The Effect of Reverse Slip Faulting on Segmental Tunnels Dug in Soil in Flac 3D Software

A. Malekmohammadi Khezerloo, M. Kiani*

Abstract

Today, tunnels are one of the main vital arteries for a city, which are developing significantly. The development of today's societies has caused the need for tunnels in various sectors, including urban public transportation, intercity transportation, and water and sewage collection and transmission networks, etc. It goes without saying that for underground structures such as tunnels, the existence of faults and consequently earthquakes are serious threats among natural hazards. Although tunnels should not be located near active faults, sometimes passing through them is unavoidable. Sometimes, after the construction of the tunnel, the existence of the fault is known. In such cases, the deformation caused by the fault is considered a big concern and has a significant effect on the behavior of the tunnels. Meanwhile, due to the fact that most urban shallow tunnels are built in loose ground, the necessity of studying the behavior of tunnels and ensuring the safety of these structures against failure is of great importance. The advantage of numerical methods, in this research, the effect of different parameters such as the thickness of the piece, the depth of the tunnel placement and the fault angle on the behavior of piece tunnels has been investigated using FLAC 3D software. The main goal of the research was to know the possible failure mechanism of segmental tunnels due to faulting. In this research, 24 numerical models were built to understand the behavior of segmental tunnels under the effect of reverse faulting. The validation of this numerical modeling is with the physical model of Kiani et al. The ways to improve the performance of segmental tunnels when faced with reverse fault movement is to increase the rigidity of the tunnel. In this research, the effect of the depth of the tunnel placement due to the reverse fault was also investigated. It was observed that increasing the depth of the tunnel placement when facing reverse faulting leads to a decrease in the deformation of the tunnel diameter. Also, the effect of changing the fault angle for the tunnel was investigated. Increasing the angle of the fault causes the change of places created on the ground surface and the displacement of the tunnel roof to decrease.

Key Words: *Segmental Tunnels, Reverse Fault, Numerical Modeling, FLAC 3D, Fault Angle, Tunnel Depth*

This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license.

Publisher: Imam Hussein University © Authors

*Assistant Professor, Imam Hosein University, Tehran, Iran (kiani@ihu.ac.ir) - Writer-in-Charge

نشریه علمی پدافند غیرعامل

سال چهاردهم، شماره ۲، تابستان ۱۴۰۲، (پیاپی ۵۴): صص ۵۸-۴۹

علمی- پژوهشی

اثر گسلش شیب لغز معکوس بر تونل‌های قطعه‌ای حفرشده در خاک در نرم‌افزار در نرم افزار Flac 3D

امین ملک‌محمدی خضرلو[۱]، مجیدکیانی[۲*]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۰۵/۲۱

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۱/۱۱/۱۶

چکیده

تونل‌ها امروزه از اصلی‌ترین شریان‌های حیاتی برای یک شهر محسوب می شوند که به طور قابل توجهی در حال توسعه می باشند. 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. ناگفته پیداست که برای سازه‌های زیرزمینی هم‌چون تونل‌ها، وجود گسل‌ها و به تبع آن زمین لرزه‌ها از جمله تهدیدهای جدی از بین خطرات طبیعی به شمار می‌روند. هرچند تونل‌ها نباید در نزدیکی گسل‌های فعال قرار گیرند، ولی گاه، عبور از آن‌ها اجتناب‌ناپذیر است. بعضی مواقع بعد از احداث تونل از وجود گسل اطلاع حاصل می‌شود. در این گونه موارد، تغییر شکل‌های ناشی از گسل نگرانی بزرگی به حساب می‌آید و اثر قابل‌توجهی بر روی رفتار تونل‌ها می‌گذارد. در این میان با توجه به این که اغلب تونل‌های کم‌عمق شهری در زمین‌های سست احداث می‌شود، ضرورت مطالعه رفتار تونل‌ها و اطمینان از ایمنی این سازه‌ها در مقابل گسلش از اهمیت فراوانی برخوردار می‌باشد. بر این اساس، با توجه به مزیت روش‌های عددی، در این تحقیق، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت قطعه، عمق قرارگیری تونل و زاویه‌ی گسل بر روی رفتار تونل‌های قطعه‌ای با استفاده از نرم‌افزار FLAC 3D مورد بررسی قرار گرفته است. هدف اصلی پژوهش شناخت مکانیزم خرابی احتمالی تونل‌های قطعه‌ای در اثر گسلش بوده است. در این پژوهش ۲۴ مدل عددی جهت شناخت رفتار تونل‌های قطعه‌ای تحت اثر گسلش معکوس ساخته شده است. صحت‌سنجی این مدل سازی عددی با مدل فیزیکی کیانی و همکاران می باشد. یکی از راه‌های بهبود عملکرد تونل‌های قطعه‌ای در هنگام مواجهه با حرکت گسل معکوس، افزایش صلبیت تونل می‌باشد. با افزایش صلبیت تونل مقدار جابجایی‌های تونل به میزان ۳ درصد کاهش یافت. در این تحقیق، اثر عمق قرارگیری تونل در اثر گسل معکوس نیز بررسی گردید و مشاهده گردید که افزایش عمق قرارگیری تونل در هنگام مواجهه با گسلش معکوس منجر به کاهش ۱۱ درصدی تغییر شکل قطر تونل می‌شود. هم‌چنین اثر تغییر زاویه گسل برای تونل بررسی گردید. افزایش زاویه‌ی گسل موجب می‌شود تا تغییر مکان‌های ایجاد شده در سطح زمین و نیز جابجایی سقف تونل به میزان ۱۳ درصد افزایش یابد.

