

# مقایسه‌ی رفتار تونل‌های قطعه‌یی در گسلش عادی و معکوس با استفاده از مدل‌سازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی

مجید کیانی استیبار\* (دکتری)

توحید اخلاقی (دانشیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، دانشگاه تبریز

عباس قلندرزاده (دانشیار)  
دانشکده‌ی مهندسی عمران، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

مهندسی عمران شریف، تابستان ۱۳۹۶ (۳۳-۲، شماره ۱/۲، ص. ۳۹-۴۷)

تأثیر گسلش در تونل‌ها، کمتر مورد مطالعه و پژوهش قرار گرفته است. افزایش نیاز به تونل و استفاده از روش حفاری تمام‌مکانیزه‌ی تونل موجب شده است که برای پوشش تونل از پوشش‌های قطعه‌یی استفاده شود. گسلش یکی از تغییرشکل‌های بزرگ و دائمی زمین است، که می‌تواند خسارت‌هایی را به سازه‌های در معرض آن وارد کند. برخورد تونل‌ها با گسل به جهت خطی بودن آنها محتمل است. در نوشتار حاضر، ضمن معرفی مدل‌سازی پدیده‌ی گسلش زمین و تونل قطعه‌یی حفر شده در خاک، رفتار تونل‌های مذکور به‌طور کیفی در گسلش عادی و معکوس مقایسه شده است. برای این منظور از مدل‌سازی فیزیکی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی استفاده شده است. نتایج تعدادی از آزمایش‌های گسلش شیب‌لغز عادی و معکوس با تونل قطعه‌یی ارائه شده است. در گسلش عادی ریزش خاک به درون تونل به دلیل بازشدگی حلقه‌ها و ایجاد فروچاله در سطح زمین مشاهده شده است. در گسلش معکوس فقط تغییرات طولی در تونل و سطح زمین مشاهده شده است.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی فیزیکی، تونل قطعه‌یی، گسل معکوس، گسل عادی، سانتریفیوژ ژئوتکنیکی.

## ۱. مقدمه

توسعه‌ی جوامع امروزی، نیاز به تونل در بخش‌های مختلف اعم از حمل‌ونقل عمومی شهری، ترابری بین‌شهری، و شبکه‌های جمع‌آوری، و انتقال آب و فاضلاب و... را موجب شده است. پیش‌بینی کارشناسان در ایران، نیاز به ساخت تونل‌های جدید شامل تونل‌های ترابری و آب در حدود ۳۰۰۰ کیلومتر است. مرتفع‌کردن نیاز ذکر شده با روش‌های سنتی حفاری تونل، مشکل و زمان‌بر است. پیشرفت‌های اخیر در صنعت تونل‌سازی در دنیا، بیان‌گر سرعت در اجرا و کیفیت مطلوب پروژه‌های حفاری مکانیزه‌ی تونل نسبت به روش‌های سنتی حفاری تونل است.<sup>[۱]</sup> ایران به‌عنوان یکی از مناطق لرزه‌خیز دنیا، پتانسیل بالایی برای وقوع گسلش‌های سطحی دارد. برای مثال، گسل شمال تبریز به‌عنوان مهم‌ترین و بزرگ‌ترین گسل شمال غرب ایران است، که براساس مطالعات صورت‌گرفته مشخص شده است، که این گسل در داخل ایران طولی در حدود ۲۰۰ کیلومتر دارد.<sup>[۱]</sup> امروزه به علت توسعه‌ی شهر تبریز، گسل مذکور از میان شهرک‌های تازه تأسیس شمال شهر عبور و حتی مسیر تونل خط

\* نویسنده مسئول

تاریخ دریافت: ۱۳۹۳/۱۲/۱۸، اصلاحیه ۱۳۹۴/۷/۱۸، پذیرش ۱۳۹۴/۸/۴.

## ۲. گسلش و تونل

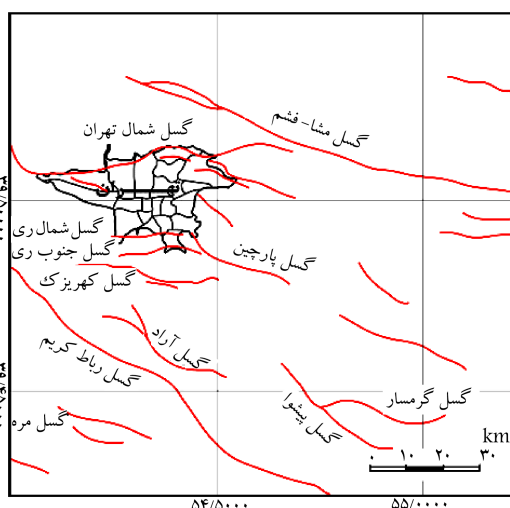
اغلب تونل‌ها را می‌توان جزء شریان‌های حیاتی لحاظ کرد. در پژوهشی در سال

kiani@tabrizu.ac.ir  
takhlaghi@tabrizu.ac.ir  
aghaland@ut.ac.ir

۲ متری تبریز را قطع می‌کند.<sup>[۲]</sup> از طرفی تمامی گسل‌های موجود در یک محل، شناخته شده نیست و در هنگام وقوع زلزله فعال و مشخص می‌شوند.<sup>[۳-۶]</sup> بعضاً هنگام حفاری‌های ژئوتکنیکی، گسل‌های پنهان مذکور شناسایی می‌شوند و لزوم ایجاد سامانه‌های حمل‌ونقل عمومی وسیع در شهرهای زلزله‌خیز، حفر تونل را الزامی می‌سازد. لذا خطر پدیده‌ی گسلش، سازه‌های زیرزمینی همچون تونل‌های مترو و راه را در چنین مواقعی تهدید می‌کند.<sup>[۷]</sup> بدیهی است نیاز به خطوط مترو براساس نیازمندی‌های ترافیکی ناشی از توسعه‌ی مناطق مسکونی ایجاد می‌شود. این رویداد در برخی دیگر از شهرهای زلزله‌خیز ایران مانند تهران و مشهد نیز اتفاق افتاده است. شکل ۱، موقعیت تقریبی گسل‌های شناخته شده‌ی شهر تهران را نشان می‌دهد. تونل‌های حفر شده برای برخی خطوط موجود و آتی متروی تهران با گسل تقاطع دارند و آثار گسل در حفاری‌های اخیر متروی تهران مشاهده شده است.



شکل ۲. تصویری از مقطع گسل شیب لغز معکوس در موزه‌ی گسل کوبه‌ی ژاپن. [۱۱]



شکل ۱. موقعیت گسل‌های اطراف شهر تهران.



شکل ۳. گسل بم. [۱۲]

۱۹۹۹، که توسط ان‌آی‌بی‌اس<sup>۱</sup> ایالات متحده تهیه شده است، تونل جزء سیستم شریان حیاتی بزرگراه‌ها و راه‌آهن طبقه‌بندی شده است. [۸]

پدیده‌ی گسلش می‌تواند در وقوع زلزله، خسارت‌هایی را به سازه‌های زیرزمینی و به‌خصوص سازه‌های طولی زیرزمینی وارد کند. جابه‌جایی برشی در یک پهنه‌ی باریک در دو طرف گسل، آثار تخریبی شدیدی در سازه‌های زیرزمینی خواهد داشت. تنش‌های حاصل از گسلش در مقاطع تونل یا سایر سازه‌های زیرزمینی می‌تواند به مراتب از تنش‌های حاصل از لرزش و لغزش بیشتر باشند. براساس روش‌های طراحی موجود و فقدان شناخت کافی از رفتار سازه‌های زیرزمینی، طراحی تونل‌ها به‌نحوی که بتوانند در برابر جابه‌جایی‌های چند سانتی‌متری تا چندمتری ناشی از گسلش مقاومت کنند، نیز از نظر اقتصادی مقرون به‌صرفه نیست؛ بدین لحاظ مطالعه‌ی خطر گسلش در مسیر یک تونل و یا سایر سازه‌های زیرزمینی، اهمیت خاصی دارد. [۹]

طراحی پوشش تونل‌های قطعه‌یی نیز در شرایطی که نیروهای مازاد ناشی از گسلش به تونل وارد می‌شود، از دیگر مسائلی است که ناشناخته باقیمانده است و می‌تواند تأثیر اساسی در طراحی پوشش تونل ایجاد کند.

