

طراحی و بهینه‌سازی پوشش تونل انتقال آب سد و نیروگاه سردشت در محل برخورد با زون گسله فعال زیرمرگ

فرشاد محمدی فیروز؛ رضا رحمان نژاد؛ مجتبی بهالدینی*

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۲- استاد بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، ایران.

۳- دانشیار دانشکده مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران، ایران.

دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۲۰ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۱۵

(نویسنده مسئول: m.bahaadini@ut.ac.ir)

چکیده

در پروسه احداث و ساخت تونل‌ها در مناطق فعال تکتونیکی، موضوع تصادم تونل با گسل‌های فعال امری اجتناب‌ناپذیر می‌باشد. گسل‌های فعال از دو جنبه جابجایی گسل و شرایط ضعیف زمین‌شناسی در ناحیه گسل می‌توانند اثرات مخربی بر روی پایداری تونل داشته باشند. در صورت تقاطع تونل با گسل فعال، جابجایی ناگهانی گسل می‌تواند باعث خسارت تونل و لاینینگ آن شود. هدف اصلی این مقاله بررسی تأثیر حرکت گسل فعال زیرمرگ بر پایداری تونل انتقال آب پروژه‌ی سد و نیروگاه سردشت می‌باشد. برای این منظور ابتدا مروری بر تاریخچه‌ی لرزه‌ای منطقه مورد نظر انجام شد و سپس با استفاده از روش عددی تفاضل محدود، تحلیل پایداری محل تقاطع تونل با گسل زیرمرگ، صورت گرفت. نتایج بررسی حرکت گسل زیرمرگ بر پایداری لاینینگ بتنی تونل نشان داد که ۱۸ متر از طول لاینینگ بتنی در فرودپیواره و ۱۶ متر در فرادپیواره در اثر حرکت گسل دچار آسیب خواهد شد. برای جلوگیری از آسیب‌های وارده بر لاینینگ، از دو روش پیشنهادی اضافه‌حفری پشت لاینینگ و لاینینگ انعطاف‌پذیر بهره گرفته شد. نتایج مدل‌سازی این دو روش نیز نشان داد که با اضافه‌حفری به طول ۴ متر و با پرکننده‌ای با مدول الاستیسیته‌ی ۱۰ مگاپاسگال، میزان صدمه‌دیدگی لاینینگ بتنی تونل در مقابل حرکت گسل حداقل خواهد شد. همچنین با مدل‌سازی عددی لاینینگ انعطاف‌پذیر، با ساخت درزه‌های ۰/۵ متری و به فاصله‌ی ۳ متر از یکدیگر، مشخص گردید که این روش ضمن کاهش بیش از ۵۰ درصدی طول خرابی به مقدار قابل ملاحظه‌ای از شدت خرابی‌ها نیز خواهد کاست.

واژگان کلیدی

گسل فعال، اضافه‌حفری، لاینینگ انعطاف‌پذیر، تونل سردشت، روش تفاضل محدود

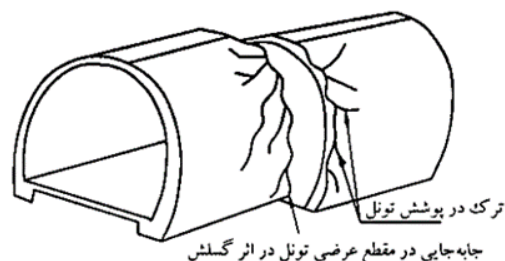
۱- مقدمه

فنی و اقتصادی تونل در مسیر خود مجبور به قطع یک یا چند گسل فعال می‌شود [۱]. مطالعات صورت گرفته در خصوص طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی در مقایسه با سازه‌های سطحی بسیار کمتر بوده است و به طبع آن موضوع تصادم تونل با گسل فعال نیز کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است [۲]. از این رو موضوع برخورد تونل با گسل فعال همچنان از جمله چالش برانگیزترین مسائل در طراحی و ساخت تونل‌ها

گسل‌ها و به ویژه گسل‌های دارای پتانسیل حرکت، از جمله ساختارهای زمین‌شناسی هستند که بایستی در هنگام طراحی و ساخت فضاهای زیرزمینی توجه ویژه‌ای به آن‌ها داشت. بسیاری از استانداردهای موجود، تنها اجتناب کردن از ساخت سازه‌ها در مجاورت گسل‌های فعال را به‌عنوان یک راهکار مهندسی توصیه نموده‌اند. اما در بعضی موارد به دلیل مسائل

محسوب می‌شود.

به‌طور کلی سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در برابر زلزله مقاوم‌تر هستند. اما گزارش‌های متعددی مبنی بر خرابی این سازه‌ها در اثر وقوع زلزله ارائه شده است [۲]. در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آثار زلزله بر سازه‌های زیرزمینی، از جمله تونل را به دو گروه لرزش زمین و گسیختگی زمین تقسیم‌بندی کرد؛ که گسیختگی زمین شامل مواردی همچون انواع ناپایداری‌ها اعم از حرکت گسل، لغزش و نشست زمین می‌شود [۳]. در مطالعات لرزه‌ای صورت گرفته بر روی تونل‌ها بیشتر تمرکز بر موضوع لرزش زمین بوده است و در این زمینه تحقیقات گسترده‌ای نیز انجام شده است [۲]. همچنین طبق گزارشات مختلف مبنی بر آسیب تونل‌ها در محل تقاطع با گسل، موضوع تقاطع تونل با گسل فعال اهمیت ویژه‌ای پیدا کرده است [۴]. نحوه‌ی خرابی لاینینگ بتنی تونل در اثر حرکت گسل به صورت شماتیک در شکل ۱ نشان داده شده است.



شکل ۱- تصویری شماتیک از نحوه‌ی خرابی ناشی تقاطع تونل با گسل فعال [۵]

از آنجاکه جلوگیری از حرکت گسل امکان‌پذیر نمی‌باشد، اساس طراحی سازه‌ی نگهدارنده‌ی تونل بر پایه پذیرش جابجایی حاصل از حرکت گسل استوار خواهد بود. به‌طور کلی روش‌های حفاظت لاینینگ در برابر لغزش گسل می‌تواند هزینه‌های زیادی را به پروژه تحمیل نماید. از این رو انتخاب هر یک از این روش‌ها جهت حفاظت لاینینگ علاوه بر مسائل فنی و اجرایی، به جنبه‌ی اقتصادی طرح نیز وابسته است. انتخاب و اجرای روشی برای جلوگیری کامل از آسیب دیدن لاینینگ در بسیاری از موارد، هم از لحاظ فنی و هم از لحاظ اقتصادی امکان‌پذیر نیست. بنابراین در اجرای هر یک از این روش‌ها گاهاً متناسب با اهمیت سازه، درصدی از

آسیب‌های حاصل از لغزش گسل بر روی لاینینگ پذیرفته می‌شود تا تمهیدات لازم برای ترمیم خرابی‌ها پس از لغزش گسل در نظر گرفته شود. همچنین نوع کاربری تونل نیز در میزان درصد خرابی پذیرفته شده در مرحله‌ی طراحی تأثیرگذار است. علاوه بر مسائل فنی و اجرایی، توجه به اهمیت پروژه و توجیه اقتصادی اجرای هر یک از این راهکارها دارای نقش کلیدی می‌باشد [۱]. روش‌های پیشنهادی حفاظت لاینینگ بتنی تونل در برابر لغزش گسل شامل اضافه‌حفراری پشت لاینینگ و لاینینگ انعطاف‌پذیر می‌باشند [۱،۶،۷].

در روش اضافه‌حفراری پشت لاینینگ با خالی کردن فضای پشت سازه‌ی نگهدارنده، فشار وارده بر لاینینگ در اثر لغزش گسل کاهش می‌یابد [۱،۷،۸]. پس از انجام حفراری وسیع در اطراف تونل، فضای خالی ایجاد شده را با مصالح حجیم و تراکم‌پذیر پر می‌کنند. این مصالح حجیم ضمن پرکردن فضای خالی پشت لاینینگ، باید قابلیت شکستن و تغییر شکل داشته باشند [۱]. فضای خالی پشت لاینینگ را می‌توان با مصالح مختلفی از جمله موادی مانند رس، ماسه، فوم بتن و یا مواد پایه شیمیایی مانند پلیاستیک مایع که برای ایزوله نمودن لرزه‌ای تونل نیز کاربرد دارند، پر نمود [۱،۹].

