نسبت به حالتی که در این ناحیه قرار ندارد نامنظمی بیشتری دارد. بنابراین، سازه‌های واقع در سطح زمین در این حالت می‌توانند جابجایی‌های غیریکنواخت بیشتری را متحمل شوند.



شکل ۵. کانتورهای کرنش پلاستیک و مسیر گسلش نرمال ۶۰ درجه با حضور تونل در موقعیت‌های مختلف نسبت به خط گسل در حالت آزاد



شکل ۶. مقایسه‌ی تغییر مکان زمین در گسلش نرمال ۶۰ درجه در حالت زمین آزاد و حضور تونل در موقعیت‌های مختلف نسبت به خط گسل

### ۳-۲. اثر عمق مدفون تونل

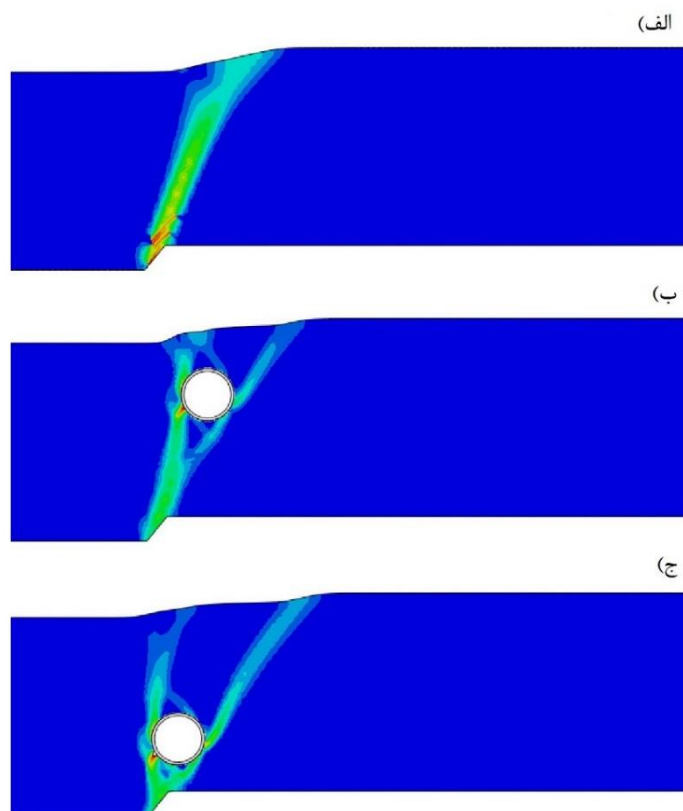
به منظور بررسی تأثیر عمق مدفون تونل بر اندرکنش گسل نرمال و تونل و همچنین مسیر گسلش، نتایج آنالیز عددی حضور تونل در عمق‌های ۶ و ۱۱ متر از سطح و در مسیر

گسل در حالت آزاد ( $x = 0$ ) با یکدیگر مقایسه شدند. پیش‌بینی تغییرات ایجاد شده در خاک ماسه‌ای با استفاده از کرنش برشی پلاستیک در شکل ۷ آمده است. با افزایش عمق تونل، تمرکز کرنش‌های برشی پلاستیک در اطراف تونل

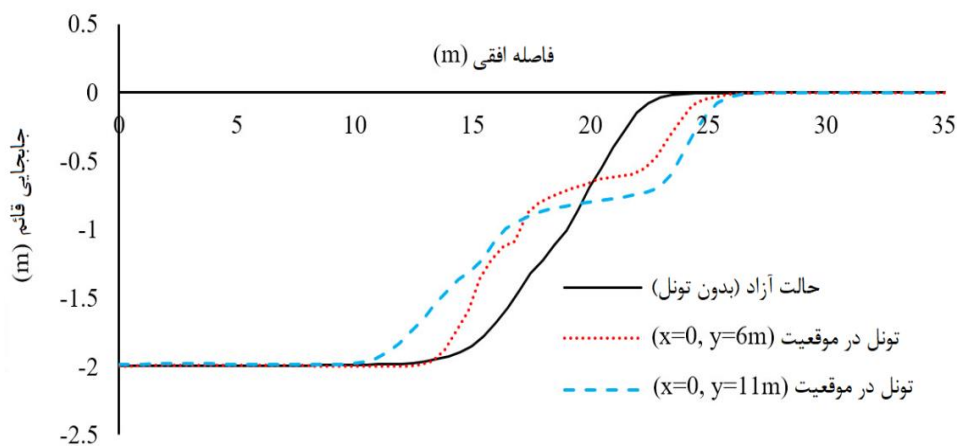
## مطالعه عددی اندرکنش تونل‌های زیرزمینی با گسل نرمال

۱۱ متری قرار دارد، در فاصله افقی ۱۰ تا ۲۷ متر و برای تونل در عمق ۶ متر در فاصله افقی ۱۳ تا ۲۶ متر می‌باشد. به طور کلی، با افزایش عمق تونل، سازه‌های سطحی و زیرساخت‌های مجاور تونل در محدوده‌ی بیشتری تحت تأثیر گسیختگی ناشی از گسل نرمال خواهند بود.