به‌طور کلی بسیاری از تونل‌ها در طول مسیر خود از نواحی گسل عبور می‌کنند، که این امر باعث آسیب‌پذیری آن‌ها در اثر لغزش گسل می‌شود. به همین جهت در حین بررسی‌های ساختگاه برای طراحی و ساخت تونل باید به وجود گسل‌ها توجه خاصی مبذول شود، تا بتوان با شناخت کامل آن‌ها، پیشگیری‌های لازم را در جهت کاهش میزان صدمات ناشی از گسلش انجام داد. [۸ و ۱۰] همچنین تأثیر گسلش در کاربری طرح باید به‌دقت مشخص شود. مثلاً، در تونل‌های راه‌آهن حساسیت زیادی در برابر جابه‌جایی وجود دارد، زیرا امکان قطع شدن ریل‌ها یا مختل شدن سیستم آن‌ها به‌واسطه‌ی جابه‌جایی حاصل از گسلش وجود دارد و این امر می‌تواند حوادث ناگواری را به وجود آورد. در مقابل، در تونل‌های انتقال آب حتی اگر جابه‌جایی قابل‌توجهی نیز رخ دهد، خطر جانبی به همراه نخواهد داشت و سیستم انتقال آب نیز می‌تواند با مقداری تفاوت دبی به کار خود ادامه دهد.

هر چند در بیشتر مواقع در هنگام زلزله، جابه‌جایی گسل‌ها در حد چند ۱۰ سانتی‌متر هست، ولی در رویدادهای بزرگ لرزه‌یی، این جابه‌جایی می‌تواند به چند متر نیز برسد. در ادامه، مثال‌هایی از برخی زلزله‌های مهم جهانی و داخلی جهت روشن شدن اهمیت گسلش ارائه شده است:

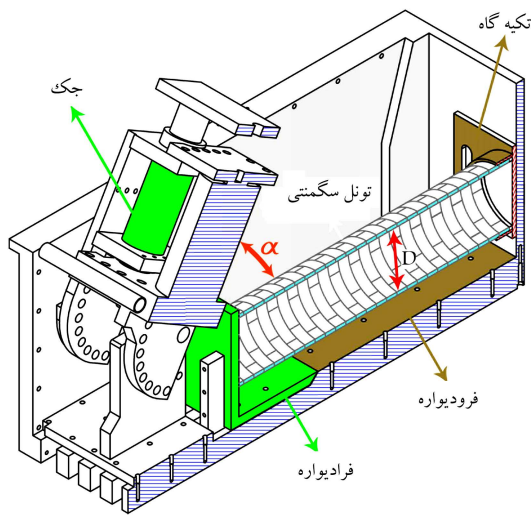
-- زلزله‌ی سان‌فرانسیسکو<sup>۲</sup> (۱۹۰۶): در زلزله‌ی سان‌فرانسیسکو، حرکت گسل

سان‌آریاس<sup>۳</sup> موجب تخریب و برهم‌خوردگی وضعیت بسیاری از راه‌ها، حصارها، خطوط لوله، پل و تونل‌ها در امتداد گسل شده است. پهنه‌ی منطقه‌ی شکستگی در این مورد از چند ۱۰ سانتی‌متر تا بیش از ۱۵ متر متغیر بوده و ترک‌های زیادی نیز در دو طرف گسل اصلی تا شعاع چند ۱۰ متری ایجاد شده است. مقدار جابه‌جایی افقی با آنچه توسط جابه‌جایی حصارها و یا راه‌ها قابل‌اندازه‌گیری بوده است، از ۲٫۵ متر تا ۴٫۵ متر متغیر بوده است؛ که در بعضی نقاط به ۶٫۵ متر هم رسیده است.

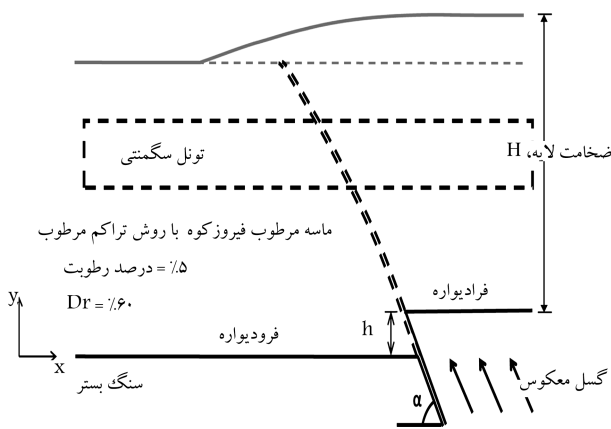
-- زلزله‌ی سان‌فرانسیسکو<sup>۴</sup> (۱۹۷۱): نوع گسل در زلزله‌ی سان‌فرانسیسکو، شیب‌لغز معکوس بوده است. گسلش در ناحیه‌یی به وسعت ۱۵ کیلومتر ایجاد شده و با حرکات لغزشی معکوس و امتداد لغز چپ‌گرد همراه بوده است. در ناحیه‌ی سان‌فرانسیسکو، منطقه‌ی جابه‌جایی به‌صورت چپ‌گرد ۱٫۹ متر و به‌صورت شیب‌لغز ۱٫۵ متر بوده است. اختلاف سطح عمودی حاصل برابر با ۱٫۳۹ متر بوده است.

-- زلزله‌ی کوبه‌ی ژاپن<sup>۵</sup> (۱۹۹۵): با بزرگای ۷٫۲، گسل نوجیما<sup>۶</sup> در جهت قائم ۱٫۳ متر و در جهت افقی ۱٫۸ متر جابه‌جا شده است. شکل ۲، که مربوط به موزه‌ی گسل کوبه‌ی ژاپن است، تصویری از موقعیت فرادیواره<sup>۷</sup> و فرودیواره<sup>۸</sup> یک گسل معکوس را به‌وضوح نشان می‌دهد. [۱۱] شکل ۳، مربوط به گسل بم است، که در سال ۲۰۰۳ تهیه شده است. [۱۲]

در زلزله‌های ایران نیز جابه‌جایی‌های قابل‌توجهی در گسل‌ها در برخی از زلزله‌های بزرگ مشاهده شده است، که خلاصه‌یی از آن‌ها در جدول ۱ ارائه شده است.



شکل ۴. تصویر مقطع سه بعدی جعبه‌ی شبیه‌ساز گسل مورد استفاده.



شکل ۵. تصویر شماتیک مدل در گسلش معکوس.

هر دو نوع گسلش، شیب لغز (عادی و معکوس) را در آزمایش‌ها اعمال کرد. کف این جعبه به‌گونه‌ی طراحی شده است که در اثر اعمال گسلش معکوس و عادی هیچ‌گونه فضایی برای خروج ماسه از جعبه ایجاد نشود. جنس جعبه از فولاد و آلومینیم آلیاژی بوده و مخزن خاک به ابعاد ۷۰ سانتی‌متر طول، ۵۰ سانتی‌متر عرض، و ۴۰ سانتی‌متر عمق داشته است. برای یکی از دیواره‌های جعبه‌ی مذکور از پلکسی‌گلاس استفاده شده است تا بتوان تغییر شکل‌های رخ داده در اعماق مختلف در اثر گسلش را مشاهده کرد. همچنین در آن مکان‌های ویژه‌ی برای قرارگیری دوربین‌های ویژه‌ی عکس‌برداری و سایر حس‌گرهای اندازه‌گیری جابه‌جایی‌ها در سطح زمین تعبیه و تصویر مقطع سه‌بعدی آن در شکل ۴ ارائه شده است.