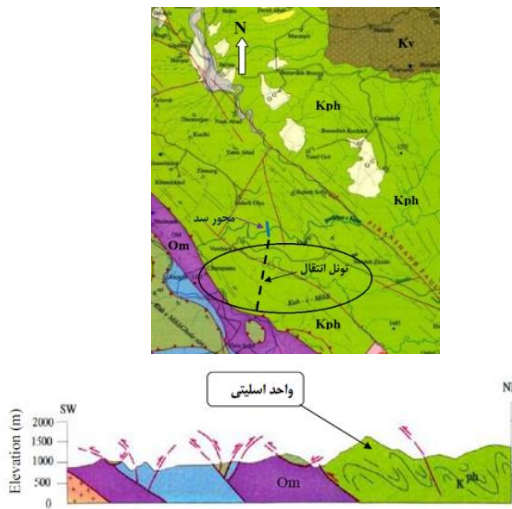
در روش لاینینگ انعطاف‌پذیر در هنگام اجرای لاینینگ بتنی در قسمت‌هایی از لاینینگ درزه‌های انعطاف‌پذیری اجرا می‌شود [۱،۶،۹،۱۰]. این درزه‌ها باعث انعطاف‌پذیرتر شدن لاینینگ در هنگام حرکت گسل می‌شوند. این روش در زمانی که پتانسیل حرکت گسل کم باشد و این تغییر مکان بر طول بیشتری از لاینینگ اثر بگذارد، کارایی بهتری خواهد داشت. هر چه میزان فاصله‌ی این اتصالات کمتر باشد، تطبیق بیشتری با تغییر محیط ایجاد می‌شود. همچنین هر چه توده‌سنگ دربرگیرنده‌ی تونل از کیفیت پایین‌تری برخوردار باشد، کارایی این روش بیشتر خواهد بود؛ زیرا تونل توانایی تطبیق با تغییر شکل‌ها را به‌صورت یکنواخت‌تر دارا خواهد بود. روش‌های مختلفی برای اجرای این درزه‌ها وجود دارد، اما نکته‌ی مهم در اجرای این روش، توجه به عایق‌کاری کامل این مفاصل در مقابل نشت آب است [۱].

مطالعات قبلی انجام شده در خصوص تقاطع تونل و گسل فعال را می‌توان به مطالعات تجربی، مدل‌سازی فیزیکی و عددی تقسیم‌بندی نمود. بخش عمده‌ای از این مطالعات به جمع‌آوری اطلاعات حاصل از حوادث گذشته اختصاص یافته

است. از جمله این مطالعات می‌توان به گزارش‌های اولوسای و همکاران در خصوص خسارات وارده به سازه‌های سطحی و زیرسطحی ناشی از زلزله‌های دوزچی و قوجالی در ترکیه [۱۱] و همچنین به گزارش‌های وانگ و همکاران و لی در رابطه با وضعیت سازه‌های زیرزمینی پس از زلزله‌ی ونچوان، [۱۲-۱۴] اشاره نمود. نتایج این گزارش‌ها نشان می‌دهد که تونل‌ها در محل تقاطع با گسل فعال، می‌توانند دچار آسیب‌های مختلفی مانند انواع ترک‌های کششی و برشی، پوسته پوسته شدن لاینینگ بتنی، شکستگی‌های گسترده و ریزش‌های بزرگ شوند. به‌طور کلی می‌توان گفت با افزایش پتانسیل جابجایی گسل بر شدت خرابی‌ها افزوده خواهد شد. اما رابطه‌ی دقیقی میان میزان حرکت گسل، نوع و شدت خرابی‌ها ذکر نشده است. اما با توجه به گزارشات موجود می‌توان ارتباطی کلی بین میزان حرکت گسل و نوع خرابی احتمالی در تونل ارائه نمود. بر این اساس در تونل‌های دایروی با بتن مسلح کیفیت بالا، در صورت عدم توجه به حفاظت لرزه‌ای تونل، پس از حرکت گسل به میزان کمتر از ۲-۱ فوت، خرابی‌هایی از نوع ترک‌های گسترده، شکستگی‌های شدید و پوسته‌پوسته شدن در لاینینگ بتنی تونل رخ خواهد داد. همچنین در صورت حرکت گسل به میزان بیش از ۵ فوت خرابی‌هایی از نوع تخریب کامل لاینینگ بتنی تونل و ریزش تونل خواهند بود [۱۵-۱۱].

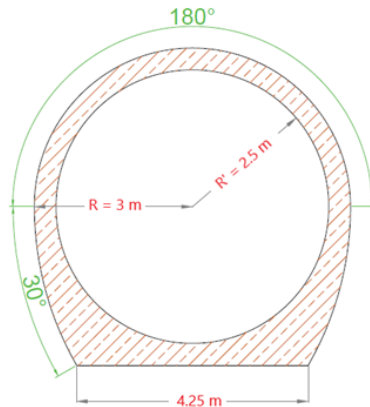
دسته‌ای دیگر از محققین با ساخت مدل‌های فیزیکی مختلف به مطالعه‌ی رخداد زلزله و تقاطع تونل و گسل فعال پرداخته‌اند. پژوهش انجام شده توسط بوریچ و همکاران در سال ۱۹۸۹ شاید اولین تحقیق مدون باشد که در آن رفتار تونل‌ها در اثر گسلش با استفاده از دستگاه سانتریفیوژ مورد بررسی قرار گرفته است. پژوهش مذکور با هدف بررسی اثرات گسل‌های واقع در مسیر تونل متروی شهر لس‌آنجلس انجام شد [۱۶]. اساکورا و همکاران در سال ۲۰۰۷ با ساخت مدل فیزیکی محل تقاطع تونل و گسل فعال، به بررسی نحوه‌ی تخریب لاینینگ بعد از حرکت گسل پرداختند [۱۷]. کیانی و همکاران در سال ۲۰۱۶ با مدل‌سازی فیزیکی سگمنت بتنی تونل دریافتند که آسیب‌ها در این نوع نگهداری بیشتر در محل اتصال قطعات بتنی متمرکز می‌باشد [۴]. اما مطالعات فیزیکی محدود به ابعاد بسیار کوچک تنها جهت درک مکانیزم رفتاری تونل در تقاطع با گسل می‌شوند.

بخشی دیگر از تحقیقات انجام شده در این حوزه مربوط به مدل‌سازی عددی می‌باشد که محققین با ساخت مدل‌های عددی تقاطع تونل و گسل فعال، نحوه تخریب و میزان خسارت را پیش‌بینی نموده‌اند. گرگور و همکاران در سال ۲۰۰۷ به بررسی رفتار تونل دو قلوئی راه در کالیفرنیا در اثر جابجایی احتمالی گسل کورونادو با استفاده از روش عددی پرداختند. این محققین با اعمال حرکت گسل نشان دادند که تونل در اثر این اتفاق دچار ناپایداری خواهد شد و در ادامه پیشنهاداتی در خصوص نحوه اتصال قطعات بتنی پیش‌ساخته برای افزایش انعطاف‌پذیری در برابر جابجایی‌های احتمالی گسل ارائه نموده‌اند. اما در خصوص بررسی نحوه‌ی عملکرد این درزه‌ها مطالعه‌ای صورت نگرفته است [۱۸]. وانگ و همکاران در سال ۲۰۱۲ استفاده از اتصالات انعطاف‌پذیر در منطقه‌ی گسله را مورد مطالعه قرار دادند. در این تحقیق با چشم‌پوشی از بسیاری از موارد، درزه‌های انعطاف‌پذیر در ابتدا و انتهای زون گسله در لاینینگ بتنی مدل‌سازی شده و در نهایت کارایی استفاده از این نوع اتصالات بر کاهش آسیب وارد بر تونل، در اثر لغزش گسل بررسی شده است. میزان کاهش آسیب‌های وارد بر لاینینگ در هنگام استفاده از این روش به‌طور دقیق گزارش نشده است و به‌طور کیفی از عملکرد مثبت استفاده از این اتصالات برای کاهش آسیب‌ها یاد شده است. همچنین این محققین نشان دادند که با وجود یک جابجایی ثابت، حرکت گسل در حالت امتداد لغز نسبت به گسل نرمال و معکوس خرابی بیشتری در تونل ایجاد خواهد کرد [۱۹]. لئو و یانگ در سال ۲۰۱۳ با ساخت مدلی سه بعدی از محل تقاطع تونل و گسل فعال، تأثیر حرکت گسل بر لاینینگ بتنی تونل را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج این تحقیق نشان داد که حرکت گسل باعث وارد آمدن فشار زیادی به لاینینگ شده و این فشار با فاصله گرفتن از گسل رفته‌رفته کم خواهد شد. همچنین پس از انجام این مدل‌سازی مشخص شد که با کم شدن طول قطعات پیش‌ساخته بتنی تمرکز تنش کمتری در محل تقاطع تونل با گسل فعال ایجاد خواهد شد [۲۰]. قدیمی و همکاران در سال ۲۰۱۹ با مدل‌سازی تقاطع تونل و گسل فعال به بررسی تأثیر حرکت گسل پرداختند. نتایج حاصله نشان داد که با افزایش زاویه شیب گسل جابجایی ایجاد شده ناشی از حرکت گسل در لاینینگ کاهش می‌یابد، اما در این مقاله به موضوع نحوه حفاظت از لاینینگ اشاره‌ای نشده است [۲۱]. آیگار و گکسی آغلو در سال ۲۰۲۱ سیستم نگهداری خاصی متشکل از لاینینگ‌های داخلی و خارجی