کلید واژه‌ها: تونل‌های قطعه‌ای، گسل معکوس، مدل‌سازی عددی،FLAC 3D، زاویه گسل، عمق تونل

* این مقاله یک مقاله با دسترسی آزاد است که تحت شرایط و ضوابط مجوز Creative Commons Attribution (CC BY) توزیع شده است.

ناشر: دانشگاه جامع امام حسین (ع)

© نویسندگان

[۱] دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران گرایش سازه دانشکده پدافندغیرعامل دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران

[۲] استادیار مهندسی عمران دانشکده پدافندغیرعامل دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران- (kiani@ihu.ac.ir) - نویسنده مسئول

۱ – مقدمه

امروزه کاربرد تونل‌ها در جوامع شهری رو به گسترش است. تونل‌های راه، راه‌آهن، مترو، جمع‌آوری فاضلاب، کابل‌های فشارقوی برق و انتقال آب شرب که به‌عنوان شریان‌های حیاتی شناخته می‌شوند، ازجمله کاربردهای تونل می‌باشد. بسیاری از شهرهای بزرگ دنیا بر روی نهشته‌های رسوبی و مناطق گسل خورده بنا نهاده شده‌اند. از دیدگاه فنی ساخت تونل‌ها در زیر شهرها با چالش‌های ویژه‌ای همراه است. بسیاری از استانداردهای مطرح دنیا تنها اجتناب کردن از ساخت سازه‌ها در مجاورت گسل‌های فعال را به‌عنوان یک راهکار مهندسی توصیه نموده است [۱].

مواردی اتفاق می‌افتد که امتداد تونل چاره‌ای جز عبور از مسیر یک گسل را ندارد. لذا اجتناب از عبور تونل از مسیر یک گسل فعال همیشه مقدور نیست. در این حالت تونل باید تا حد امکان توان تحمل جابه‌جایی ناشی از گسل را داشته باشد و تنها دچار خرابی‌های ناچیزی شود [۲].

با توجه به اینکه اغلب تونل‌های کم‌عمق شهری در زمین‌های سست و گاهی در محل گسل‌ها احداث می‌شوند، ضرورت مطالعه رفتار لرزه‌ای و اطمینان از ایمنی این سازه‌ها در مقابل حرکت گسل و تکان‌های زلزله از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد. درواقع، تونل‌ها در اثر حرکت گسل‌ها، در مقایسه با امواج لرزه‌ای آسیب بیشتری متحمل می‌شوند و پایداری آن‌ها به مخاطره می‌افتد [۳] .

معمولاً جابه‌جایی گسل‌ها به سه شکل شیب لغز (نرمال، معکوس)، امتداد لغز (راست لغز و چپ لغز) و ترکیبی[1] انجام می‌شود که در نوع گسلش امتداد لغز، جابه‌جایی افقی و در گسلش شیب لغز جابه‌جایی قائم می‌باشد.

سیستم نگهداری اغلب تونل‌های شهری به‌صورت قطعات پیش‌ساخته بتن مسلح و به اصطلاح قطعه‌ای[2] بوده که با درزهای طولی و محیطی از هم جدا می‌شوند. نحوه‌ی عملکرد این قطعه‌ها به‌ویژه در محل اتصال آن‌ها ممکن است تأثیر زیادی بر پایداری تونل داشته باشند [۲].