هندسه‌ی شماتیک مدل در گسلش معکوس در شکل ۵ و در گسلش عادی در شکل ۶ ارائه شده است. زاویه‌ی گسلش در شکل‌ها زاویه‌ی  $\alpha$  (زاویه‌ی گسل با افق) بوده است.

مهم‌ترین مسئله در مدل‌سازی فیزیکی، استفاده‌ی صحیح از قوانین مقیاس است. قوانین مقیاس، روابط تشابه بین مدل و مقیاس واقعی را بیان می‌کند. روابط تشابه در مدل‌سازی فیزیکی در سانتی‌فیوژ در منابع معتبر ارائه شده است. [۱۸، ۱۷] از آنجایی‌که در پژوهش حاضر نسبت تشابه برابر با  $g = 50$  در نظر گرفته شده است، لذا شتاب وارد بر نمونه در دستگاه سانتی‌فیوژ نیز باید برابر  $g = 50$  باشد. نکته‌ی مهمی که برای مدل‌سازی پوشش تونل باید توجه کرد، نسبت سختی خمشی در واحد

جدول ۱. برخی از زلزله‌های مهم ایران در سال‌های ۱۹۰۰ تا ۱۹۸۰، که همراه با گسلش قابل توجه بوده‌اند (واحد اندازه‌ها، متر است). [۱۵]

تاریخ	نام رویداد	بزرگا	طول گسل	جابه‌جایی قائم
۱۹۰۹/۱/۲۳	سیلاخور	۷٫۴	۴۵	۲٫۵
۱۹۱۱/۴/۱۸	راور	۶٫۲	۱۵	۰٫۵
۱۹۲۹/۵/۱	کپه داغ	۷٫۳	۷۰	۲٫۱
۱۹۳۰/۵/۶	سلماس	۷٫۲	۳۰	۶٫۰
۱۹۴۱/۲/۱۶	محمدآباد	۶٫۱	۱۰	۰٫۵
۱۹۴۷/۹/۲۳	دوست‌آباد	۶٫۸	۲۰	۰٫۸
۱۹۴۷/۹/۱	بوئین‌زهر	۷٫۲	۸۰	۱٫۴
۱۹۶۸/۸/۳۱	دشت بیاض	۷٫۴	۸۰	۲٫۱
۱۹۷۸/۹/۱۶	طیس	۷٫۷	۷۵	۰٫۷
۱۹۷۹/۱۱/۱۴	گریزان. خاف	۶٫۶	۱۷	۰٫۶
۱۹۷۹/۱۱/۲۷	کولی بیناباد	۷٫۱	۶۵	۳٫۸

مروری بر استانداردهای طراحی در زمینه‌ی تونل نشان می‌دهد که به دلیل عدم شناخت کافی مسئله، فقط توصیه به پرهیز عبور تونل از این نواحی دارند. [۱۴، ۱۳، ۹] طراحی پوشش دائمی تونل در محل تقاطع با گسل، چالش‌های زیادی به همراه دارد. شناخت مکانیزم‌های خرابی می‌تواند زمینه‌ی برای شناخت بهتر رفتار برای طراحی تونل باشد. در پژوهش حاضر سعی شده است که ضمن معرفی مدل‌سازی پدیده‌ی گسلش زمین و تونل قطعه‌ی حفار شده در خاک، مکانیزم خرابی این تونل‌ها در گسلش عادی و معکوس مقایسه شوند. برای این منظور از مدل‌سازی فیزیکی در سانتی‌فیوژ ژئوتکنیکی استفاده شده است. نتایج تعدادی از آزمایش‌های گسلش شیب لغز عادی و معکوس با تونل قطعه‌ی ارائه و نتایج مشاهده شده، تشریح و مقایسه شده‌اند.

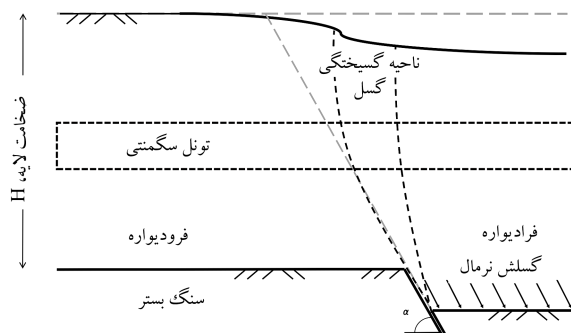
یکی از روش‌های حفاری تونل، روش حفاری تمام مقطع با ماشین حفار، اصطلاحاً روش حفاری تمام مکانیزه<sup>۹</sup> است. پوشش دائم در روش حفاری مکانیزه، اصطلاحاً پوشش سگمنتال نامیده می‌شود. پوشش سگمنتال از قطعات بتنی پیش‌ساخته تشکیل شده است. به لحاظ هندسی و نحوه‌ی کنار هم قرار گرفتن آن‌ها جهت تشکیل یک حلقه‌ی کامل قطعه‌ی به سیستم‌های چیدمان مستطیلی، دوزنقه‌ی، لوزی‌شکل، متوازی‌الاضلاع، و شش ضلعی تقسیم‌بندی می‌شوند. پوشش‌های قطعه‌ی به صورت حلقه اجرا می‌شوند. [۱۶]

### ۳. روش مطالعه

در پژوهش حاضر، پدیده‌ی گسلش زمین و اثر آن در تونل قطعه‌ی در دستگاه سانتی‌فیوژ ژئوتکنیکی مدل‌سازی شده است. مقایسه‌ی رفتار تونل‌های قطعه‌ی در گسلش معکوس و عادی با استفاده از مدل‌سازی فیزیکی در سانتی‌فیوژ ژئوتکنیکی به طور ویژه در نوشتار حاضر مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی از این مدل‌سازی درک و شناخت مکانیزم‌های گسیختگی در دو گسلش معکوس و عادی بوده است. استخراج این مکانیزم‌ها به همراه مطالعه‌ی برخی پارامترهای تأثیرگذار از قبیل سربار تونل می‌تواند در طراحی پوشش قطعه‌ی مفید واقع شود. لذا سعی بر آن بوده است که قطر و ضخامت لاینینگ تونل مدل نزدیک به قطر متداول در تونل‌های دوقلوی مترو انتخاب شود. برای انجام آزمایش‌های پژوهش حاضر، جعبه‌ی شبیه‌ساز ویژه‌ی طراحی و ساخته شده است. نوع طراحی جعبه به‌گونه‌ی بوده است که بتوان

جدول ۳. روابط تشابه ابعادی هندسی پژوهش.

مدل واقعی	مدل کوچک مقیاس	نسبت میزان تشابه	نسبت تشابه	پارامتر
۲۰ × ۲۵ × ۳۵ متر	۴۰ × ۵۰ × ۷۰ سانتی‌متر	۵°	N	ابعاد محیط خاکی
۳۵ متر	۷۰ سانتی‌متر	۵°	N	طول مدل شده از تونل
۵/۹ متر	۱۱/۸ سانتی‌متر	۵°	N	قطر خارجی
۵ متر	۱۰ سانتی‌متر	۵°	N	قطر داخلی
۳۵ سانتی‌متر	۹ میلی‌متر	۵°	N	ضخامت سگمنت
۱۱۵ سانتی‌متر	۲۳ میلی‌متر	۵°	N	عرض سگمنت‌ها



شکل ۶. تصویر شماتیک مدل در گسلش عادی.

جدول ۴. مشخصات فیزیکی و مکانیکی ماسه‌ی مورد استفاده.