شکل ۲- نقشه زمین شناسی و مقطع زمین شناسی از گستره طرح سردشت و موقعیت سد و تونل انتقال آب (Kph): تناوب ماسه سنگ دگرگون شده و فیلیت، Kv: سنگ های آتشفشانی دگرگون شده، Om: افیولیت ملانژ) [۲۴]

مشخصات هندسی تونل و لاینینگ بتنی در شکل ۳ نشان داده شده است. با توجه به وجود گسل های متعدد در منطقه، از جمله گسل زاگرس، پیرانشهر، نیروان، ورچک و زیرمرگ، تونل بلند سردشت در مسیر خود مجبور به قطع چند گسل خواهد بود.



شکل ۳- ابعاد مقطع حفاری و مقطع نهایی تونل بعد از اعمال لاینینگ بتنی [۲۴]

گسل زیرمرگ با توجه به ویژگی هایی چون طول زون خرد شده و پتانسیل حرکت گسل به عنوان مهم ترین ساختار زمین شناسی مؤثر بر تونل سردشت معرفی گردیده است [۲۵]. از همین رو تمرکز اصلی این مقاله، بر محل تقاطع گسل

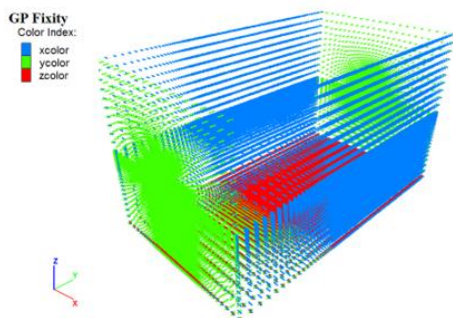
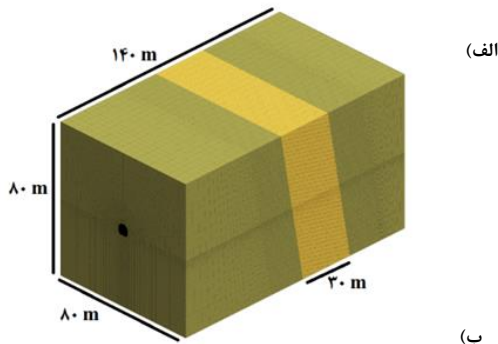
همراه با ملاحظات اجرایی خاصی را برای به حداقل رساندن خسارات حرکت گسل ارائه نمودند و با استفاده از نرم افزار المان محدود دو بعدی Phase2 به بررسی عملکرد این سیستم پرداختند [۲۲].

مرور مطالعات قبلی انجام شده نشان می دهد که تمرکز اصلی در برخورد تونل با زون گسله بایستی بر روی متمرکز کردن خسارت و جلوگیری از تخریب کامل تونل بر اثر جابجایی ناگهانی گسل باشد. همچنین بایستی توجه نمود که تونل در محل زون گسله مستعد خسارات قابل ملاحظه بدلیل جابجایی های ناشی از زمین لرزه خواهد بود [۲۳]. اما به دلیل پیچیدگی موضوع و شرایط ژئومکانیکی مختص هر پروژه، راهکاری قطعی در زمینه طراحی لاینینگ در مواجهه با زون گسله مستعد جابجایی موجود نمی باشد. هدف اصلی در این مقاله ارائه روشی جامع برای طراحی تونل ها در تقاطع آن با گسل فعال بر مبنای تحلیل عددی سه بعدی می باشد. برای این منظور با بهره گیری از نرم افزار تفاضل محدود FLAC3D، ابتدا به تعیین زون خسارت دیده در محل تقاطع تونل انتقال آب سد و نیروگاه سردشت در محل تقاطع آن با گسل فعال زیرمرگ پرداخته و در ادامه با بهره گیری از روش های اضافه حفاری پشت لاینینگ و لاینینگ انعطاف پذیر اقدام به طراحی و بهینه سازی پوشش بتنی در این زون شده است.

۲- معرفی طرح سردشت

سد و نیروگاه سردشت در شمال غربی ایران و در جنوب غربی شهر سردشت از استان آذربایجان غربی قرار گرفته است. از جمله اهداف اصلی پیش بینی شده ی طرح، تولید برق می باشد. برای این منظور، جهت انتقال آب از سد به نیروگاه، تونل انتقال آبی به طول تقریبی ۴۳۰۰ متر در نظر گرفته شده است. نقشه زمین شناسی و مقطع زمین شناسی از گستره طرح سردشت و موقعیت سد و تونل انتقال آب و جنس سنگ های منطقه مورد مطالعه در شکل ۲ آورده شده است. مقطع تونل به شکل نعل اسبی بوده و روش حفاری تونل به صورت NATM در نظر گرفته شده است. سیستم نگهداری تونل نیز از نوع پوشش بتن مسلح (بتن ریزی برجا) بوده و پس از اعمال لاینینگ بتنی، قطر نهایی به طول ۵ متر حاصل خواهد شد [۲۴].

تونل از نرم‌افزار سه بعدی FLAC3D جهت مدل‌سازی تقاطع تونل و گسل بهره گرفته شد. از آنجاکه که نرم‌افزارهای عددی المان مجزا دارای محدودیت‌های متعددی در خصوص ابعاد مدل در سه بعد می‌باشند و از آنجاکه بر اساس شرایط ژئومکانیکی منطقه می‌توان شرایط را در اطراف گسل شبه پیوسته در نظر گرفت، از نرم‌افزار تفاضل محدود FLAC3D بهره گرفته شد. با توجه به ابعاد مدل، مدل از اتصال سه قسمت فرودیواره، فرادیواره و زون گسله همانطور که در شکل ۴ الف نشان داده شده است، تشکیل شده است. مقطع تونل نیز دقیقاً مطابق با ابعاد در نظر گرفته شده در مرحله طراحی مدل‌سازی شد. همچنین بر اساس مطالعات قبلی انجام شده در این منطقه، نسبت تنش افقی به قائم یک در نظر گرفته شد [۲۴]. شرایط مرزی در نظر گرفته شده برای مدل قبل از اعمال حرکت گسل در شکل ۴ ب نشان داده شده است. سپس با انجام حفاری مرحله‌ای و اعمال پوشش بتنی مدل عددی نهایی تقاطع تونل سردشت و گسل زیرمرگ حاصل شد که در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۴- الف) نمایی از مدل ساخته شده تقاطع تونل و گسل زیرمرگ، ب) شرایط مرزی قبل از اعمال جابجایی گسل.

زیرمرگ و تونل سردشت خواهد بود. مهم‌ترین مشخصات گسل زیرمرگ در جدول ۱ نشان داده شده است. ضخامت روباره در محل برخورد تونل با گسل ۲۷۰ متر می‌باشد. مشخصات توده سنگ مسیر تونل در محل برخورد با گسل بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی انجام شده بر روی سنگ بکر و سیستم‌های رده‌بندی توده سنگ RMR و GSI با استفاده از نرم‌افزار RocData تعیین شده است. خواص زون گسله نیز بر اساس آزمون‌های آزمایشگاهی و بر اساس معیار کولمب تعیین شده است، که این اطلاعات در جدول ۲ آورده شده است [۲۴].

