بررسی عملکرد لاینینگ انعطاف‌پذیر در محل برخورد تونل و گسل فعال مطالعه‌ی موردی: تونل انتقال آب سد و نیروگاه سردشت

فرشاد محمدی فیروز[1*]، رضا رحمان نژاد[2]، حسین توکلی [3]، مجتبی بهاالدینی[4]، مرتضی رحیمی[5]
تونل انتقال آب پروژه سد و نیروگاه سردشت
f.mohamadi.firooz@gmail.com

چکیده

از جمله چالش برانگیزترین مباحث در طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی تقاطع تونل و گسل فعال می باشد. راهکارهای مختلفی برای حفاظت لاینینگ تونل در مقابل زلزله و حرکت گسل پیش‌بینی‌شده است که از جمله‌ی آن ها می توان به استفاده از لاینینگ انعطاف پذیر اشاره کرد. پیش‌نیاز اجرای هرکدام از این روش‌ها تعیین طولی از تونل است که در اثر حرکت گسل دچار آسیب خواهد شد. در این مقاله، پایداری تونل انتقال آب سردشت در محل تقاطع با گسل فعال زیرمرگ به‌صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تعیین طول زون آسیب دیده، محل تقاطع این تونل با گسل زیرمرگ با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی گردید. سپس با مدل‌سازی حرکت گسل و اعمال جابجایی ۳۰ سانتیمتری، تعیین شده بر اساس مطالعات لرزه‌خیزی، وضعیت پایداری لاینینگ بعد از حرکت گسل مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج مدل‌سازی و تحلیل سازه‌ی تونل نشان داد که لاینینگ بتنی در اثر حرکت گسل دچار آسیب جدی خواهد شد. به‌طوری که ۱۸ متر از طول لاینینگ در فرودیواره و ۱۶ متر در فرادیواره بعد از حرکت گسل باری بیش از ظرفیت خود تحمل خواهند کرد. در ادامه 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 زیادی از شدت خرابی‌ها خواهد کاست.

واژه‌های کلیدی: گسل فعال، لاینینگ انعطاف پذیر، تونل سردشت

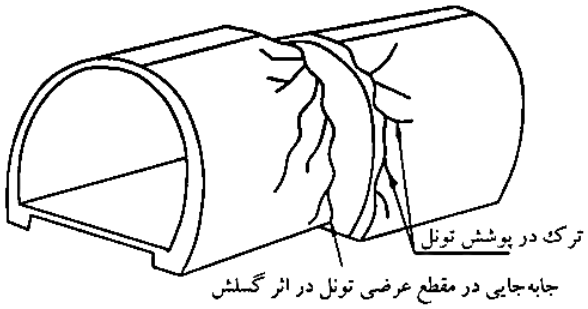
۱- کارشناس ارشد مکانیک سنگ، هلدینگ مهندسین مشاور، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا
۲- استاد بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۳- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۴- استادیار بخش مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان
۵- دکتری تخصصی مهندسی مکانیک سنگ، شرکت مهندسی سپاسد