نام ماسه	ماسه‌ی ۱۶۱ فیروزکوه
$G_s$	۲,۶۵۸
$e_{max}$	۰,۸۷۴
$e_{min}$	۰,۵۴۸
$D_{50}$ (mm)	۰,۲۷۰
%FC	۰
$\Phi$	۳۷ درجه (برای ماسه‌ی مرطوب)
C	۰

طول نمونه‌ی کوچک مقیاس با مقیاس واقعی است. این ضرایب در جدول ۲ ارائه شده‌اند. این مسئله، لزوم توجه به انتخاب مصالح مناسب برای پوشش تونل را در مدل کوچک مقیاس نشان می‌دهد. کاهش ابعاد هندسی مدل واقعی، لزوماً امکان مدل‌سازی را مهیا نمی‌سازد، لذا می‌توان با تغییر جنس مصالح مدل، مدل‌سازی منطبق با قوانین مقیاس را انجام داد. به علت اعمال مرحله‌ی جابه‌جایی و سرعت اندک آن، آثار اینرسی می‌تواند قابل چشم‌پوشی باشد. جزئیات ابعاد و مصالح استفاده‌شده برای پوشش تونل در بخش ساخت مدل ارائه شده است. جدول ۳، جزئیات مدل و معادل واقعی آن در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. با توجه به محدودیت ابعاد مخزن برای مدل‌سازی طول تونل، از تکیه‌گاه‌های ویژه‌ی استفاده شده است، که تأثیر طول محدود تونل در مدل به میزان کمینه برسد.

از ماسه‌ی فیروزکوه شماره‌ی ۱۶۱، برای مدل‌سازی خاک مخزن استفاده شده است. مشخصات فیزیکی و مکانیکی این ماسه در جدول ۴ ذکر شده است. با توجه به تأثیر اندازه‌ی دانه‌ها در نتایج مدل‌سازی با سانتی‌فیوژ با توجه به کانالوگ راهنمای ارائه شده از طرف کمیته‌ی فنی مدل‌سازی فیزیکی انجمن بین‌المللی ژئوتکنیک در خصوص قوانین شبیه‌سازی باید رابطه‌ی ۱ رعایت شود:

$$B_t/d_{50} > 175 \quad (1)$$

که در آن،  $B_t$  قطر تونل مدل و  $d_{50}$  قطر دانه‌ی است، که ۵۰٪ وزنی خاک از این قطر کوچک‌تر باشند. نظر به اینکه در آزمایش‌های پژوهش حاضر، کمیته‌ی قطر مورد استفاده برای تونل ۱۰ سانتی‌متر بوده است، لذا رابطه‌ی ۱ در پژوهش حاضر ارضاء شده است.

برای مدل‌سازی تونل از لوله‌های آریست سیمانی از نوع تحت فشار استفاده شده است. این لوله‌ها مدول کشسانی حدود ۲۰ گیگاپاسکال دارند. این در حالی است که مدول کشسانی بتن مسلح برای تونل‌های قطعه‌یی معمولاً در حدود ۳۴ گیگاپاسکال در طراحی لحاظ می‌شود. این لوله‌ها طبق استانداردهای ملی و بین‌المللی در کارخانه‌های مختلف تولید می‌شوند. این موضوع باعث اطمینان از یکنواختی مصالح

جدول ۲. روابط تشابه ابعادی مورد استفاده.

پارامتر	نسبت تشابه	میزان تشابه
طول	N	۵°
چگالی	۱	۱
کرنش	۱	۱
جابه‌جایی	N	۵°
سختی خمشی	$N^4$	۵° <sup>۴</sup>
سختی محوری	$N^2$	۵° <sup>۲</sup>

شکل ۷. سگمنت مدل‌سازی شده و تونل ساخته شده از لوله‌ی آریست - سیمانی.

مورد استفاده شده است. ضخامت تعیین شده براساس روابط تشابه برای تونل مدل کمتر از ضخامت لوله‌های تولیدی بوده است، لذا با انجام عملیات تراش‌کاری از ضخامت لوله‌ها کاسته و با برش‌کاری و سوراخ‌کاری به ۶ قطعه (سگمنت) جهت ایجاد حلقه‌های تونل تبدیل شده است. شکل ۷، یک حلقه‌ی کامل و یک سگمنت مدل استفاده شده را با اجزاء مشخص نشان می‌دهد.

برای تمامی آزمایش‌ها از خاک با تراکم ۶۰٪ استفاده شده است. روش ساخت مدل با استفاده از روش تراکم مرطوب (رطوبت ۵٪) است. تشریح جزئیات مدل‌سازی و روش ساخت نمونه و ابزاربندی مدل در نوشتار دیگری از پژوهشگران پژوهش حاضر ارائه شده است.<sup>[۲]</sup>

شکل ۸، تصویر مدل ساخته شده را که بر روی سپید سانتی‌فیوژ قرار گرفته است، نشان می‌دهد.

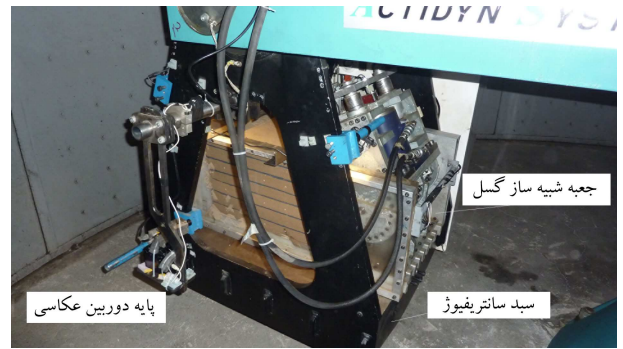
### ۱.۳. مدل‌سازی تکیه‌گاه‌ها

با توجه به محدودیت فضای داخلی جعبه‌ی شبیه‌ساز گسلش برای مدل‌سازی تونل در طول (بیشینه‌ی طول تونل مدل ۷۰ سانتی‌متر هست)، قبل از انجام آزمایش‌ها براساس فرضیات مهندسی و تجربه‌ی آزمایشگاهی پژوهشگران، برای مدل‌سازی

شکست و جابه‌جایی‌های سطحی رخ داده در اثر گسلس، جزء اصلی‌ترین هدف‌های پژوهش حاضر است، لذا از حس‌گرهای جابه‌جایی در پژوهش حاضر استفاده شده است، که در شکل ۵ محل قرارگیری آن‌ها نشان داده شده است. یکی از حس‌گرهای استفاده شده، حس‌گر تغییر مکان سنج برای سنجش جابه‌جایی قائم سطح زمین در طول تونل است، که با توجه به نوع آزمایش، ۱ یا ۲ عدد از آن‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. این حس‌گرها میزان جابه‌جایی اختلافی قائم دو صفحه‌ی گسل که به سطح زمین رسیده است، را اندازه می‌گیرند.

برای مشاهده‌ی کیفی تغییر شکل داخل تونل و همچنین مشاهده‌ی شکست‌های رخ داده و یا هرگونه پدیده‌ی دیگر در داخل تونل و همچنین به دلیل عدم امکان مشاهده‌ی داخل آن از یک دستگاه دوربین فیلم برداری با کیفیت بالا استفاده شده است، که در یکی از نقاط انتهایی تونل تعبیه شده است.