جدول ۱- مشخصات اصلی گسل زیرمرگ [۲۴]

نام گسل	زیرمرگ
نوع گسل	امتداد لغز
متراژ (m)	۰+۷۱۵۰
شیب گسل (Deg)	۸۰
راستای گسل	N40W
طول زون خرد شده (m)	۲۵-۳۰
پتانسیل حرکت گسل (cm)	۳۰

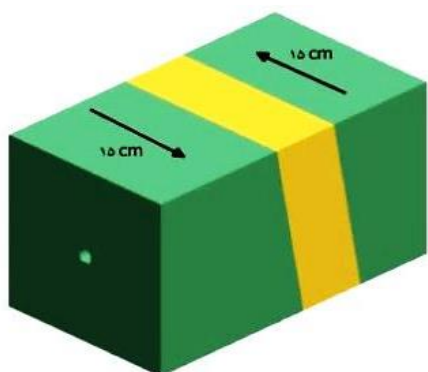
جدول ۲- خواص مکانیکی توده سنگ مسیر تونل و زون

خرد شده‌ی گسل زیرمرگ [۲۴]

پارامترها	توده سنگ	زون گسله
وزن مخصوص (Kg/m^3)	۲۷۰۰	۲۱۰۰
مدول تغییرشکل (GPa)	۴	۰/۲
نسبت پواسون	۰/۲۹	۰/۳۵
مقاومت فشاری تک‌محوره بکر (MPa)	۲۷-۳۹	---
پارامتر هوک و براون سنگ بکر (m_i)	۷	---
شاخص مقاومت زمین‌شناسی (GSI)	۴۵±۵	---
زاویه‌ی اصطکاک داخلی ($Deg.$)	۳۰	۱۷
چسبندگی (MPa)	۰/۳۵	۰/۱

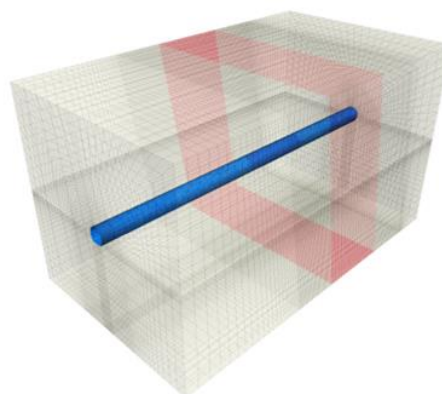
۳- مدل‌سازی عددی تقاطع تونل و گسل

نظر به اینکه انجام این تحلیل بصورت عددی نیازمند بهره‌گیری از نرم‌افزاری سه‌بعدی می‌باشد و نظر به ضخامت قابل ملاحظه زون گسله و ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ مسیر



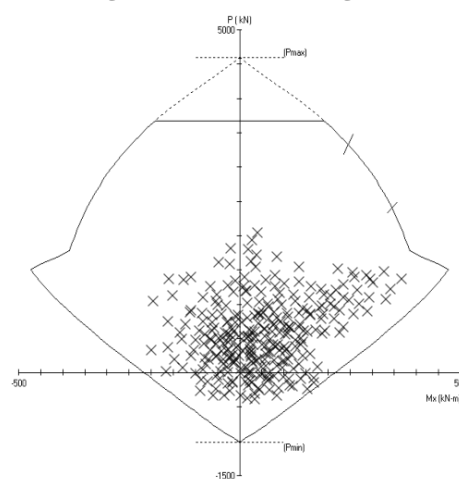
شکل ۷- نحوه‌ی حرکت فرودپیواره و فرادپیواره گسل

بعد از اعمال حرکت گسل مشخص شد که میزان جابجایی نقاط مختلف در مدل متفاوت خواهد بود، بدین صورت که وقتی نقاط گره‌ی نزدیک به مرزهای مدل هر کدام ۱۵ سانتیمتر جابجا شوند، محدوده‌ی دربرگیرنده‌ی لاینینگ در مرکز مدل جابجایی کمتری خواهد داشت. به همین دلیل برای در نظر گرفتن بحرانی‌ترین حالت ملاک سنجش جابجایی ۱۵ سانتیمتری حرکت گسل، جابجایی دیواره‌ی پشت لاینینگ در نظر گرفته شد. در مراحل اولیه مدل‌سازی، در مرحله به تعادل رسیدن مدل، مرزهای جانبی و کف مدل در جهت محور x ثابت شدند. در این مرحله برای این که گسل قادر به حرکت باشد، مرزهای جانبی و کف مدل در فرودپیواره و فرادپیواره همانطور که در شکل ۸ نشان داده شده است، در جهت محور x آزاد شده و با تغییر امکان جابجایی بزرگ مقیاس و اعمال سرعت در راستای محور x بصورت تعداد معینی گام محاسباتی، میزان جابجایی مورد نظر اعمال شد. برای بررسی تاثیر و تعیین تعداد گام‌های محاسباتی در اعمال جابجایی گسل، حرکت گسل در گام‌های مختلف انجام شد تا حداکثر گامی که قادر به مدل‌سازی دقیق‌تر حرکت گسل می‌باشد مشخص شود. در نهایت مشخص شد که از تعداد حدود ۳۲۰ گام محاسباتی به بعد لاینینگ جابجایی یکنواختی نداشته و بررسی وضعیت لاینینگ در اثر حرکت به میزان ۱۵ سانتیمتر، مقذور نمی‌باشد، به همین دلیل تعداد حدود ۳۲۰ گام محاسباتی انتخاب گردید. میزان جابجایی قسمت‌های مختلف لاینینگ بعد از حرکت گسل در شکل ۸ ارائه شده است. همان‌طور که در شکل نشان داده شده است، لاینینگ در طول مسیر تونل، هم‌زمان با حرکت فرودپیواره و فرادپیواره حرکت کرده و به میزان ۱۵ سانتیمتر جابجا شده است؛ اما با نزدیک شدن از فرودپیواره و فرادپیواره به زون گسله



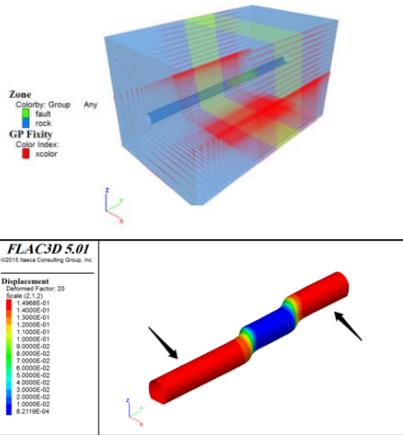
شکل ۵- لاینینگ بتنی نهایی پس از حفاری مرحله‌ای

برای بررسی پایداری لاینینگ بتنی قبل از حرکت گسل، از نمودار ظرفیت باربری لاینینگ که با استفاده از نرم‌افزار PCA رسم شده است، استفاده شد. شکل ۶ وضعیت پایداری لاینینگ بتنی تونل سردشت را نشان می‌دهد.

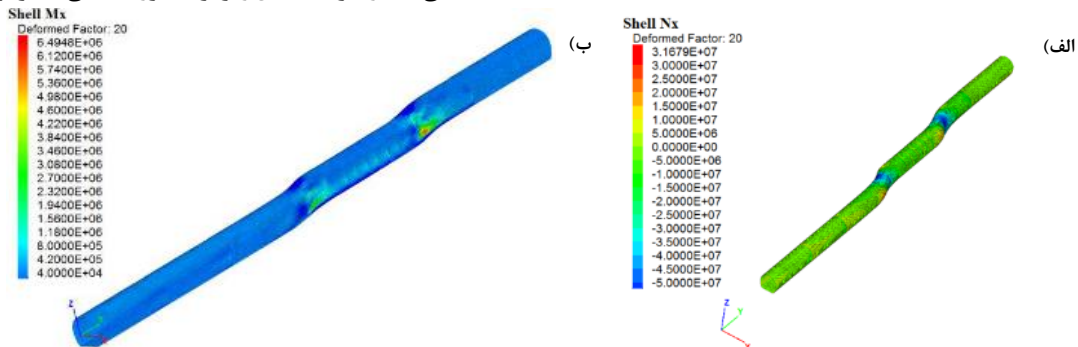


شکل ۶- نمودار بررسی پایداری لاینینگ بتنی تونل سردشت قبل از حرکت گسل

به طور کلی میزان پتانسیل حرکت در نقاط مختلف گسل‌ها ثابت نبوده و نیز میزان جابجایی در عمق بیشتر از میزان جابجایی در سطح می‌باشد [۱]. بر اساس گزارش‌های مطالعات لرزه‌خیزی منطقه، میزان پتانسیل حرکت گسل زیرمرگ حداکثر ۳۰ سانتیمتر گزارش شده است [۲۵]. برای ساخت مدل عددی حرکت گسل زیرمرگ، فرودپیواره و فرادپیواره هر کدام به میزان ۱۵ سانتیمتر در خلاف جهت هم مطابق شکل ۷ حرکت داده شوند تا جابجایی ۳۰ سانتیمتری گسل زیرمرگ حاصل گردد.