بیشتر شده است که نشان‌دهنده‌ی خسارات جدی به تونل در اثر نزدیکی به خط گسل در سنگ بستر می‌باشد. همچنین، افزایش عمق مدفون تونل سبب شده که جابجایی‌های سطحی در محدوده و وسیع‌تری نسبت به تونل در عمق کمتر، گسترش یابد. از شکل ۸ مشخص است که محدوده تغییرشکل یافته در سطح زمین در حالتی که تونل در عمق



شکل ۷. کانتورهای کرنش پلاستیک و مسیر گسلش نرمال ۶۰ درجه با حضور تونل در عمق‌های مختلف: الف) زمین آزاد، ب)  $(x=0, y=6m)$  و ج)  $(x=0, y=11m)$



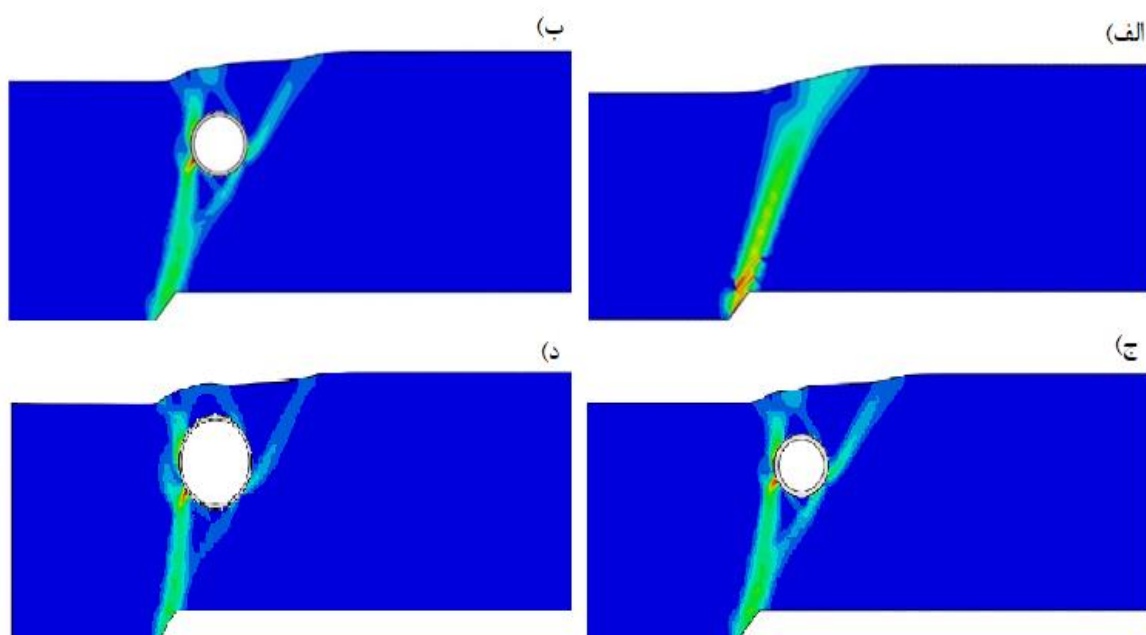
شکل ۸. مقایسه تغییر مکان زمین در گسلش نرمال ۶۰ درجه در حالت زمین آزاد و حضور تونل در عمق‌های مختلف