در محل گسل‌ها نیز وجود حرکات برشی ممکن است موجب جدایی قطعه‌ها از هم گردد. با جدایی قطعه‌ها، خاک به داخل تونل ریزش کرده و در سطح زمین باعث تشکیل چاله می‌گردد که این امر می‌تواند موجب وارد شدن خسارت شدید به سازه‌های روی زمین شود؛ بنابراین لازم است علاوه بر مطالعه سازه تونل، تغییر مکان سطح زمین نیز تحت تأثیر حرکات گسل مطالعه شود.

مکانیزم خرابی حاکم بر تونل‌های قطعه‌ای در اثر گسلش معکوس چیست؟ تأثیر زاویه گسلش بر مکانیزم خرابی حاکم بر تونل چیست؟ عمق قرارگیری تونل یا روباره تونل چه تأثیری می‌تواند داشته باشد؟ تأثیر نوع گسلش در مکانیزم گسیختگی و خرابی تونل چگونه است؟ تأثیر ضخامت قطعه‌ها بر رفتار تونل چیست؟[۱]

با مرور و بررسی تحقیقات قبلی صورت گرفته در خصوص موضوع این تحقیق، خلأ موجود در زمینه رفتار تونل‌ها تحت اثر پدیده گسلش را به‌وضوح می‌توان دید. این پژوهش برای پاسخ دادن به بخشی از سؤالات برنامه‌ریزی و انجام‌شده است در این تحقیق مطالعه تأثیر گسلش معکوس بر تونل‌های قطعه‌ای حفر شده در خاک به‌صورت عددی با مدل سازی عدد در نرم‌افزار flac 3d انجام‌شده است.

۲- روش تحقیق

به‌منظور بررسی رفتار تونل‌های عبوری از محل گسل‌ها می‌توان با استفاده از سیستم ابزار دقیق در تونل‌ها و سازه‌های مدفون زیرزمینی که از گسل‌های موجود عبور کرده‌اند مقادیر جابجایی‌ها و تنش‌های ایجاد شده در این سازه‌ها را اندازه‌گیری نمود. این روش بررسی با توجه به پراکندگی زمانی حرکت گسل‌ها و همچنین دشواری کار گذاشتن ابزارهای اندازه‌گیری و نیز گران‌قیمت بودن این ابزارها روش مناسبی برای تعیین رفتار کلی نبوده و به‌منظور انجام پایش و کنترل سازه مناسب می‌باشد. همچنین باید در نظر گرفت که در سازه‌های موجود ممکن است وقوع حرکت در گسل باعث خرابی شده و خسارات جبران‌ناپذیری را ایجاد نماید[۵].

روش مدل‌سازی آزمایشگاهی عموماً با استفاده از دو روش ساخت مدل بر روی میز لرزه و ساخت مدل در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی صورت می‌پذیرد. در این روش‌ها پروتوتیپ مورد نظر با استفاده از قوانین مقیاس کردن، کوچک‌سازی شده و مدل در ابعاد کوچک در داخل آزمایشگاه ساخته می‌شود. سپس با استفاده از میز لرزه یا سانتریفیوژ شتاب نگاشت مورد نظر به مدل اعمال شده و پارامترهای مدنظر اندازه‌گیری می‌شوند. در این روش تحقیق با توجه به‌دشواری ساخت مدل و نیز هزینه‌بر بودن آن تمامی پارامترهای مؤثر بر پدیده را نمی‌توان مورد بررسی قرار داد [۶].

[1] Oblique
[2] Segmental

امروزه با توجه به پیشرفت‌های ایجاد شده در صنعت ساخت کامپیوترها و افزایش سرعت و دقت محاسبات و همچنین ارائه مدل‌های رفتاری مناسب جهت مدل نمودن رفتار خاک، یکی از مناسب‌ترین روش‌های بررسی پدیده‌های مختلف مدلسازی عددی آن‌ها می باشد. این روش بررسی باعث افزایش سرعت محاسبات و همچنین کاهش هزینه‌های تحقیقاتی می‌شود. یکی از روش‌های عددی مناسب جهت بررسی رفتار سازه‌های مدفون در خاک، روش تفاضل محدود می باشد. این روش عددی در نرم‌افزارهایی مانندFLAC 3D و FLAC 2D مورد استفاده قرار گرفته است[۷].