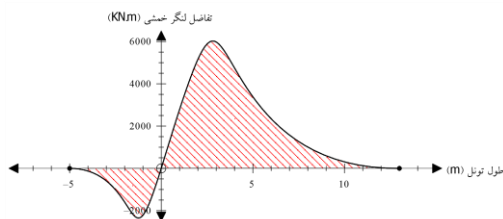


شکل ۸- آزادسازی شرایط مرزی در راستای محور X و اعمال جابجایی بعد از حرکت گسل زیرمرگ (بزرگ‌نمایی ۲۰ برابری)



شکل ۹- میزان (الف) نیروی محوری و (ب) لنگر خمشی ایجاد شده در لاینینگ بتنی (۲۰ برابر بزرگ‌نمایی)

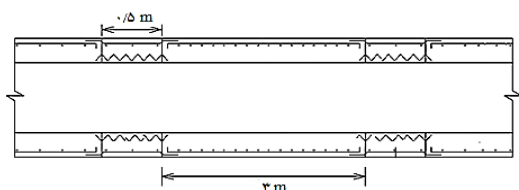
فرودپیواره و ۵ متر دیگر در زون گسله واقع است. همچنین حرکت گسل در فرادپیواره باعث می‌شود که ۱۶ متر از طول تونل، شامل ۱۲ متر در فرادپیواره و ۴ متر در زون گسله، لنگر خمشی بیش از ظرفیت لاینینگ، متحمل شود.



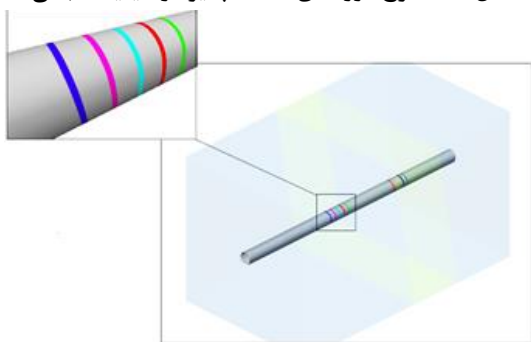
شکل ۱۰- تغییرات لنگر خمشی نسبت به ظرفیت لاینینگ بعد از حرکت گسل در فرودپیواره

و به دلیل ثابت بودن لاینینگ در زون گسله، رفته‌رفته از میزان جابجایی لاینینگ کاسته شده تا در نهایت در داخل زون گسل به صفر می‌رسد. برای بررسی تاثیر جابجایی بر میزان تخریب، از نیروی برشی و لنگر خمشی بهره گرفته شد که نتایج آن در شکل ۹ آورده شده است.

با توجه به اینکه طولی از تونل که توسط لنگر خمشی تخریب می‌شود، به مراتب بیشتر از طول زون تخریب در اثر نیروی محوری است و در شکل ۶ برای لاینینگ بتنی نیز مشخص است، تخمین طول زون خرابی نهایی بر اساس ظرفیت لنگر خمشی لاینینگ انجام گرفت. تغییرات لنگر خمشی وارد بر لاینینگ بعد از حرکت گسل در طول مسیر تونل در فرودپیواره و فرادپیواره به ترتیب در اشکال ۱۰ و ۱۱ ارائه گردیده است. در این اشکال، محور قائم تفاضل لنگر خمشی وارد بر لاینینگ و ظرفیت خمشی لاینینگ بوده و نقطه‌ی صفر در محور افقی، نمایانگر مرز بین توده سنگ و زون گسله می‌باشد و جهات چپ و راست به ترتیب معرف حرکت به سمت فرادپیواره و فرودپیواره می‌باشد. همانطور که از این اشکال مشخص است، ۱۸ متر از طول تونل در اثر حرکت فرودپیواره، لنگر خمشی بیش از ظرفیت خمشی لاینینگ تونل متحمل می‌شود که از این مقدار ۱۳ متر از این طول در

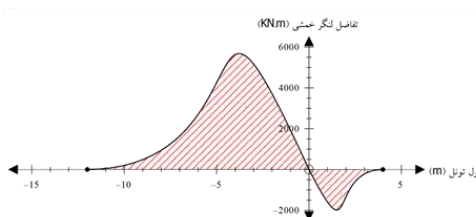


شکل ۱۲- طرح درزه‌های انعطاف‌پذیر در لاینینگ بتنی



شکل ۱۳- نحوه‌ی قرارگیری مفاصل انعطاف‌پذیر در طول محور تونل

بعد از مدل‌سازی مفاصل برای بررسی نحوه عملکرد آن‌ها، گسل حرکت داده شد. شکل ۱۴ نحوه‌ی حرکت لاینینگ را بعد از حرکت گسل زیرمرگ با وجود درزه‌های انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد. این مفاصل باعث انعطاف‌پذیری هرچه بیشتر لاینینگ شده و لاینینگ توانسته است در بخش‌های بیشتری متناسب با حرکت گسل حرکت کند. نحوه‌ی تأثیر درزه‌های انعطاف‌پذیر در کاهش آسیب وارد بر لاینینگ بتنی در اثر لغزش گسل در اشکال ۱۵ و ۱۶ قابل مشاهده است. این درزه‌ها ضمن کاهش طول خرابی در لاینینگ بتنی تونل باعث کاهش شدت خرابی نیز شده‌اند، به طوری که طول خرابی در فرودپواره از ۱۸ متر به حدود ۸ متر رسیده است و نیز حداکثر لنگر خمشی وارد بر لاینینگ در تفاضل با ظرفیت خمشی لاینینگ را از حدود ۶۰۰۰ به حدود ۱۱۰۰ کیلو نیوتن در متر کاهش داده‌اند. همچنین در قسمت فرادپواره نیز زون خرابی از ۱۶ متر به ۸ متر و لنگر خمشی از حدود ۵۶۰۰ به حدود ۱۰۰۰ کیلو نیوتن در متر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۱۱- تغییرات لنگر خمشی نسبت به ظرفیت لاینینگ بعد از حرکت گسل در فرادپواره

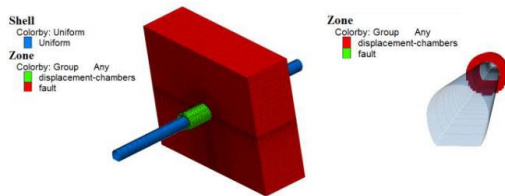
۴- حفاظت لاینینگ بتنی تونل سردشت در برابر لغزش گسل زیرمرگ

۴-۱- مدل‌سازی عددی لاینینگ انعطاف‌پذیر

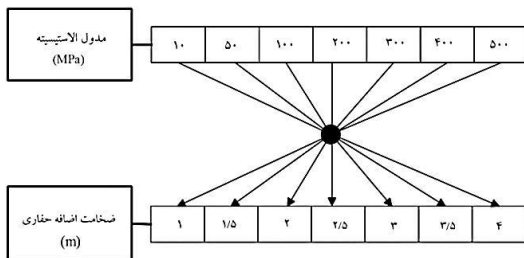
در اجرای روش لاینینگ انعطاف‌پذیر، مفاصل انعطاف‌پذیر در طول زون خرابی لاینینگ، باعث کاهش آسیب وارد بر لاینینگ در اثر لغزش گسل می‌شوند. اولین قدم برای مدل‌سازی این مفاصل تعیین طول آن‌ها خواهد بود. طول این مفاصل ۴۵-۵۰ سانتیمتر در منابع گزارش شده است [۹]. در مدل عددی ساخته شده، طول کمترین المان در راستای محور طولی تونل ۵۰ سانتی‌متر می‌باشد و بر این اساس طول مفاصل انعطاف‌پذیر نیز ۵۰ سانتیمتر در نظر گرفته شد. با بررسی منابع مختلف، به طور کلی می‌توان گفت این مفاصل باید از مقاومت کمی برخوردار باشند و نیز در مقابل نشت آب نیز عایق بمانند. تجربیات حاصل از طراحی لرزه‌ای سازه‌های سطحی نشان می‌دهد که ساخت این مفاصل با استفاده از بتن انعطاف‌پذیر و لاستیک‌های مخصوص سازه‌های آبی قابل انجام است. بتن‌های انعطاف‌پذیر علاوه بر شکل‌پذیری بالا، در مقابل آب هم از مقاومت خوبی برخوردار می‌باشند [۱].

برای ایجاد مدل عددی، مفاصل به فاصله‌ی طولی ۳ متر از یکدیگر در طول زون خرابی اعمال شدند که در مجموع ۹ مفصل، ۵ مفصل در فرودپواره و ۴ مفصل در فرادپواره طراحی شده است. همچنین طرح سازه‌ای مفاصل در شکل ۱۲ ارائه شده است. در شکل ۱۳ نحوه‌ی قرارگیری این مفاصل در طول محور تونل نشان داده شده است. برای مفصل‌های انعطاف‌پذیر مقدار مدول الاستیسیته ۰/۱۶ گیگاپاسکال و ضریب پواسون ۰/۲۵ در نظر گرفته شد.