www.SID.ir

۱- مقدمه

در یک تقسیم‌بندی کلی می‌توان آثار زلزله بر سازه‌های زیرزمینی، ازجمله تونل را به دو گروه لرزش زمین و گسیختگی زمین تقسیم‌بندی کرد؛ که گسیختگی زمین شامل انواع ناپایداری‌ها اعم از حرکت گسل، لغزش زمین، حرکت‌های به سمت بالای تکتونیکی و نشست زمین خواهد بود [۱]. به‌طورکلی مطالعات لرزه‌ای تونل‌ها نسبت به سازه‌های سطحی کم‌تر مورد توجه قرار گرفته است [۲] و به طبع آن توجه به حرکت گسل فعال در تقاطع با تونل که خود هم علت و معلول رخداد زلزله در یک منطقه است نیز، کم‌تر مورد بررسی قرارگرفته است. در هنگام احداث تونل‌های طویل، مخصوصاً در هنگام عبور از مناطق با پتانسیل لرزه‌خیزی بالا، تصادم تونل و گسل به دلیل مسائل فنی و اقتصادی امری اجتناب‌ناپذیر خواهد بود. گزارش‌های متعددی مبنی بر خرابی انواع تونل‌ها در محل تقاطع تونل با گسل فعال در دسترس است. ازجمله‌ی این گزارش‌ها، می‌توان به مواردی چون تونل شیویادانیگاوا در ژاپن در زلزله‌ی سال ۱۹۹۵، تونل توتوری در ژاپن در زلزله‌ی ۲۰۰۰، تونل معدن ماجابنگ در آفریقای جنوبی [۳] و تونل لاینگچی در زلزله‌ی ۲۰۰۸ ونچو چین به همراه چند تونل دیگر در این زلزله اشاره نمود [۴]. تصویری شماتیک از خرابی ناشی از تقاطع تونل با گسل فعال و همچنین گسترش ترک‌های کششی در لاینینگ تونل در شکل (۱) نشان داده شده است. راهکارهای مختلفی مانند اضافه‌حفاری پشت لاینینگ و استفاده از لاینینگ انعطاف‌پذیر جهت کاهش آسیب وارده بر لاینینگ بتنی پیشنهاد گردیده است [۵]. اما نکته اساسی در اجرای هر یک از این روش‌ها، جهت افزایش کارایی و کاهش هزینه‌ها، تعیین طولی از تونل است که در اثر حرکت گسل آسیب دیده و نیازمند اجرای تمهیدات ویژه خواهد بود [۶].

این مقاله علاوه بر بررسی تحلیل پایداری تونل انتقال آب نیروگاه سردشت در محل تصادم تونل با گسل فعال زیرمرگ به عملکرد استفاده از روش لاینینگ انعطاف پذیر جهت کاهش صدمات ناشی از حرکت گسل پرداخته است. برای این منظور، از نرم‌افزار FLAC3D بهره گرفته شده و پایداری لاینینگ تونل در حالت استاتیکی و بعد از حرکت گسل مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین جهت تعیین سیستم نگهداری مناسب در صورت حرکت گسل، طولی از تونل که نیازمند مقاوم‌سازی می‌باشد، تعیین گردیده است. در نهایت با مدل سازی لاینینگ انعطاف پذیر در بخش آسیب پذیر تونل عملکرد این روش مورد ارزیابی قرار گرفته است.

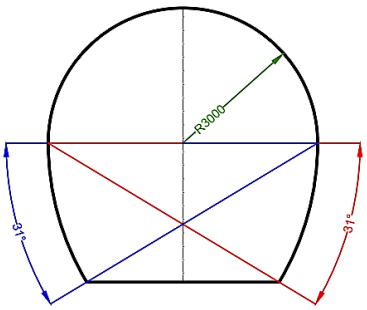


شکل ۱- تصویری شماتیک از خرابی ناشی از تقاطع تونل با گسل فعال [۶]