همچنین برای مشاهده‌ی نحوه‌ی توسعه‌ی گسلس درون خاک و مشاهده‌ی جابه‌جایی‌های سطح زمین، در بیرون از مخزن خاک محل ویژه‌ی برای نصب دوربین عکاسی با کیفیت بالا تعبیه شده است، که می‌تواند از دیواره‌ی پلکسی گلاس تصاویر مناسبی تهیه کند. برای اینکه مشاهده‌ی تغییر شکل‌ها درون خاک راحت‌تر صورت پذیرد، از لایه‌های ماسه‌ی رنگی به صورت افقی و به فواصل ۶ سانتی‌متر از هم استفاده شده است. این لایه‌ها موضعی شدن کرنش و همچنین مسیر عبور گسل را به راحتی نمایان می‌کند. دوربین عکاسی کان G7 با کیفیت تصاویر ۱۰ مگاپیکسل برای این امر مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به استفاده از قطعات الکترونیکی در دوربین‌ها، بسیاری از آن‌ها در شتاب‌های بالاتر از  $g \ 10$  کارکرد خود را از دست می‌دهند و فقط دوربین‌های خاصی برای عکس برداری در چنین شرایطی مناسب هستند. دوربین فوق پس از جست‌وجوهای جامع انتخاب و آزمایش شده و پس از اطمینان از عملکرد در آزمایش‌های اصلی مورد استفاده قرار گرفته است.



شکل ۸. تصویر سبید سانتریفیوژ مدل به همراه پایه‌ی طراحی شده برای دوربین عکاسی و جعبه‌ی گسلس.



شکل ۹. تصاویر تکیه‌گاه تونل و نحوه‌ی قرارگیری آن در جعبه‌ی شبیه‌ساز گسل.

### ۳.۳. برنامه‌ی آزمایش‌ها

نوشتار حاضر، براساس نتایج حاصل از ۴ آزمایش سانتریفیوژ در گسلس عادی و ۴ آزمایش در گسلس معکوس ارائه شده است. در این آزمایش‌ها از سربارهای مختلف  $0.75D$ ،  $1$  و  $1.2$  برابر قطر خارجی تونل در زاویه‌ی گسلس  $60^\circ$  درجه استفاده و دو آزمایش با شرایط میدان آزاد (گسلس معکوس و عادی با حذف سازه‌ی تونل) انجام شده است. در جدول ۵، مشخصات کامل آزمایش‌ها ارائه شده است.

جدول ۵. مشخصات آزمایش‌های مورد استفاده در مساله حاضر.

شماره‌ی آزمایش	نوع گسلس	زاویه‌ی گسلس (درجه)	سربار
۱	عادی	$60^\circ$	$0.75D$
۲	عادی	$60^\circ$	$1D$
۳	عادی	$60^\circ$	$1.2D$
۴	عادی	$60^\circ$	میدان آزاد
۵	معکوس	$60^\circ$	$0.75D$
۶	معکوس	$60^\circ$	$1D$
۷	معکوس	$60^\circ$	$1.2D$
۸	معکوس	$60^\circ$	میدان آزاد

اثر طول نامحدود تونل، تکیه‌گاه خاصی طراحی و استفاده شده است، که هدف اصلی استفاده از آن، مدل‌کردن طول بیشتری از تونل در مخزن گسلس بوده است. گیردار بودن کامل تکیه‌گاه باعث شده است که تونل در آن نقطه هیچ‌گونه نشست و یا دورانی نداشته باشد. این تکیه‌گاه‌ها از دو بخش فلزی صلب و لاستیکی تشکیل شده‌اند. قطعه‌ی لاستیکی، ابتدا تونل را به صورت غشایی در بر می‌گیرد و سپس در درون بخش فلزی تکیه‌گاه قرار داده می‌شود. مجموعه‌ی کامل شده به دیواره‌ی صلب جعبه‌ی شبیه‌ساز گسل توسط پیچ و مهره متصل می‌شود. نقش قسمت لاستیکی تکیه‌گاه، ایجاد امکان دوران برای تونل و جابه‌جایی در راستای قائم و افقی است. جنس آن از پلی اورتان فشرده بوده و ضخامت آن در لبه‌ی بیرونی ۵ میلی‌متر و قطر داخلی آن معادل قطر خارجی تونل است. لازم به ذکر است که این قطعه یک پارچه بوده و به روش تراشکاری تولید شده است. شکل ۹، تصاویر مربوط به تکیه‌گاه‌ها را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است پس از انجام چند آزمایش اولیه مشخص شده است که تأثیر تکیه‌گاه در نتایج محسوس نیست و پس از انجام آزمایش‌های مشابه بدون حضور تکیه‌گاه به ویژه در گسلس عادی مشخص شده است که حذف تکیه‌گاه در نتایج تأثیر به‌سزایی ندارد. شاید دلیل اصلی موضوع نرمی تونل قطعه‌ی است که باعث متمرکز شدن نیروهای وارده از گسل در محل تقاطع گسل و تونل شده و نیروهای وارده به تکیه‌گاه‌ها منتقل نشده است.

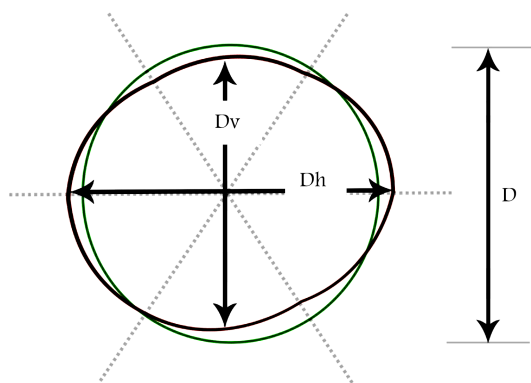
### ۳.۲. ابزار بندی

با توجه به اینکه رفتار تغییر شکلی مقطع تونل، مودهای تغییر شکل طولی تونل، مکانیزم



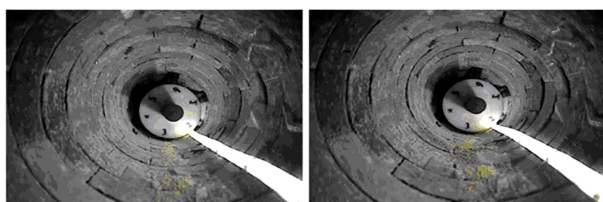
#### ۴. تشریح نتایج

برای مقایسه‌ی بهتر رفتار تونل‌های قطعه‌بی در مواجهه با گسلش عادی و معکوس، نتایج حاصل از آزمایش‌ها از منظر مکانیسم‌های گسیختگی مشاهده‌شده بررسی شده است. در بررسی مکانیسم‌های گسیختگی مقطع تونل، پروفیل تغییرشکل طولی تونل و وضعیت گسلش در سطح زمین مقایسه شده‌اند. تأثیر افزایش سربار تونل نیز در هر دو گسلش عادی و معکوس نیز بررسی و گزارش شده است.



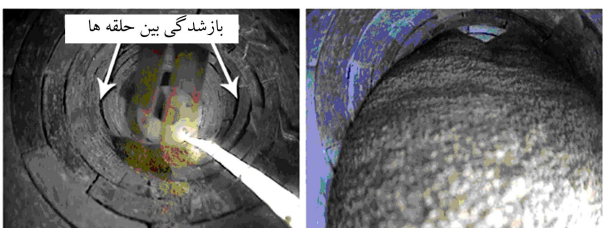
D: قطر اصلی Dv: قطر عمودی Dh: قطر افقی

شکل ۱۰. بیضی‌شدگی در مقطع بحرانی تونل بعد از اعمال گسلش عادی.



قبل از اعمال گسلش

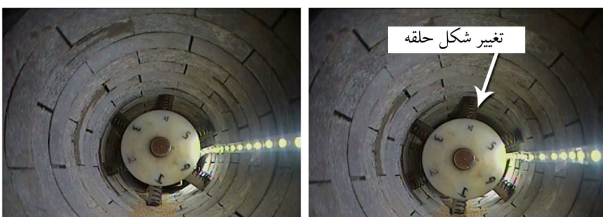
تغییر شکل مقطع مود اول



جدایش حلقه‌ها مود دوم

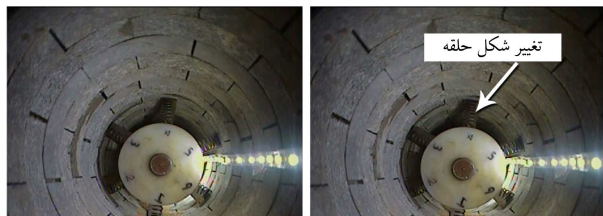
فروریزش خاک به درون تونل مود سوم

شکل ۱۱. تصاویر مقطع داخلی تونل و مودهای تغییرشکل تونل در گسلش عادی با افزایش جابه‌جایی گسل.