این پروژه تحقیقاتی مطالعه‌ای است بر روی رفتار سازه‌های مدفون شامل شریان‌های حیاتی خصوصاً تونل‌های مترو در محل عبور این سازه‌ها از گسل‌های معکوس. این امر با استفاده از روش مدلسازی عددی به‌صورت تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزارFLAC 3D انجام خواهد گرفت و نتایج حاصل از آن با نتایج مدل‌سازی فیزیکی که در سانتریفیوژ صورت گرفته است مقایسه خواهد شد.

۲-۱- هندسه سازی

اولین گام در اجرای یک مدل، ساخت هندسه می باشد. زون بندی در این نرم‌افزار هم‌زمان با هندسه سازی انجام می‌گیرد.در این مرحله ابتدا به مدلسازی اولیه هندسی پرداخته و سپس هندسه ایجاد شده مش بندی می‌شود.نحوه ایجاد مش بندی در نرم‌افزار در ادامه شرح داده می‌شود.

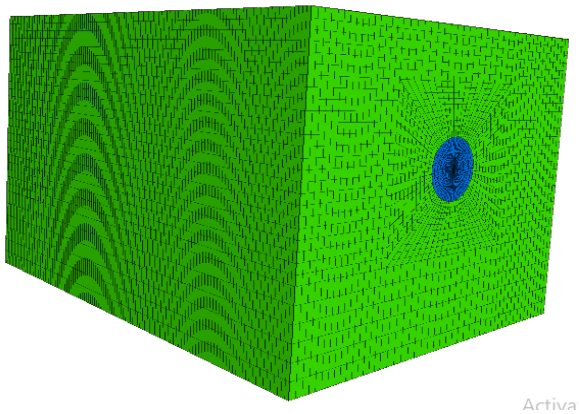
به‌منظور ایجاد یک مدل عددی سه‌بعدی، ابعاد مدل عددی به‌اندازه‌ای بزرگ انتخاب شده‌اند تا از تأثیر مرزها جلوگیری شود. حداقل ابعاد مدل بر اساس قوانین زیر انتخاب شده است:

H+4D برای ارتفاع مدل

H+3D برای طول مدل

6D برای عرض مدل

با توجه به اینکه قطر نمونه پژوهشی که باید مورد صحت سنجی قرار گیرد ۶ متر می باشد لذا در ابتدا هندسه سازی و شبیه سازی تونل را با قطر ۶ متر در نظر می‌گیریم.در مدلسازی این تحقیق ارتفاع تونل با قطر تونل برابر می باشد. لذا با توجه به روابط بالا که از مقاله دو و همکاران استخراج شده است ارتفاع مدل برابر ۳۰ متر و عرض مدل برابر ۳۶ متر و طول مدل برابر ۴۸ متر در نظر گرفته می‌شود.



شکل (۱): شکل هندسه مدل قبل از حفاری

۲-۲- مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده

پس از ساخت هندسه مدل، بایستی مدل رفتاری مناسب به ماده اختصاص داده شود. خصوصیات مرتبط با مدل رفتاری از جمله مدول برشی، مدول حجمی، زاویه اصطکاک، چسبندگی ظاهری خاک و... به زون‌های مدل اعمال می‌شود. در این تحقیق، از مدل رفتاری موهر کولمب استفاده شده است که در ادامه به شرح این مدل پرداخته می‌شود.

۲-۲-۱-مدل رفتاری موهر کولمب

مدل موهر کولمب، از جمله مدل‌های پلاستیکی برای نشان دادن گسیختگی برشی در خاک می باشد. در این مدل، تنش تسلیم، تابع تنش‌های اصلی حداقل و حداکثر می باشد و تنش اصلی متوسط تأثیری در این مدل ندارد. در مدل مزبور، از جریان برشی غیرهمراه برای گسیختگی برشی و جریان برشی همراه برای گسیختگی کششی استفاده شده است. پوش گسیختگی برشی در این مدل رفتاری زمانی اتفاق می‌افتد که تابع بیان شده در رابطه (۱) صفر شود.