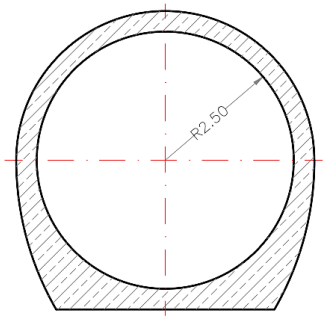
www.SID.ir

۲- معرفی تونل انتقال آب سردشت

طرح سد و نیروگاه سردشت در شمال غربی ایران و در جنوب غربی شهر سردشت از استان آذربایجان غربی قرارگرفته است. ازجمله اهداف اصلی پیش‌بینی‌شده‌ی طرح، تولید برق می‌باشد. برای این منظور، جهت انتقال آب از سد به نیروگاه، تونل انتقال آبی به طول تقریبی ۴۳۰۰ متر تحت عنوان تونل بلند نیروگاه سردشت در نظر گرفته‌شده است. مقطع تونل به شکل نعل اسبی و به ابعاد نشان داده‌شده در شکل (۲) می‌باشد. همچنین روش حفاری تونل به‌صورت NATM در نظر گرفته‌شده است و سیستم نگهداری تونل نیز از نوع پوشش بتنی مسلح (بتن‌ریزی برجا) و مطابق شکل (۳) خواهد بود که در نهایت پس از اعمال لاینینگ بتنی، قطر نهایی به طول ۵ متر حاصل خواهد شد [۷]. با توجه به وجود گسل‌های متعدد در منطقه (ازجمله گسل زاگرس، پیرانشهر، نیروان، ورچک و زیرمرگ)، تونل بلند سردشت در مسیر خود مجبور به قطع چند گسل است. گسل زیرمرگ با توجه به ویژگی‌هایی چون طول زون خورد شده، کیفیت توده سنگ و پتانسیل حرکت گسل، به‌عنوان مهم‌ترین ساختار زمین‌شناسی مؤثر بر تونل بلند نیروگاه سردشت معرفی گردیده است [۸]. از همین رو تمرکز اصلی این مقاله، بر محل تقاطع گسل زیرمرگ و تونل بلند نیروگاه می‌باشد. مهم‌ترین مشخصات گسل زیرمرگ در جدول (۱) نشان داده‌شده است. مشخصات توده سنگ مسیر تونل بلند در محل برخورد تونل با گسل زیرمرگ و نیز زون خردشده‌ی گسل زیرمرگ در جداول (۲) ارائه گردیده است.



شکل ۲- ابعاد مقطع تونل بلند نیروگاه سردشت



شکل ۳- مقطع نهایی تونل بلند نیروگاه بعد از اعمال لاینینگ بتنی

جدول ۱- مهم‌ترین مشخصات گسل زیرمرگ [۸]

محل تقاطع گسل با تونل (m)	شیب گسل (Deg)	طول زون خرد شده	نوع گسل	پتانسیل حرکت گسل (cm)
۰+۷۱۵	۸۰	۳۰	امتدادلغز	۳۰

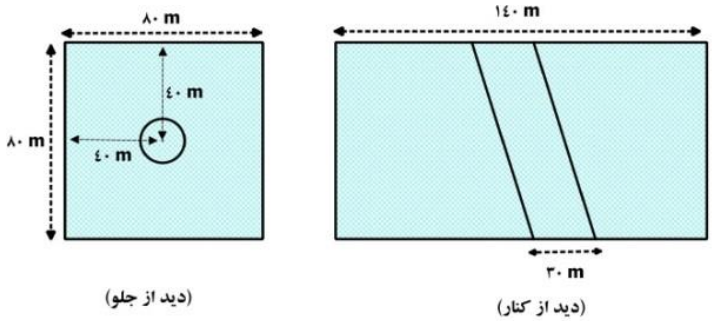
جدول ۲- مشخصات مکانیک سنگی توده سنگ مسیر تونل بلند و زون خورد شده‌ی گسل زیرمرگ [۷]

نام	وزن مخصوص (Kg/m^3)	مدول‌الاستیسیته (GPa)	ضریب پواسون	زاویه‌ی اصطکاک داخلی	چسبندگی (MPa)
توده سنگ	۲۷۰۰	۶	۰/۲۹	۳۰	۰/۳۵
زون خورد شده	۲۱۰۰	۰/۲	۰/۳۵	۱۷	۰/۱