قبل از اعمال گسلش

آغاز تغییر شکل



افزایش تغییر شکل مقطع

تغییر شکل نهایی مقطع

شکل ۱۲. تصاویر مقطع داخلی تونل و تغییرشکل تونل در گسلش معکوس با افزایش جابه‌جایی گسل.

#### ۱.۱.۴. مکانیسم‌های گسیختگی

شناخت مکانیسم‌های گسیختگی محتمل ناشی از مواجهه‌ی گسل و تونل قطعه‌بی برای طراحی بهینه‌ی تونل بسیار کمک می‌کند. به‌طور کلی در مواجهه‌ی تونل و گسل از ۲ منظر می‌توان گسیختگی‌ها را مورد بررسی قرار داد. گسیختگی در تونل (مقطع طولی و عرضی تونل) و گسیختگی در سطح زمین (ناشی از رسیدن گسل به سطح زمین و ایجاد فروچاله در سطح).

#### ۱.۱.۴.۱. بررسی تغییر شکل در مقطع تونل

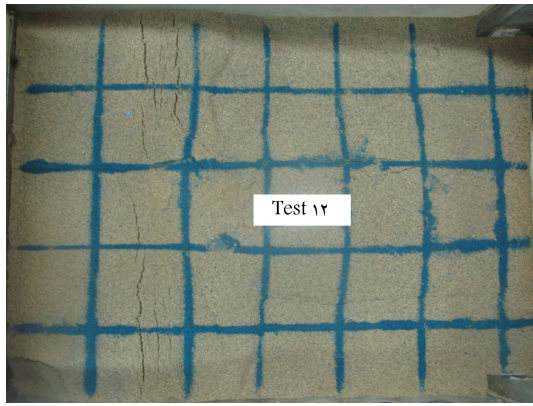
با بررسی حلقه‌های قطعه‌بی قرارگرفته در محدوده‌ی گسلش عادی مشاهده شده است که بیضی‌شدگی دائمی در حلقه‌های مزبور رخ داده است (شکل ۱۰). شکل مذکور از روی هم قرار دادن ۲ تصویر مقطع تونل قبل از اعمال گسلش و پس از آن بر روی هم ترسیم شده است. بیضی‌شدگی در مقطع تونل با کاهش ارتفاع و افزایش عرض آن همراه بوده است. انرژی گسلش با تغییرشکل بسیار زیاد حلقه‌ها نسبت به یکدیگر و سگمنت‌های درون هر حلقه توسط تونل جذب شده است.

این بیضی‌شدگی توسط تصاویر تهیه‌شده از دور بین داخل تونل در حین گسلش ثبت شده است، که در شکل ۱۱ مشاهده می‌شود. البته در شکل مذکور ایجاد این بیضی‌شدگی چندان قابل مشاهده نیست و از بررسی همزمان تصاویر در رابانه می‌توان به وضوح به وجود این بیضی‌شدگی پی برد. با افزایش مقدار گسلش، بیضی‌شدگی در تونل ایجاد و سپس با جدایش حلقه‌های قطعه‌بی از یکدیگر ریزش خاک داخل تونل رخ داده است.

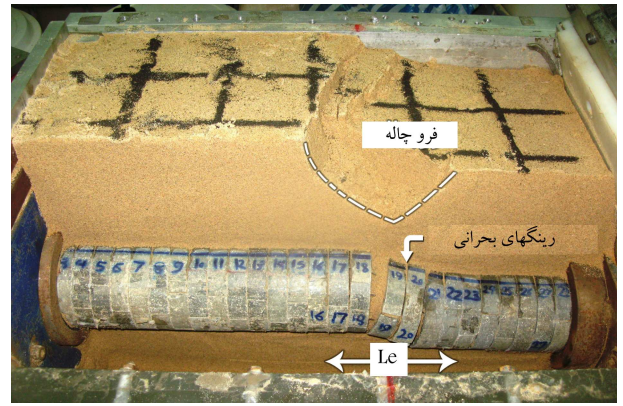
شکل ۱۲، نحوه‌ی تغییرشکل مقطع تونل را به ازاء افزایش جابه‌جایی گسل معکوس نشان می‌دهد. با افزایش جابه‌جایی، تغییرشکل در مقطع تونل اتفاق می‌افتد. برخلاف رخدادی که در گسلش عادی می‌افتد، به دلیل ماهیت فشاری گسلش معکوس، بازشدگی بین حلقه‌های سگمنت اتفاق نیفتاده است. لذا هیچ‌گونه ریزش خاک به درون تونل مشاهده نمی‌شود. در آزمایش‌های انجام‌شده در گسلش عادی و معکوس، بیشینه‌ی مقدار گسلش وارده یکسان انتخاب شده است. مقایسه‌ی رفتار تونل قطعه‌بی در مواجهه با گسلش عادی و معکوس نشان می‌دهد که تغییرشکل در مقطع تونل در گسلش عادی به مراتب بیشتر از گسلش معکوس است، لذا می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که به دلیل ماهیت فشاری گسلش معکوس، رفتار تونل قطعه‌بی در مواجهه با گسلش معکوس بهتر است.

#### ۲.۱.۴. مود تغییرشکل طولی تونل

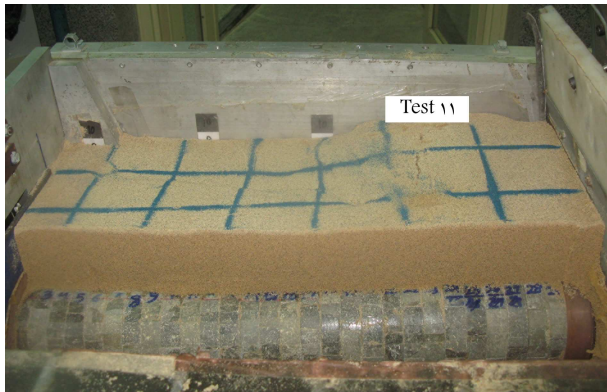
یکی دیگر از نتایج حاصل از آزمایش‌ها شناخت مود خرابی طولی در تونل‌های قطعه‌بی است. در هر دو آزمایش گسلش معکوس و عادی، تغییرشکل طولی در تونل رخ می‌دهد، که الگوی این تغییرشکل در گسل عادی در شکل ۱۳ و در گسلش معکوس در شکل ۱۴ ارائه شده است. همان‌طور که در تصاویر مشخص است، الگوی تغییرشکل به‌طور کلی شکل S است. بازشدگی بین سگمنت‌ها در گسلش معکوس بسیار کمتر از گسلش عادی بوده است. حلقه‌های تغییرشکل‌یافته



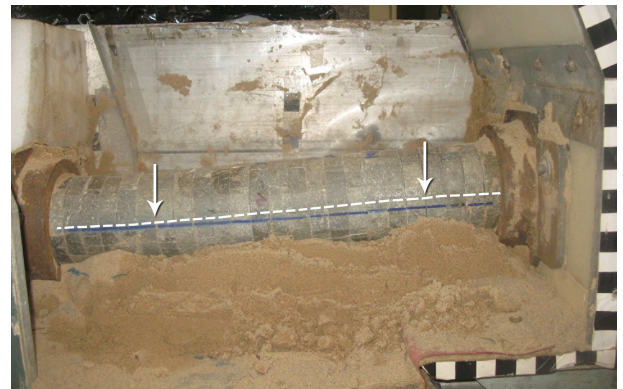
شکل ۱۵. ایجاد ترک در سطح زمین در سمت فرادایواره در اثر گسلش معکوس.