پشت لاینینگ با مشخصات مقاومتی متفاوت، در ادامه سعی شده است تا انواع مواد پرکننده با مقاومت‌های متفاوت مورد بررسی قرار گیرد. بنابراین ۷ مدول الاستیسیته‌ی متفاوت، در بازه‌ی ۱۰ تا ۵۰۰ مگاپاسگال انتخاب گشت. سپس برای هر مدول، اضافه حفاری با ضخامت‌های مختلف مدل‌سازی شد و در مجموع با در نظر گرفتن ۷ مدول الاستیسیته با ۷ ضخامت مختلف، ۴۹ مدل ساخته شد. در شکل ۱۸ خواص در نظر گرفته شده برای مدل‌های ساخته شده نشان داده شده است.

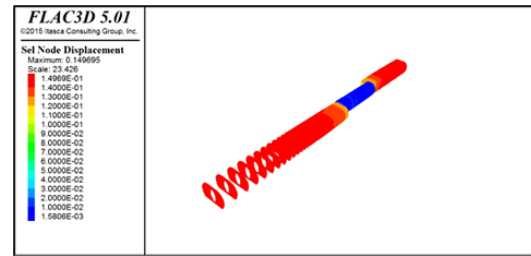


شکل ۱۷- نمونه‌ای از نحوه قرارگیری پرکننده در اطراف لاینینگ در طول زون خرابی

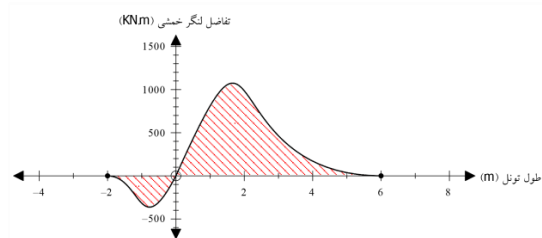


شکل ۱۸- نمای کلی از انواع مدل‌های ساخته شده جهت مدل‌سازی اضافه‌حفاری پشت لاینینگ

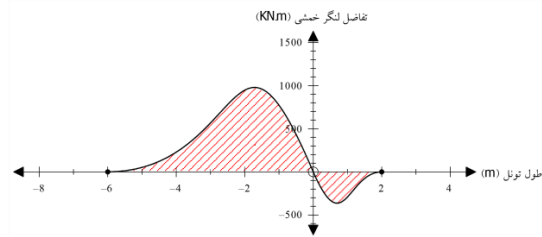
پس از حل مدل‌های ساخته شده در نرم‌افزار *FLAC3D*، مترائ زون خرابی بر اساس نمودار ظرفیت باربری لاینینگ مورد بررسی قرار گرفت. نحوه‌ی عملکرد این روش در ضخامت‌های مختلف و مواد پرکننده‌ی متفاوت در شکل ۱۹ قابل مشاهده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهند که در مدول ۱۰ مگاپاسگال به‌طور کلی با افزایش طول اضافه‌حفاری مترائ زون خرابی در لاینینگ کاهش یافته است. این روند کاهشی در مدل‌های ساخته شده با دیگر مدول‌ها نیز وجود دارد. با افزایش طول اضافه‌حفاری نیروی کمتری از جانب حرکت گسل به لاینینگ وارد می‌شود. به همین دلیل مترائ زون خرابی کاهش می‌یابد. در نهایت در طول ۴ متری



شکل ۱۴- نحوه‌ی جابجایی لاینینگ بتنی مجهز به درزه‌های انعطاف‌پذیر بعد از حرکت گسل زیرمرگ



شکل ۱۵- تغییرات لنگر خمشی لاینینگ انعطاف‌پذیر بعد از حرکت گسل، فرودپواره



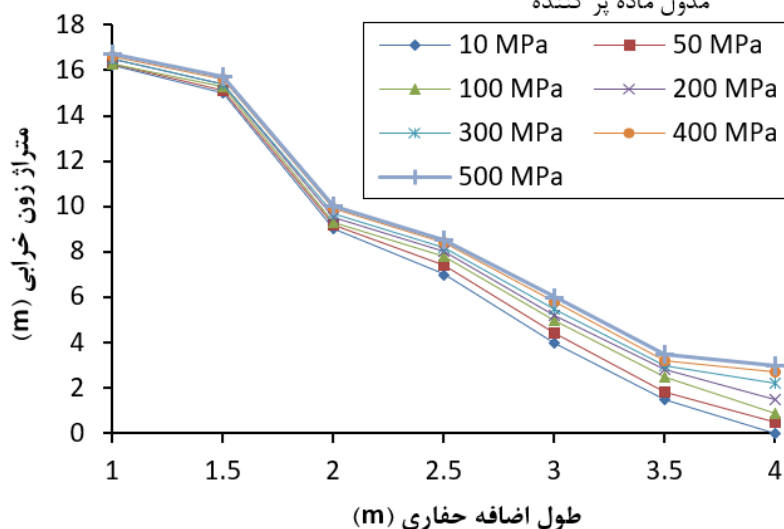
شکل ۱۶- تغییرات لنگر خمشی لاینینگ انعطاف‌پذیر بعد از حرکت گسل، فرادپواره

۲-۴- مدل‌سازی عددی اضافه‌حفاری پشت لاینینگ

برای مدل‌سازی اضافه‌حفاری پشت لاینینگ باید سه عامل طول اضافه‌حفاری در امتداد محور تونل، عمق حفاری پشت لاینینگ و نوع ماده‌ی پرکننده مشخص شوند. طول اضافه‌حفاری در امتداد تونل، برابر با طول زون خرابی تعیین شده در فرودپواره در بخش قبل، ۱۸ متر انتخاب شد. برای بررسی تأثیر عمق اضافه‌حفاری پشت لاینینگ، مدل‌های مختلفی با طول‌های متفاوت ساخته شد. در تمامی مدل‌ها میزان اضافه‌حفاری در دو طرف دیواره‌ی تونل یکسان و متقارن مطابق شکل ۱۷ در نظر گرفته شد. برای انتخاب نوع ماده‌ی پرکننده همان‌طور که در بخش‌های قبل نیز اشاره شد، از مواد متنوعی می‌توان استفاده کرد. به دلیل همین تنوع مواد ماده پرکننده‌ی

می‌گیرد و اختلاف در مترژ زون خرابی لاینینگ، بین کمترین و بیشترین مدول با افزایش طول اضافه‌حفری افزایش می‌یابد. به‌عنوان مثال در اضافه‌حفری به طول ۴ متر، اختلاف مترژ ناحیه آسیب دیده در مدول ۵۰۰ مگاپاسگال و ۱۰ مگاپاسگال حدود ۳/۵ متر است و با کاهش ضخامت اضافه‌حفری این اختلاف کمتر می‌شود. بنابراین با افزایش صلبیت ماده‌ی پرکننده، علاوه بر افزایش طول زون خرابی در لاینینگ بر شدت خرابی‌ها نیز افزوده خواهد شد.

با مدول ۱۰ مگاپاسگال مترژ ناحیه‌ی خرابی به صفر رسیده است. در اضافه‌حفری با طول ثابت از مدول ۱۰ مگاپاسگال تا ۵۰۰ مگاپاسگال رفته‌رفته طول زون خرابی افزایش یافته است. علت آن این است که با افزایش صلبیت ماده‌ی پرکننده، انرژی بیشتری در اثر حرکت گسل به لاینینگ وارد می‌شود. این روند افزایشی در همه‌ی طول‌های اضافه‌حفری مدل‌سازی شده در شکل ۱۲ قابل مشاهده است. نکته‌ی قابل توجه دیگر این است که با افزایش ضخامت اضافه‌حفری، تغییر صلبیت ماده‌ی پرکننده تأثیر بیشتری در میزان مترژ زون خرابی در لاینینگ خواهد گذاشت. با افزایش ضخامت اضافه‌حفری، ماده‌ی پرکننده‌ی بیشتری بین لاینینگ و دیواره‌ی تونل قرار