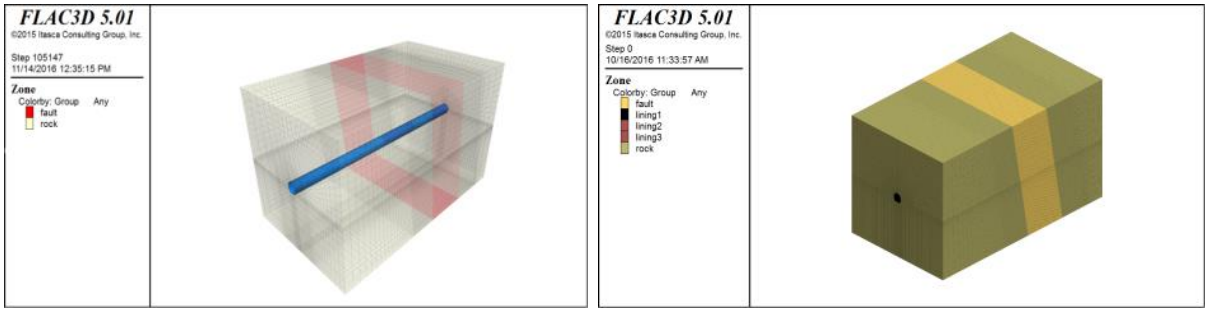
www.SID.ir

۳- مدل‌سازی عددی محل تقاطع تونل بلند و گسل زیرمرگ

با توجه به ویژگی‌های ژئومکانیکی توده سنگ مسیر تونل در محل تقاطع با گسل زیرمرگ و همچنین از آنجایی‌که در مدل‌سازی تقاطع تونل و گسل باید از یک نرم‌افزار سه‌بعدی استفاده شود، از این‌رو از نرم‌افزار FLAC3D جهت ساخت مدل عددی تقاطع تونل و گسل بهره گرفته شد. ابعاد مدل عددی ساخته شده در شکل (۴) نشان داده‌شده است. درنهایت مدل نهایی محل تقاطع گسل زیرمرگ و تونل بلند نیروگاه از اتصال ۸۰ قسمت مختلف و دقیقاً مطابق با همان ابعاد مشخص‌شده برای مقطع تونل، به‌صورت شکل (۵) ساخته شد. سپس حفاری مرحله‌ای با گام حفاری به طول ۲ متر انجام و لاینینگ بتنی تونل در هر مرحله از حفاری اعمال گشت. لاینینگ بتنی اعمالی در طول مسیر تونل، در شکل (۶) نشان داده‌شده است.



شکل۴- نمای کلی از ابعاد هندسی مدل ساخته‌شده



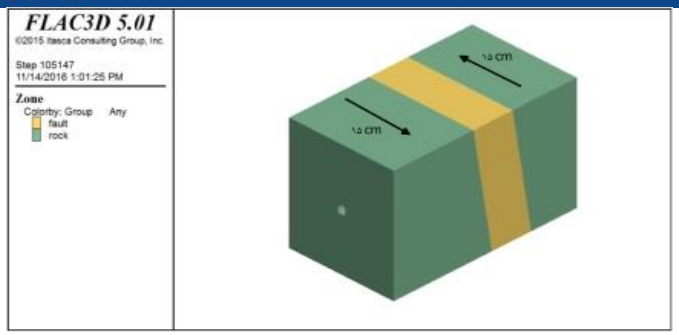
شکل۵- مدل ساخته‌شده از تقاطع تونل و گسل

شکل۶- لاینینگ بتنی اعمال‌شده در طول مسیر تونل

۴- مدل‌سازی حرکت گسل زیرمرگ

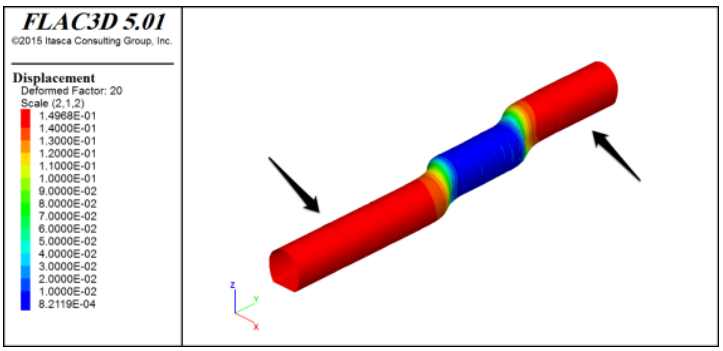
به‌طور کلی میزان پتانسیل حرکت در نقاط مختلف گسل‌ها ثابت نبوده [۸] و نیز میزان جابجایی در عمق بیشتر از میزان جابجایی در سطح می‌باشد [۵]. بر اساس گزارش‌های مطالعات لرزه‌خیزی منطقه، میزان پتانسیل حرکت گسل زیرمرگ حداکثر ۳۰ سانتیمتر گزارش‌شده است. برای ساخت مدل عددی حرکت گسل زیرمرگ، بدین صورت عمل شد که فرودیواره و فرادیواره هرکدام به میزان ۱۵ سانتیمتر در خلاف جهت هم (مطابق شکل (۷)) حرکت داده شوند تا جابجایی ۳۰ سانتیمتری گسل زیرمرگ حاصل گردد [۹].