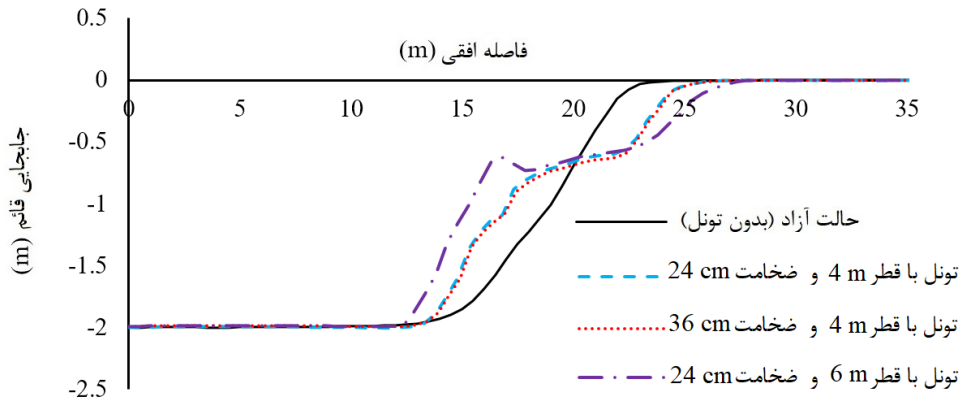
### ۳-۳. اثر ضخامت و قطر تونل

ضخامت و قطر تونل تغییر داده شد تا بتوان اثرات EI را در اندرکنش گسل نرمال و تونل بررسی کرد. ضخامت تونل از ۰/۲۴ متر به ۰/۳۶ متر افزایش یافت. همانطور که از کانتورهای تغییرشکل پلاستیک در شکل ۹ مشخص است، مسیر گسیختگی با تغییر ضخامت تونل تغییر نکرده است. همچنین، پروفیل تغییرشکل سطحی زمین نیز در شکل ۱۰ تغییری نداشته است. این روند مغایر با مشاهدات بازیار و همکاران (۲۰۱۶) در بررسی اثر ضخامت تونل در گسل معکوس می‌باشد. در گسل معکوس، مشاهده شد که با افزایش ضخامت تونل به همین مقدار، کرنش‌های برشی پلاستیک در زیر تونل متمرکز می‌شود. علت این اختلاف می‌تواند در تفاوت مکانیزم گسل نرمال با معکوس باشد.

با افزایش قطر تونل از ۴ به ۶ متر، مشاهده شد که ناحیه‌ی کرنش پلاستیک در عمق خاک و سطح زمین محدوده‌ی بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد (شکل ۹-ب و د). به طوری که محدوده‌ی تغییرشکل یافته سطحی در حضور تونل با قطر ۶ متر در فاصله افقی ۱۲ تا ۲۷ متر است که این بازه نسبت به محدوده‌ی تغییرشکل یافته سطحی در حضور تونل با قطر ۴ متر، دو متر بیشتر است (شکل ۱۰). بنابراین، سازه‌های سطحی در محدوده وسیع‌تری در این حالت می‌توانند تحت تأثیر گسلش قرار گیرند. همچنین، در حالتی که قطر تونل افزایش می‌یابد، زیرساخت‌های مجاور تونل در فاصله‌های دورتر نیز به دلیل انحراف بیشتر گسیختگی، می‌توانند تحت تأثیر گسلش قرار گیرند.



شکل ۹. کانتورهای کرنش پلاستیک و مسیر گسلش نرمال ۶۰ درجه در حضور تونل با ضخامت‌های مختلف: الف) زمین آزاد، ب) تونل با ضخامت ۲۴ سانتی‌متر و قطر ۴ متر در موقعیت  $(x=0, y=6m)$ ، ج) تونل با ضخامت ۳۶ سانتی‌متر و قطر ۴ متر در موقعیت  $(x=0, y=6m)$ ، د) تونل با ضخامت ۲۴ سانتی‌متر و قطر ۶ متر در موقعیت  $(x=0, y=6m)$

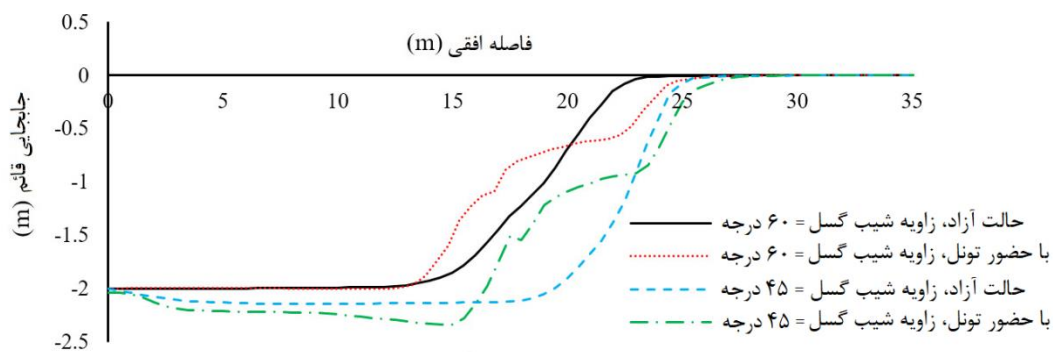


شکل ۱۰. مقایسه تغییر مکان زمین در گسلش نرمال ۶۰ درجه در حالت زمین آزاد و حضور تونل با قطر و ضخامت مختلف در موقعیت  $(x = 0, y = 6m)$