شکل ۱۹- مترژ زون خرابی در ضخامت و مدول‌های متفاوت

در اثر حرکت گسل زیرمرگ لاینینگ بتنی تونل انتقال آب سردشت در ۱۸ متر از طول لاینینگ بتنی در فرودپارچه و ۱۶ متر در فرادپارچه در اثر حرکت گسل زیرمرگ دچار آسیب شود. برای بررسی نحوه‌ی جلوگیری از آسیب‌های وارده بر لاینینگ، از دو روش اضافه‌حفری پشت لاینینگ و لاینینگ انعطاف‌پذیر استفاده شد. نتایج مدل‌سازی این دو روش نیز نشان داد که با اضافه‌حفری به طول ۴ متر و با پرکننده‌ای با مدول الاستیسیته‌ی ۱۰ مگاپاسگال، لاینینگ بتنی تونل انتقال آب سردشت در مقابل حرکت گسل زیرمرگ دچار آسیب نخواهد شد. همچنین با مدل‌سازی عددی لاینینگ انعطاف‌پذیر، با ساخت درزه‌های ۰/۵ متری و به فاصله‌ی ۳ متر از یکدیگر، مشخص گردید که این روش ضمن کاهش

۵- نتیجه‌گیری

با وجود توصیه‌های اکید برای عدم برخورد سازه‌های زیرزمینی و گسل‌های فعال، در برخی موارد مانند تونل انتقال آب سردشت، به دلیل مسائل فنی و اقتصادی دستیابی به این امر امکان‌پذیر نیست. تجربیات حاصل از حوادث گذشته نیز نشان داد که در صورت عدم توجه به این موضوع و رخداد زلزله در منطقه، حرکت گسل می‌تواند باعث آسیب جدی سازه‌ی نگهداره‌ی تونل شود. بنابراین باید برای کاهش صدمه‌ی وارد به لاینینگ بتنی تونل تدابیری در نظر گرفته شود. نتایج مدل‌سازی عددی انجام شده در این تحقیق نشان می‌دهد که

۶- سپاسگزاری

بدینوسیله از جناب آقای مهندس کوروش کشوریان به دلیل راهنمایی‌های ارزشمندشان در انجام این تحقیق صمیمانه تشکر می‌شود.

بیش از ۵۰ درصدی طول خرابی به مقدار زیادی از شدت خرابی‌ها خواهد کاست. علاوه بر موارد ذکر شده در خصوص تاثیر این دو روش بر کاهش زون خسارت دیده، عواملی فنی و اقتصادی مواردی هستند که در انتخاب سیستم مناسب تاثیرگذار می‌باشند.

۷- منابع

- [۱] اسماعیلی، م. ۱۳۹۳. تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.
- [2] Wang, J. N. "Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach." Parsons Brinckerhoff, 1993.
- [3] Hashash, Y. M., Hook, J. J., Schmidt, B., John, I., and Yao, C. Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology* 16, no. 4 (2001): 247-293.
- [4] Kiani, M., Akhlaghi, T., and Ghalandarzadeh, A. "Experimental modeling of segmental shallow tunnels in alluvial affected by normal faults." *Tunnelling and Underground Space Technology* 51, (2016): 108-119.
- [5] Wang, W. L., Wang, T. T., Su, J. J., Lin, C. H., Seng, C. R., and Huang, T. H. "Assessment of damage in mountain tunnels due to the Taiwan Chi-Chi earthquake." *Tunnelling and underground space technology*, 16, no. 3 (2001): 133-150.
- [6] Caulfield, R., Kieffer, D. S., Tsztoo, D. F., and Cain, B. "Seismic design measures for the retrofit of the Claremont tunnel. In Jacobs Associates." *Rapid Excavation and Tunneling Conference (RETC) Proceedings*. San Francisco: Jacobs Associates, 2005.
- [7] Oroujkandi, M. A. "Effect of earthquake vibrations on critical tunnel infrastructure." *Cumhuriyet Science Journal* 36, no. 4 (2015): 2335-2341.
- [8] Kawashima, K. "Seismic design of underground structures in soft ground: A review." *Geotechnical aspects of underground construction in soft ground*. Balkema, Rotterdam, 2000.
- [9] Russo, M., Germani, G., and Amberg, W. "Design and construction of large tunnel through active faults: a recent application." In *Proceedings International Conference of Tunneling and Underground Space Use*, Istanbul, 2002.
- [10] Zhengzheng, W., Bo, G., Yusheng, S., and Wanjun, Z. "Study on the flexible lining of the tunnel in the active faulted zone." In *ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK*, 2009.
- [11] Ulusay, R., Aydan, O. and Hamad, M. "The behaviour of structures built on active fault zones: examples from the recent earthquakes of turkey." *International journal of earthquake engineering* 37, no. 1 (2002): 149-167.
- [12] Wang, Z., Gao, B., Jiang, Y., and Yuan, S. "Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake." *Science in China Series E: Technological Sciences* 52, no.2 (2009): 546-558.
- [13] Wang, Z. Z., and Zhang, Z. "Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels

- with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake." *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 45, (2013): 45-55.
- [14] Li, T. "Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction." *Bulletin of Engineering Geology and the Environment* 71, no.2 (2012): 297-308.
- [15] Shimizu, M., Suzuki, T., Kato, S., Kojima, Y., Yashiro, K., and Asakura, T. "Historical damages of tunnels in Japan and case studies of damaged railway tunnels in the Mid Niigata prefecture earthquakes." *Underground space-the 4th dimension of metropolises*, 2007.
- [16] Burridge, P. B., Scott, R. F., and Hall, J. F. "Centrifuge study of faulting effects on tunnel." *Journal of geotechnical engineering* 115, no. 7 (1989): 949-967.
- [17] Asakura, T., Shiba, Y., Matsuoka, S., Oya, T., and Yashiro, K. "Damage to mountain tunnels by earthquake and its mechanism." In *Proceedings-Japan Society of Civil Engineers*, 2000.
- [18] Gregor, T., Garrod, B., and Young, D. "Analyses of underground structures crossing an active fault in Coronado, California." In *Proceedings of the World Tunnel Congress AITES, Annual General Assembly*. Springer, Berlin, 2007.
- [19] Wang, Z. Z., Zhang, Z., and Gao, B. "The seismic behavior of the tunnel across active fault." In *Proc. 15th World Conf. Earthq. Eng., Lisbon, Portugal*, 2012.
- [20] Luo, X., & Yang, Z. "Finite element modeling of a tunnel affected by dislocation of faults." *APCOM & ISCM*. Singapore, 2013.
- [21] Ghadimi Chermahini, A., and Tahghighi, H. "Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: a case study on the Sabzkouh segmental tunnel." *Geomechanics and Geoengineering* 14, no. 3 (2019): 155-166.
- [22] Shenk, Y.S., Wang, Z.Z., Yu, J., Zhang, X. and Gao, B. "Shaking table test on flexible joints of mountain tunnels passing through normal fault." *Tunnelling and Underground Space Technology* 98 (2020): 103299.
- [23] Aygar, E.B. & Gokceoglu, C. "A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (T9 Tunnel, Ankara–Sivas High-Speed Railway Project, Turkey)." *Environmental Earth Sciences* 80, no. 37 (2021).
- [۲۴] مطالعات و طراحی سد و نیروگاه سردشت، مطالعات مرحله اول تونل بلند، گزارش مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگ، شرکت مهندسی سپاسد، دی ماه ۱۳۸۹.
- [۲۵] مطالعات طراحی و عملیات اجرایی سد و نیروگاه سردشت، گزارش لرزه زمین‌ساخت و خطر لرزه‌خیزی، شرکت مهندسی سپاسد، شهریور ماه ۱۳۸۹.



Design and optimization of tunnel lining at the intersection of Sardasht water transmission tunnel with the Zirmarg active fault

Farshad Mohammadi Firooz¹, Reza Rahmamejad², Mojtaba Bahaaddini^{3*}

- 1- MSc of Rock Mechanics, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- 2- Professor, Department of Mining Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Iran.
- 3- Associate Professor, School of Mining Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Iran.

Received: 10. January. 2024 Accepted: 05. March. 2024
(Corresponding author: m.bahaaddini@ut.ac.ir)

Keywords

Active Fault
Excessive excavation
Flexible lining
Sardasht tunnel
Finite difference method

English Extended Abstract

Summary

This paper aims to investigate the effect of the Zirmarg movement, as an active fault, on the stability of water transmission tunnel of Sardasht dam and power plant project. To this end, a preliminary analysis was undertaken on seismicity history of the studied area and then using a finite difference code, stability analyses were carried out at the intersection of tunnel with Zirmarg fault. Results of numerical analyses of fault movement on lining showed that 18 meters of the lining in the footwall and 16 meters in the hanging regions are damaged through the fault movement. To prevent damages on lining, two methods of excessive excavation behind lining and flexible lining were used. The results show that 4 meters excessive excavation behind lining and using a filler having 10 MP modulus of elasticity, the damage to the tunnel lining is minimized. Numerical simulation of flexible lining using 0.5 meters joints with 3 meters distance from each other shows that this method results in 50 percent decrease in the damaged zone length, in addition to significant reduction in tunnel damage intensity.