شکل ۱۳. تغییر شکل طولی تونل و فروچاله در سطح زمین در گسلش عادی.



شکل ۱۶. تصویر سطح زمین در گسلش معکوس - روبراه ۰/۷۵D.



شکل ۱۴. تغییر شکل طولی تونل قطعه‌یی در گسلش معکوس.

جدول ۶. نتایج حاصل از آزمایش‌های گسلش عادی.

شماره‌ی آزمایش	h/D	طول و عرض فروچاله	(PGD <sub>f</sub> )
۱۰	۰/۷۵	۱/۷۵D × ۱/۵D	۰/۵
۳۲	۱	۱/۶۵D × ۱/۴D	۰/۷
۱۷	۱/۲	۱/۵D × ۱/۳D	۰/۸

این پدیده و با توجه به سطحی بودن تونل‌های شهری و همچنین دانه‌یی بودن خاک مورد استفاده در عین داشتن چسبندگی کمیته‌یی به دلیل وجود رطوبت بین دانه‌یی، پدیده‌ی قوس‌زدگی نمی‌تواند مانع از نرسیدن حفره‌ی ایجاد شده در بالای تونل به سطح زمین شده و لذا فروچاله‌یی در سطح زمین به وجود می‌آید. وقوع چنین پدیده‌یی خود حاکی از اهمیت بررسی آن به دلیل احتمال آسیب به سازه‌های روزمینی و در مجاورت محل عبور تونل است. جدول ۶، مقدار جابه‌جایی گسل در راستای قائم (PGD<sub>f</sub>) را برای فروریزش کلی و هجوم خاک به درون تونل و در نتیجه‌ی آن، ایجاد فروچاله در سطح زمین را به ازاء سر بارهای مختلف نشان می‌دهد. لازم به ذکر است که مقادیر PGD<sub>f</sub> از طریق بررسی فیلم تهیه شده از داخل تونل و پس از رسیدن دستگاه سانتی‌فیوژ به شتاب مورد نظر (5° g) گزارش شده‌اند. داده‌ها نشان می‌دهند که با افزایش سر بار تونل، میزان جابه‌جایی مورد نیاز برای فروریزش کلی در تونل افزایش یافته است. این مسئله نشان می‌دهد که افزایش تنش مؤثر باعث افزایش سختی سیستم سازه‌ی تونل و خاک و در نتیجه مقاومت بیشتر آن در برابر جابه‌جایی‌های وارد شده است.

بر اساس نتایج جدول ۶ با افزایش سر بار ابعاد چاله‌ی ایجاد شده در سطح زمین نیز کاهش پیدا می‌کند. دلیل این امر آن است که میزان خاک وارد شده به داخل تونل

در گسلش عادی بیشتر در فرادایواره‌ی گسل واقع شده است، در حالی که در گسلش معکوس اغلب حلقه‌های تغییر شکل یافته در فرودایواره‌ی گسل واقع شده‌اند (شکل ۱۴).

#### ۳.۱.۴. بررسی رخنمون گسل در سطح زمین

همان‌طور که در شکل ۱۱ مشخص است، پس از اعمال گسلش عادی و بازشدگی حلقه‌های سگمنت، به دلیل ماهیت کششی گسلش عادی، ریزش ماسه به درون تونل اتفاق افتاده است، که این موضوع با توجه به سطحی بودن تونل‌های مورد مطالعه تا سطح زمین ادامه یافته و باعث ایجاد فروچاله در سطح آن شده است، که در بخش ۲.۴. به آن اشاره خواهد شد. با توجه به تهیه‌ی فیلم از داخل تونل در حین گسلش مشخص شده است که ریزش داخل تونل ناگهانی نبوده و بازشدگی در حلقه‌های قطعه‌یی تونل پس از تحمل مقداری از گسل اتفاق افتاده است. در گسل معکوس فقط ترک‌هایی در سطح زمین در سمت فرادایواره مشاهده شده است (شکل‌های ۱۵ و ۱۶). همان‌طور که اشاره شده است، پله‌شدگی سطح زمین در گسلش عادی به مراتب بیشتر از گسلش معکوس است. به عبارت دیگر، جابه‌جایی دو سطح گسل در حالت معکوس در سطح وسیع‌تری از زمین توسعه پیدا کرده است.

#### ۲.۴. فروریزش در تونل و ایجاد فروچاله در سطح زمین

همان‌طور که اشاره شده است، به دلیل ماهیت کششی گسلش عادی، جدایش حلقه‌های سگمنت از یکدیگر به ازاء افزایش لغزش گسل باعث ایجاد شرایطی می‌شود که خاک بالای تونل به داخل وارد و باعث مسدود شدن آن شود. به دنبال

در اثر بازشدگی حلقه‌های سگمنت تقریباً در آزمایش‌های مختلف ثابت است و در نتیجه با افزایش سربار، ابعاد چاله باید کاهش پیدا کند.

### ۳.۴. بررسی تأثیر افزایش سربار تونل

بررسی نتایج ۳ آزمایش گسلش عادی با روباره‌های مختلف ارائه شده در جدول ۶ حاکی از یک روند منطقی در داده‌های به دست آمده از آزمایش‌هاست. این مقادیر به وضوح نشان‌گر آن است که با افزایش سربار تونل، مقدار جابه‌جایی‌های گسل تا رسیدن به فروریزش درون تونل (PGDf) بیشتر شده است. دلیل مشاهده‌ی چنین پدیده‌یی را می‌توان افزایش تنش همه‌جانبه‌ی خاک با افزایش عمق عنوان کرد. به دلیل افزایش تنش همه‌جانبه، خاک تونل را همچون غشایی در بر می‌گیرد و در نتیجه سختی آن را افزایش می‌دهد. این مسئله خود باعث کاهش جابه‌جایی‌های نسبی تونل نسبت به خاک می‌شود و بازشدگی سگمنت‌ها از یکدیگر با آهنگ کندتری اتفاق می‌افتد. از نتایج این آزمایش‌ها می‌توان این‌گونه نتیجه گرفت که در مناطقی که احتمال خطر گسلش وجود دارد، هر چه عمق احداث تونل افزایش پیدا کند، شاهد عملکرد بهتری از آن در برابر گسلش‌های عادی احتمالی خواهیم بود. البته این موضوع با نوع کاربری تونل ارتباط مستقیم دارد. در تونل‌های ریلی اگر مقدار جابه‌جایی در طول بیشتری از تونل اتفاق بیفتد، امکان بازسازی و تعمیر تونل جهت بهره‌برداری مجدد به مراتب سهل‌تر خواهد بود.