www.SID.ir



شکل۷- نحوه‌ی حرکت فرودیواره و فرادیواره در گسل زیرمرگ

بعد از 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 حرکت گسل، جابجایی دیواره‌ی پشت لاینینگ در نظر گرفته شد. میزان جابجایی در قسمت‌های مختلف لاینینگ بعد از حرکت گسل در شکل (۸) ارائه گشته است. همان‌طور که در شکل نشان داده‌شده است، لاینینگ در طول مسیر تونل، هم‌زمان با حرکت فرودیواره و فرادیواره حرکت کرده و به میزان ۱۵ سانتیمتر جابجا شده است. اما با نزدیک شدن از فرودیواره و فرادیواره به زون گسله 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.

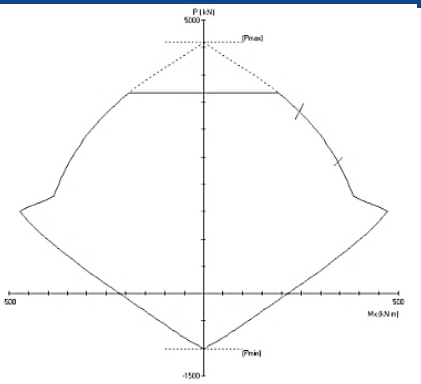


شکل ۸- نحوه‌ی جابجایی بخش‌های مختلف لاینینگ بتنی بعد از حرکت گسل زیرمرگ (بزرگنمایی ۲۰ برابری)

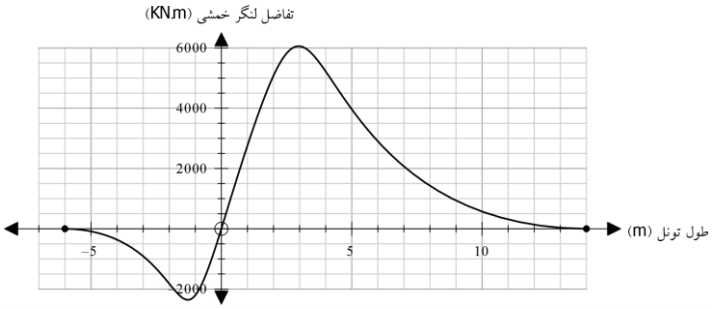
۵- بررسی وضعیت پایداری لاینینگ بتنی بعد از حرکت گسل

برای بررسی وضعیت پایداری لاینینگ، از نمودار ظرفیت باربری لاینینگ ارائه‌شده در شکل (۹) استفاده شد. برای این منظور، وضعیت نیروی محوری و لنگر خمشی در لاینینگ بتنی تونل بعد از حرکت گسل مورد بررسی قرار گرفت. از آنجا که میزان زون خرابی محاسبه شده بر اساس لنگر خمشی بیش از زون تخریب تعیین شده ناشی از نیروی محوری می‌باشد، طول زون خرابی نهایی بر اساس لنگر خمشی وارد بر لاینینگ تعیین گردید. تغییرات لنگر خمشی وارد بر لاینینگ بعد از حرکت گسل در طول مسیر تونل در فرودیواره و فرادیواره در شکل‌های (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.