Introduction

In the construction process of tunnels in active tectonic regions, it may be inevitable the intersection with active faults. Active faults from two aspects of sudden fault displacement and weak ground conditions in faulted region can destructively effects on the tunnel stability. If the tunnel crossed by an active fault, the tunnel may be damaged by the sudden movement of the active fault. As it is not feasible to avoid the fault displacement, the design of support system is founded on the fault displacement. The lining protection systems against the fault displacement are expensive and the selection of appropriate support system should be evaluated based on practical and economic concerns. The proposed lining protection systems include excessive excavation behind lining and flexible lining.

Previous studies on the design of lining systems in intersection of tunnel and active faults are categorized into practical experiences [1-5], physical modelling [6,7] and numerical modelling [8-10]. Review of these researches show that the main goal in the intersection of tunnel and faulted zone should be focused on the prevention of the whole tunnel failure and reduction of the damaged zone in the sudden movement of the fault. However, no robust methodology has been developed due to difference in geomechanical situations of each project. This study aims to develop a three-dimensional numerical model for design of tunnels at the intersection of active faults. To this end, the damaged zone at intersection of Sardasht water transmission tunnel and Zirmarg fault, as a case study, was first estimated using a finite difference code. Then, the lining was designed using the excessive excavation behind the lining and the flexible lining.

Methodology and Approaches

Sardasht dam and powerhouse is located at the in North-West of Iran and the South-West of Sardasht in West Azarbayjan. To transfer the water from dam to powerhouse, a water transmission tunnel having the length of 4.3 km has been designed. The tunnel section is the horse-shoe and the tunnel has been excavated using the NATM method. The support system is the reinforced concrete tunnel and the final diameter of the tunnel is 5 m. There are several faults in the designed path of this tunnel and the Zirmarg fault is known as the most important geological zone due to its characteristics such as the length of crashed zone as well as movement potential. The fault is strike-slip and its dip at the intersection with tunnel is 80 degrees. The crushed zone is 30 m and the possible movement is estimated 30 cm. The 3D numerical model was simulated using a finite difference code and this model and its boundary condition is shown in Fig. 1. To investigate the stability of lining before the fault movement, the capacity graph of lining was drawn as shown in Fig. 2. The footwall and hanging wall were then moved 15 cm in opposite directions to reach the designed fault displacement.

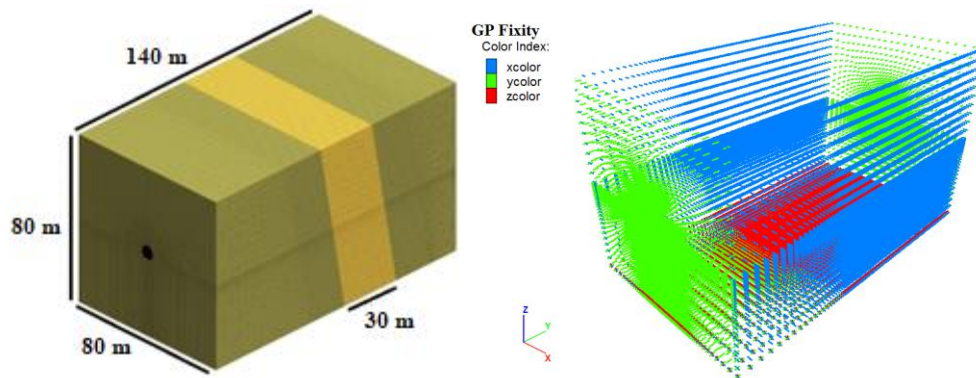


Fig. 1. The constructed numerical model and its boundary condition at the intersection of tunnel and Zirmarg fault

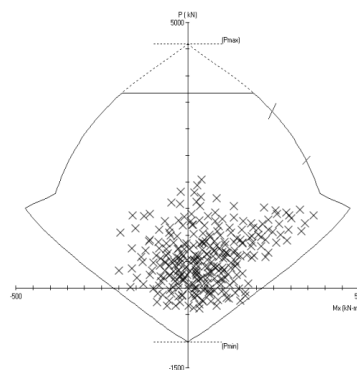


Fig. 2. The stability of tunnel lining before fault movement.

Results and Conclusions

Results of numerical model showed that 18 m in hanging wall and 16 m in footwall (including faulted zone) fail by the movement of fault as shown in Fig. 3. To design flexible lining in numerical model, joints having the length of 3 m were designed in the damaged zone, where 5 and 4 joints were considered in the hanging wall and footwall, respectively. The implement of flexible lining results in reduction of damaged zone to 8 m in both hanging wall and footwall.

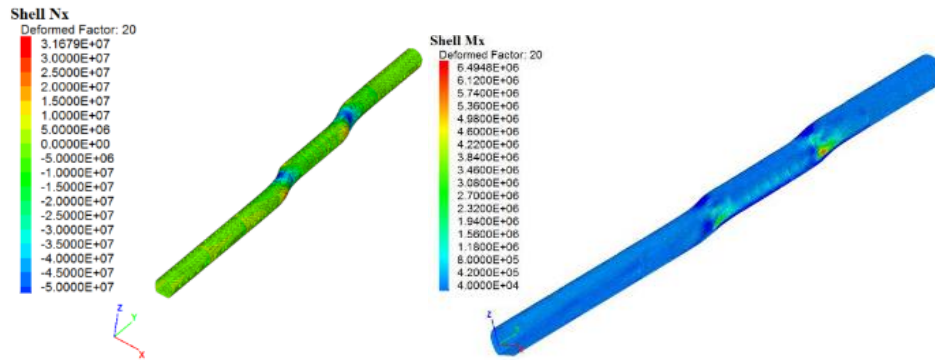


Fig. 3. The induced axial force and moment in lining by fault movement (Magnification 20 times).

To simulate the excessive excavation behind lining, three parameters of length, thickness and type of filling should be determined. To this end, sensitivity analysis on these parameters were carried out. Results of these analyses showed that for filling materials having the modulus of 10 MPa and the length of 4 m results in minimization of the damaged zone. It is interesting to note that with an increase in the thickness of excessive excavation, the effect of filing stiffness on damage zone increases.

REFERENCES

- [1] Ulusay, R., Aydan, O. & Hamad, M. (2002). The behaviour of structures built on active fault zones: examples from the recent earthquakes of turkey. *International journal of earthquake engineering*, 37(1): p. 149-167.
- [2] Wang, Z., Gao, B., Jiang, Y., & Yuan, S. (2009). Investigation and assessment on mountain tunnels and geotechnical damage after the Wenchuan earthquake. *Science in China Series E: Technological Sciences*, 52(2), 546-558.
- [3] Wang, Z. Z., & Zhang, Z. (2013). Seismic damage classification and risk assessment of mountain tunnels with a validation for the 2008 Wenchuan earthquake. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 45, 45-55.
- [4] Li, T. (2012). Damage to mountain tunnels related to the Wenchuan earthquake and some suggestions for aseismic tunnel construction. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, 71(2), 297-308.
- [5] Shimizu, M., Suzuki, T., Kato, S., Kojima, Y., Yashiro, K., & Asakura, T. (2007). Historical damages of tunnels in Japan and case studies of damaged railway tunnels in the Mid Niigata prefecture earthquakes. *Underground space—the 4th dimension of metropolises, 1937-1943*.
- [6] Burridge, P. B., Scott, R. F., & Hall, J. F. (1989). Centrifuge study of faulting effects on tunnel. *Journal of geotechnical engineering*, 115(7), 949-967.
- [7] Asakura, T., Shiba, Y., Matsuoka, S., Oya, T., & Yashiro, K. (2000). Damage to mountain tunnels by earthquake and its mechanism. In *Proceedings-Japan Society of Civil Engineers* (pp. 27-38).
- [8] Ghadimi Chermahini, A., & Tahghighi, H. (2019). Numerical finite element analysis of underground tunnel crossing an active reverse fault: a case study on the Sabzkouh segmental tunnel. *Geomechanics and Geoengineering*, 14(3), 155-166.
- [9] Shenk, Y.S., Wang, Z.Z., Yu, J., Zhang, X. & Gao, B. (2020) Shaking table test on flexible joints of mountain tunnels passing through normal fault. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 98, 103299.
- [10] Aygar, E.B. & Gokceoglu, C. (2021). A special support design for a large-span tunnel crossing an active fault (T9 Tunnel, Ankara-Sivas High-Speed Railway Project, Turkey). *Environmental Earth Sciences*, 80, 37.