با بررسی تصاویر مقاطع طولی تونل در گسلش عادی، که نمونه‌ی آنها در شکل ۱۲ نمایش داده شده است، در آزمایش‌های مختلف می‌توان چنین تحلیل کرد که با افزایش سربار، گسلش در محل تقاطع گسل و تونل متمرکز شده است. در این راستا پارامتری به‌عنوان نسبت طول متأثر تونل از گسلش به قطر خارجی تونل (Le) تعریف شده است. مقادیر این پارامتر در آزمایش‌های مختلف در جدول ۷ ارائه شده است. با افزایش سربار مقدار پارامتر Le کاهش یافته است. به عبارتی با افزایش سربار تعداد حلقه‌های کمتری از تونل درگیر گسلش شده‌اند. این طول براساس جدانشدگی حلقه‌های سگمنت از یکدیگر و پس از برش خاک در امتداد طولی و به صورت بصری تعیین می‌شود. این طول تمامی حلقه‌هایی را در بر می‌گیرد که در اثر گسلش، دچار تغییر شکل هر چند به اندازه‌ی ناچیزی شده باشند. بخش اعظم این طول در ناحیه‌ی فرادایواره قرار می‌گیرد. این در حالی است که حلقه‌های واقع در بخش فرودایواره تقریباً هیچ‌گونه تغییر شکل ویژه‌یی را متحمل نشده‌اند. همان‌گونه که مشخص است، با افزایش سربار مقدار Le کاهش پیدا کرده است، که این موضوع ناشی از موضعی شدن بیشتر کرنش برشی در این آزمایش‌هاست. همین امر باعث افزایش شدت خرابی در سگمنت‌های بحرانی شده است. با افزایش سربار در آزمایش‌های گسلش معکوس، تغییرات عمده‌یی مشابه آنچه در گسلش عادی وجود دارد، مشاهده نشده است.

جدول ۷. مقادیر Le برای آزمایش‌ها.

شماره آزمایش	سربار به قطر (Le)	
۱۰	۰٫۷۵	۱٫۶D
۳۲	۱	۱٫۲D
۱۷	۱٫۲	۰٫۸D

### ۵. نتیجه‌گیری

۱. در این پژوهش مدل‌سازی گسلش عادی و معکوس و تونل قطعه‌یی حفر شده در خاک با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ با موفقیت آزمایش ارائه شده است.
۲. براساس نتایج حاصل از پژوهش حاضر عملکرد تونل‌های قطعه‌یی حفر شده در خاک در برابر گسلش معکوس به دلیل ماهیت خرابی در آن‌ها به مراتب بهتر از گسلش عادی است.
۳. مکانیسم گسیختگی تونل قطعه‌یی در گسلش عادی کششی بوده است و خرابی به دلیل باز شدن حلقه‌های قطعه‌یی از یکدیگر اتفاق می‌افتد.
۴. خرابی در تونل‌های قطعه‌یی ناشی از گسلش عادی ناگهانی نیست و پوشش تونل توانایی تحمل بخشی از گسلش را بدون خرابی و ریزش خاک به درون تونل دارد. این مقدار تحمل گسل توسط پوشش تونل با افزایش سربار افزایش پیدا می‌کند. به عبارت دیگر، عملکرد تونل‌های قطعه‌یی در مواجهه با گسلش عادی با افزایش سربار بهبود می‌یابد.
۵. محدوده‌ی متأثر از گسلش عادی در تونل قطعه‌یی (Le) با افزایش سربار کاهش یافته است.
۶. در یک مقدار جابه‌جایی مشخص، در گسلش عادی طول کمتری از تونل تحت تأثیر مستقیم گسلش قرار گرفته است. این مسئله با میزان عرض باند برشی ایجاد شده در خاک نیز قابل توجیه است، چرا که در گسلش معکوس عرض باند برشی شکل گرفته در خاک به مراتب بیشتر از گسلش عادی است.
۷. در حالت گسلش عادی مشاهده می‌شود که گسل در سطح زمین تغییر شکل موضعی ایجاد می‌کند، اما در حالت گسلش معکوس پروفیل یکنواخت مشاهده می‌شود.

### تقدیر و تشکر

از گروه تخصصی قائم به جهت حمایت مالی از این پژوهش تشکر و قدردانی می‌شود. از آقایان مهندس احمدی، سلیمی، هدایتی، و مهدوی بابت مساعدت در انجام آزمایش‌ها تشکر و قدردانی می‌شود.

### پانویس‌ها

1. NIBS
2. San Francisco
3. San Andreas
4. San Fernando
5. Kobe
6. Nojima
7. hanging wall

8. foot wall
9. Toyoura and Nevada

### منابع (References)

1. Kiani, M., Aminfar, M. and Darvishi, M. "Design criteria for segmental concrete lining in mechanized tunneling",



- in *7th Iran Tunnel Conference*, Tehran, Iran (2008).
2. Kiani, M., Ghalandarzadeh, A. and Akhlaghi, T. "Physical modelling of segmental tunnel interaction with 60° normal fault in geotechnical centrifuge", in *10th Iranian Tunneling Conference*, Tehran, Iran (2013).
  3. Anastasopoulos, I., Callerio, A., Bransby, M.F., Davies, M.C.R., El Nahas, A., Faccioli, E., Gazetas, G., Masella, A., Paolucci, R., Pecker, A. and Rossignol, E. "Numerical analyses of fault-foundation interaction", *Bulletin Earthquake Eng.*, **6**(4), pp. 645-675 (2008).
  4. Anastasopoulos, I. and Gazetas, G. "Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part II. Analysis of the Kocaeli case histories", *Bulletin Earthquake Eng.*, **5**(3), pp. 277-301 (2007).
  5. Anastasopoulos, I., Gazetas, G., Bransby, M.F., Davies, M.C.R. and Nahas, A.A.E. "Fault rupture propagation through sand: Finite-element analysis and validation through centrifuge experiments", *Jornal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, **113**(8), pp. 943-958 (2007).
  6. Anastasopoulos, I.G.G. "Foundation-structure systems over a rupturing normal fault: Part I. Observations after the Kocaeli 1999 earthquake", *Bulletin Earthquake Eng.*, **5**(3), pp. 253-275 (2007).
  7. Beitollahi, A., Donya-e-Eqtesad Newspaper (24 October 2012) [Online]. Available: [www.donya-eqtesad.com/Default\\_view.asp?@=324990](http://www.donya-eqtesad.com/Default_view.asp?@=324990).
  8. *Technical Manual, Chapter 7, Direct Physical Damage to Transportation Systems*, FEMA, Department of Homeland Security, Washington D.C. (1999).
  9. Kontogianni, V.S.S. "Earthquakes and seismic faulting: Effects on tunnels", *Turkish J. Earth. Sci.*, **12**, pp. 153-156 (2003).
  10. Wang, Z.Z., Zhang, Z. and Gao, B. "The seismic behavior of the tunnel across active fault", 15 WCEE, LISBOA, 7 p. (2012).
  11. Mueller, K. "Teaching structural geology", [Online]. Available: [http://geode.colorado.edu/~structure/teaching.GEOL3120/coursenotes/07Faults\\_and\\_faulting.pdf](http://geode.colorado.edu/~structure/teaching.GEOL3120/coursenotes/07Faults_and_faulting.pdf).
  12. Eshgi, S., Zare, M., NaserAsadi, K., Seyed Rezaghi, M., Noor Ali, M., and Motamedi, M., "Preliminary report of Bam earthquake", International Institute of Earthquake and Seismology, Tehran (2004).
  13. Baziar, M.H., Nabizadeh, A., Lee, C.J. and Hung, W.Y. "Centrifuge modeling of interaction between reverse faulting and tunnel", *Soil Dyn. Earthq. Eng.*, **65**, pp. 151-164 (2014).
  14. Loukidis, D., Bouckovalas, G.D. and Papadimitriou, A.G. "Analysis of fault rupture propagation through uniform soil cover", *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, **29**(11-12), pp. 1389-1404 (2009).
  15. Vojoodi, M. "Earthquake effects on metro tunnels", In International Institute of Earthquake and Seismology, Tehran (2003).
  16. Kiani, M. "Phesebiity study of usage steel fiber in production of concrete segments", in *11th Civil Students Conference*, Bandare Abbas, Iran (2004).
  17. Muir Wood, D., *Geotechnical Modelling*, E&F Spon, London (2004).
  18. Ng, C.W.W., Cai, Q.P. and Hu, P. "Centrifuge and numerical modeling of normal fault-rupture propagation in clay with and without a preexisting fracture", *J. Geotech. Geoenv. Eng.*, **138**(12), pp. 1492-1502 (2012).