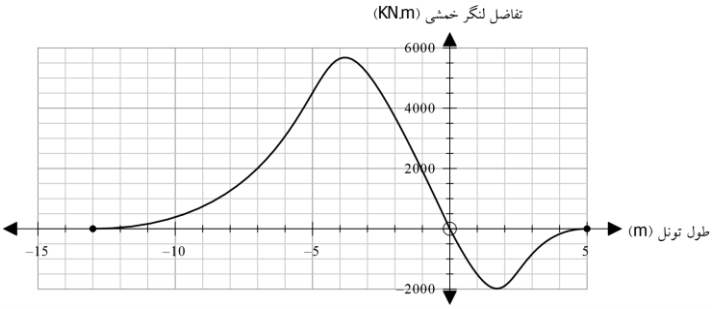
www.SID.ir



شکل ۹- نمودار ظرفیت باربری لاینینگ بتنی تونل سردشت [۷]



شکل۱۰- نحوه‌ی تغییرات لنگر خمشی نسبت به ظرفیت لاینینگ بعد از حرکت گسل در فرودیواره



شکل۱۱- نحوه‌ی تغییرات لنگر خمشی نسبت به ظرفیت لاینینگ بعد از حرکت گسل در فرادیواره

همان‌طور که در شکل (۱۰) نشان داده‌شده است، ۱۸ متر از طول تونل در اثر حرکت فرودیواره، لنگر خمشی بیش از ظرفیت خمشی لاینینگ تونل متحمل می‌شود که از این مقدار ۱۳ متر از این طول در فرادیواره و ۵ متر دیگر در زون گسله واقع است. همچنین حرکت گسل در فرادیواره باعث می‌شود که ۱۶ متر از طول تونل، شامل ۱۲ متر در فرادیواره و ۴ متر در زون گسله، لنگر خمشی بیش از ظرفیت لاینینگ، متحمل شود (شکل ۱۱).

۵- 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. در منابع طول این

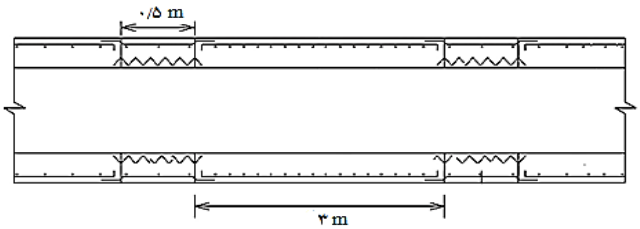
www.SID.ir

مفاصل ۵۰-۴۵ سانتیمتر 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، به‌طور 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 [۶].

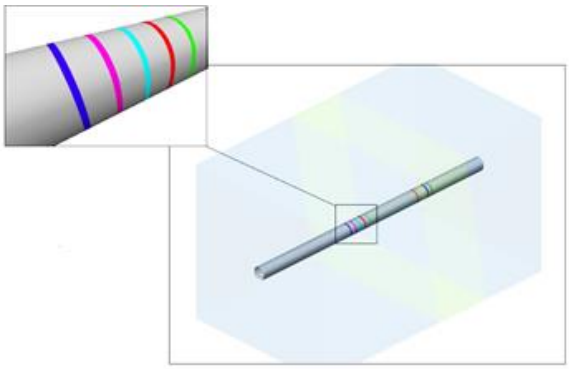
جدول ۴- پارامترهای مقاومتی درزه‌های انعطاف‌پذیر اجرا شده در مدل عددی لاینینگ تونل [۱۰]

نام	مدول الاستیسیته (Gpa)	ضریب پواسون
مفصل انعطاف‌پذیر	۰/۱۶	۰/۲۵

سپس مفاصل به فاصله‌ی طولی ۳ متر از یکدیگر در طول زون خرابی اعمال شدند که در مجموع ۹ مفصل، ۵ مفصل در فرودیواره و ۴ مفصل در فرادیواره 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.