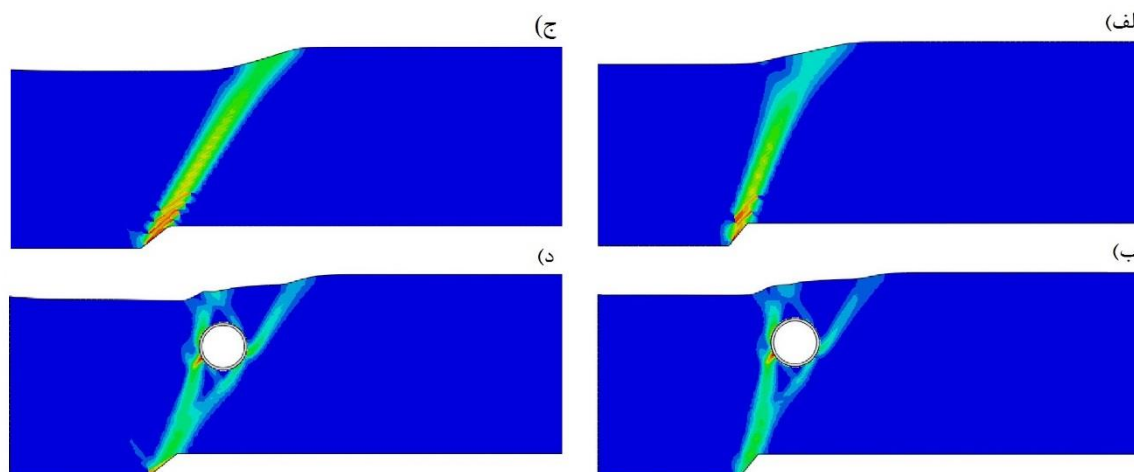
گسل معکوس با زوایای ۵۰ و ۶۰ درجه در حالت آزاد نیز مشاهده شده است. شکل ۱۲ نتایج مدل عددی اندرکنش گسلش نرمال با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه و تونل با شرایط یکسان را با یکدیگر مقایسه کرده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در گسل ۴۵ درجه، شاخه سمت راست ناحیه برشی به سطح زمین رسیده و باعث شده جابجایی‌های قائم در سطح زمین بیشتر شود. همچنین، در گسل ۴۵ درجه، به دلیل جابجایی افقی بیشتر، مقادیر کرنش در بالا و پایین تونل بیشتر می‌شود.

#### ۳-۴. تأثیر زاویه‌ی گسل نرمال

زاویه‌ی گسل نرمال از ۶۰ درجه به ۴۵ درجه تغییر پیدا کرد. شکل ۱۱ نشان‌دهنده تغییر مکان سطحی زمین در حالت آزاد و حضور تونل برای گسل نرمال با زوایای ۴۵ و ۶۰ درجه می‌باشد. همان‌طور که مشخص است، میزان تغییرات سطحی در حالت گسل با زاویه‌ی ۴۵ درجه نسبت به حالت ۶۰ درجه شدت بیشتری دارد. چنین روندی در نتایج آزمایشگاهی لین و همکاران (۲۰۰۵) در



شکل ۱۱. مقایسه تغییر مکان زمین در گسلش نرمال با زوایای مختلف در حالت زمین آزاد و حضور تونل  $(x = 0, y = 11m)$



شکل ۱۲. کانتورهای کرنش پلاستیک و مسیر گسلش نرمال: الف) گسل با زاویه ۶۰ درجه در حالت سطح آزاد، ب) گسل با زاویه ۶۰ درجه در حضور تونل ( $x = 0, y = 6m$ )، ج) گسل با زاویه ۴۵ درجه در حالت سطح آزاد و د) گسل با زاویه ۴۵ درجه در حضور تونل ( $x = 0, y = 6m$ )

#### ۴. نتیجه گیری

- عمق تونل یکی از پارامترهای مؤثر در گسترش ناحیه برشی در گسلش نرمال در لایه خاک ماسه‌ای و تغییرشکل‌های سطحی می‌باشد. با افزایش عمق تونل، تمرکز کرنش‌های برشی پلاستیک در اطراف تونل بیشتر شده است که نشان‌دهنده خسارات جدی به تونل در اثر نزدیکی به خط گسل در سنگ بستر می‌باشد. همچنین، افزایش عمق مدفون تونل سبب می‌شود که جابجایی‌های سطحی در محدوده وسیع‌تری نسبت به تونل در عمق کمتر، گسترش یابد.