شکل ۱۲- طرح سازه‌ی درزه‌های انعطاف‌پذیر اجرا شده در لاینینگ بتنی

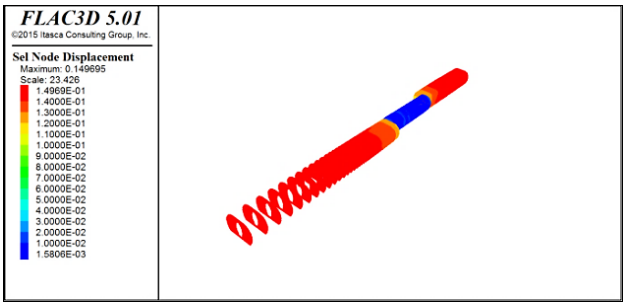


شکل ۱۳- نحوه‌ی قرارگیری مفاصل انعطاف‌پذیر در طول محور تونل

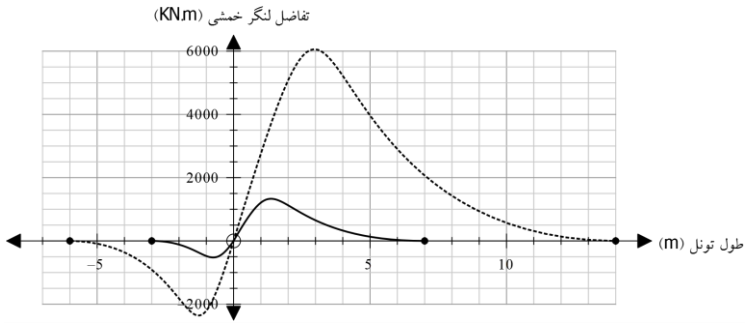
بعد از مدل‌سازی مفاصل برای بررسی نحوه عملکرد آن‌ها، گسل حرکت داده شد. شکل-۱۸ نحوه‌ی حرکت لاینینگ را بعد از حرکت گسل زیرمرگ با وجود درزه‌های انعطاف‌پذیر نشان می‌دهد. این مفاصل باعث انعطاف‌پذیری هرچه بیشتر لاینینگ شده و لاینینگ توانسته است در بخش‌های بیشتری متناسب با حرکت گسل حرکت کند. نحوه‌ی تأثیر درزه‌های انعطاف‌پذیر در کاهش آسیب وارد بر لاینینگ بتنی در اثر لغزش گسل در شکل (۱۴) قابل مشاهده است. این درزه‌ها ضمن کاهش طول خرابی در لاینینگ بتنی تونل باعث کاهش شدت خرابی نیز شده‌اند؛ به‌طوری که طول خرابی در فرودیواره از ۱۸ متر به حدود ۸ متر

www.SID.ir

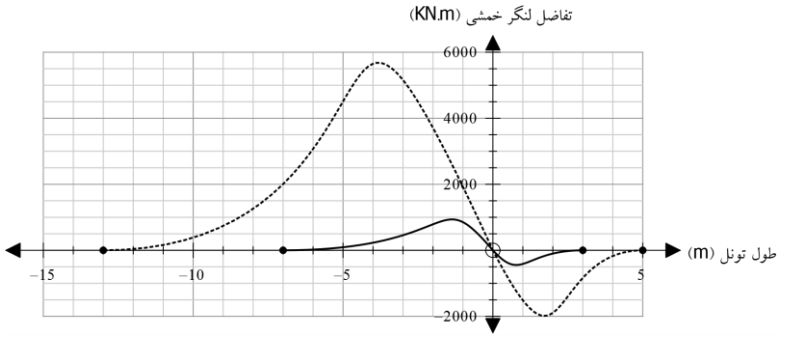
رسیده است و نیز حداکثر لنگر خمشی وارد بر لاینینگ در تفاضل با ظرفیت خمشی لاینینگ را از حدود ۶۰۰۰ به حدود ۱۱۰۰ کیلو نیوتن در متر کاهش داده‌اند؛ همچنین در قسمت فرادیواره نیز زون خرابی از ۱۶ متر به ۸ متر و لنگر خمشی از حدود ۵۶۰۰ به حدود ۱۰۰۰ کیلو نیوتن در متر کاهش پیدا کرده است.



شکل 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، فرودیواره



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

۹- نتیجه‌گیری

در این مقاله، پایداری لاینینگ بتنی تونل بلند نیروگاه سردشت در محل تقاطع با گسل فعال زیرمرگ مورد بررسی قرار گرفت. برای این منظور، محل تقاطع تونل با گسل زیرمرگ با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D مدل‌سازی گردید. پس از اعمال جابجایی پیش‌بینی شده بر اساس مطالعات لرزه‌خیزی، مشخص گردید که لاینینگ بتنی در اثر جابجایی گسل دچار آسیب جدی خواهد شد. از آنجاکه اعمال تمهیدات لازم برای پایدارسازی تونل، نیازمند اطلاع از محدوده ناپایدار در اطراف گسل است، محدوده‌ای

www.SID.ir

از لاینینگ که در فرودیواره و فرادیواره دچار مشکل خواهد شد، تعیین گشت. نتایج این بررسی نشان داد که ۱۸ متر از طول تونل در اثر حرکت فرودیواره باری بیش از ظرفیت خود تحمل خواهد کرد به‌طوری‌که ۱۳ متر آن در فرودیواره و ۵ متر آن در زون گسله واقع است. همچنین در اثر حرکت فرادیواره، ۱۶ متر از تونل دچار آسیب احتمالی خواهد شد که ۱۲ متر از آن در فرادیواره و ۴ متر آن در زون گسله واقع است. بعد از تجهیز این محدوده از لاینینگ به درزه‌های انعطاف پذیر و مدل سازی مجدد حرکت گسل در این حالت مشخص شد که این روش تاثیر قابل توجهی در کاهش آسیب حاصل از حرکت گسل خواهد داشت به نحوی که در این مطالعه موردی با ساخت درزه‌های ۰/۵ متری و به فاصله‌ی ۳ متر از یکدیگر، ضمن کاهش بیش از ۵۰ درصدی طول خرابی به مقدار زیادی از شدت خرابی‌ها کاسته خواهد شد.

مراجع

1- Hashash, Y. M., Hook, J. J. Schmidt, B. John, I. & Yao, C. (2001). Seismic design and analysis of underground structures. *Tunnelling and Underground Space Technology*, *16*(4), 247-293.

2- Wang, J. N. (1993). *Seismic design of tunnels: a simple state-of-the-art design approach*. Parsons Brinckerhoff.

3- Bäckblom, G. Munier, R. & Hökmark, H. (2004). Earthquake data and modelling to study the effects of future earthquakes on a final repository of spent nuclear fuel in sweden. *World Conference on Earthquake Engineering.* Canada.

4- 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.

5- Russo, M. Germani, G. & Amberg, W. (2002, October). Design and construction of large tunnel through active faults: a recent application. In *Proceedings International Conference of Tunneling and Underground Space Use, Istanbul*.

۶- اسماعیلی،۱۳۹۳، تحلیل و طراحی لرزه‌ای سازه‌های زیرزمینی، موسسه انتشارات علمی دانشگاه صنعتی شریف.

۷- مطالعات و طراحی سد و نیروگاه سردشت، مطالعات مرحله اول تونل بلند، گزارش مطالعات و طراحی‌های مکانیک سنگ، شرکت مهندسی سپاسد، دی ماه ۱۳۸۹.

۸- مطالعات طراحی و عملیات اجرایی سد و نیروگاه سردشت، گزارش لرزه زمین‌ساخت و خطر لرزه‌خیزی، شرکت مهندسی سپاسد، شهریور ماه ۱۳۸۹.

9- Zhengzheng, W. Bo, G. Yusheng, S. & Wanjun, Z. (2009, January). Study On the Flexible Lining of the Tunnel In the Active Faulted Zone. In *ISRM International Symposium on Rock Mechanics-SINOROCK 2009*. International Society for Rock Mechanics.

10- Shen, 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.

www.SID.ir