در این پژوهش، با استفاده از مدل‌سازی عددی، به بررسی اندرکنش گسل نرمال با تونل‌های زیرزمینی پرداخته شد. با صحت‌سنجی انجام شده توسط نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد که نرم‌افزار المان محدود ABAQUS مسیر گسیختگی ناشی از گسل نرمال و محل رخنمون گسل را به‌خوبی پیش‌بینی می‌کند. در زمینه اندرکنش گسل نرمال با تونل نتایج نشان داد که:

- تغییر ضخامت تونل تأثیر چندانی بر کانتورهای کرنش پلاستیک و تغییر مکان سطحی ندارد. اما با افزایش قطر تونل، ناحیه کرنش پلاستیک در عمق خاک و سطح زمین محدوده‌ی بیشتری را تحت تأثیر قرار می‌دهد.
- میزان تغییر مکان سطحی در حالت گسل با زاویه ۴۵ درجه نسبت به حالت ۶۰ درجه چه در حالت آزاد و چه در حالت حضور تونل بیشتر است.

- قرارگیری تونل در ناحیه‌ی برشی ناشی از گسلش در خاک موجب انحراف مسیر گسل نرمال می‌شود. در این حالت، مسیر گسیختگی اصلی به دو مسیر گسیختگی در طرفین تونل تقسیم می‌گردد. هنگامی که تونل در فرودیواره یا فرادیواره قرار می‌گیرد به‌طوری که از ناحیه برشی دور است، تأثیر ناچیزی بر مسیر گسلش دارد.

## ۵. مراجع

- Ashtiani, M., Ghalandarzadeh, A., Mahdavi, M. and Hedayati, M. 2018. "Centrifuge modeling of geotechnical mitigation measures for shallow foundations subjected to reverse faulting". *Can. Geotech. J.*, 55(8): 1130-1143.
- Baziar, M. H., Nabizadeh, A., Mehrabi, R. and Lee, C. J. 2016. "Evaluation of underground tunnel response to reverse fault rupture using numerical approach". *Earthq. Eng. Struct. Dyn.*, 83: 1-17.
- Bransby, M. F., Davies, M. C. R., El Nahas, A. and Nagaoka, S. 2008. "Centrifuge modeling of reverse fault-foundation interaction". *Bull. Earthq. Eng.*, 6(4): 607-628.
- Bray, J. D. 2001. "Developing mitigation measures for the hazards associated with earthquake surface fault rupture". *Seismic Fault-induced Failures Workshop*, Japan Society for the Promotion of Science, University of Tokyo.
- Dalgic, S. 2002. "Tunneling in squeezing rock, the Bolu tunnel, Anatolian Motorway, Turkey". *Eng. Geol.*, 67: 73-96.
- Dowding, C. H. and Rozen, A. 1978. "Damage to rock tunnels from earthquake shaking". *J. Geotech. Eng. Div., Amer. Soc. Civ. Eng.*, 104(GT2): 175-191.
- Ghavami, S., Mohammadi, M. and Rajabi, M. 2018. "An overview of mitigation measures for the fault rupture hazards in surface and subsurface structures". 3<sup>rd</sup> Iranian Conference on Geotechnical Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran.
- Kiani, M., Akhlaghi, T. and Ghalandarzadeh, A., 2016. "Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 51: 108-119.
- Kontogianni, V. and Stiros, S. 2003. "Earthquakes and seismic faulting: Effects on tunnels". *Turk. J. Earth Sci.*, 12: 153-156.
- Lin, M. L., Chung, C. F., Jeng, F. S., and Yao, T. C. 2007. "The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels". *Eng. Geol.*, 92: 110-132.
- Lin, M. L., Jeng, F. S., Wang, H. J., Wang, C. P., Chung, C. F., Yao, D. C. T. and Chan, S. J. 2005. "Response of soil and a submerged tunnel during a thrust fault offset based on model experiment and numerical analysis". *Proceedings of ASME Pressure Vessels and Piping Division Conference*, Denver, Colorado USA, paper No. PVP2005-71179.
- Nabizadeh, A. 2014. "Experimental and numerical modeling of interaction between dip slip faulting and tunnel in sandy soil layer". *Ph.D. Dissertation in Geotechnical Engineering*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran.
- Saeedi Azizkandi, A., Ghavami, S., Baziar, M. H. and Heidari Hasanaklou, S. 2019. "Assessment of damages in fault rupture-shallow foundation interaction due to the existence of underground structures". *Tunn. Undergr. Sp. Tech.*, 89: 222-237.
- Sugimura, Y., Miura, S. and Konagai, K. 2001. "Damage to Shihkang dam inflicted by faulting in the September 1999 Chichi earthquake". *Seismic Fault Induced Failures*, 143-154.