$$f^s = \sigma_1 - \sigma_3 N_\varphi + 2c\sqrt{N_\varphi} \qquad (۱)$$

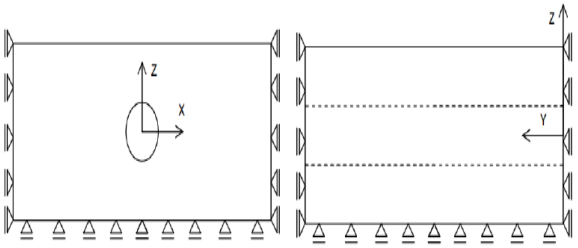
و همچنین پوش گسیختگی کششی زمانی اتفاق می‌افتد که تابع رابطه (۲) صفر شود:

$$f_t = \sigma_3 - \sigma^t \qquad (۲)$$

در این روابط σ_1 تنش اصلی حداکثر، σ_3 تنش اصلی حداقل و σ^t مقاومت کششی خاک می باشد.N_φ از رابطه (۳) حساب می‌شود کهφ زاویه اصطکاک داخلی خاک می باشد.

$$N_\varphi = \frac{1+\sin(\varphi)}{1-\sin(\varphi)} \qquad (۳)$$

شکل (۲) معیار گسیختگی موهر کولمب را نشان می‌دهد:

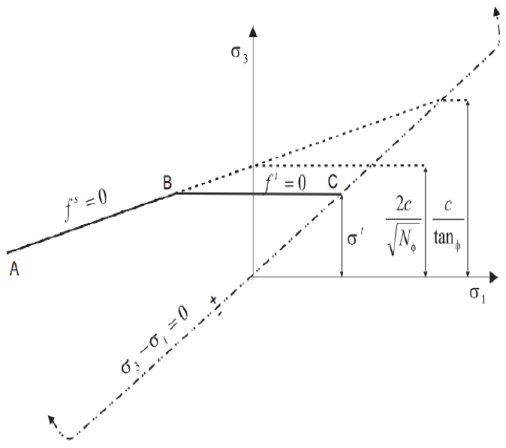


شکل(۲): معیار گسیختگی موهر کولمب (راهنمای نرم‌افزار flac 3d)

برای اختصاص ویژگی‌های این مدل رفتاری به زون‌های مدل، بایستی پارامترهای مدول حجمی، چسبندگی ظاهری خاک، جرم مخصوص، زاویه‌ی اصطکاک، زاویه‌ی اتساع خاک، مدول برشی و مقاومت کششی خاک را تعریف کرد. این پارامترها در تست‌های مختلف مقادیر مختلفی دارند لازم به ذکر می باشد که مدول حجمی (K) و مدول برشی (G) مصالح به ترتیب از روابط (۴) و (۵) تعریف می‌شوند که در این روابط، μ و E به ترتیب ضریب پواسون و مدول الاستیسیته‌ی مصالح می‌باشند.

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{3(1-2\mu)}} \qquad (۴)$$

$$\mathbf{k} = \frac{\mathbf{E}}{\mathbf{2(1+\mu)}} \qquad (۵)$$



شکل (۳): جهت‌های مختصاتی و شرایط مرزی مدل

جهت‌های z و y و x مطابق شکل (۳) تعریف شده‌اند.

۲-۳- اعمال شرایط اولیه

در این مرحله، شرایط مرزی و اولیه به مدل اعمال می‌شوند.
شتاب زمین در جهت قائم ۹/۸۱ در نظر گرفته شد.
با توجه به اینکه مرکز تونل را محور مختصات در نرم‌افزار در نظر گرفتیم لذا مختصات جهت اعمال شرایط مرزی را نسبت به مبدأ در نظر می‌گیریم به‌عنوان مثال برای ثابت کردن عرض مدل ازآنجایی‌که عرض مدل ۳۶ متر است ۱۸ متر در جهت مثبت محور مختصاتی x ثابت می‌گیریم و ۱۸ متر در جهت منفی محور مختصاتی x ثابت در نظر می‌گیریم. همچنین برای اینکه نرم‌افزار دقیقاً نقطه مورد نظر را صفر در نظر بگیرد یک ابسیلن کمتر و یا بیشتر از آن مختصات را اعمال می‌کنیم. در ادامه گره‌های مختصاتی که جهت اعمال شرایط اولیه و شرایط مرزی در نرم‌افزار وارد کردیم را مشاهده می‌کنیم.

۲-۴- بررسی تعادل مدل قبل از حفاری تونل

به‌منظور بررسی وضعیت تعادل مدل، از شاخصی چون نیروهای نامتعادل استفاده می‌شود. حالت تعادل زمانی به دست می‌آید که نسبت ماکزیمم نیروی نامتعادل تمامی گره‌ها به کل نیروهای مکانیکی برای تمامی گره‌ها، کمتر از 1×10^{-5} باشد.

۲-۵- عملیات اجرایی و سگمنت‌گذاری

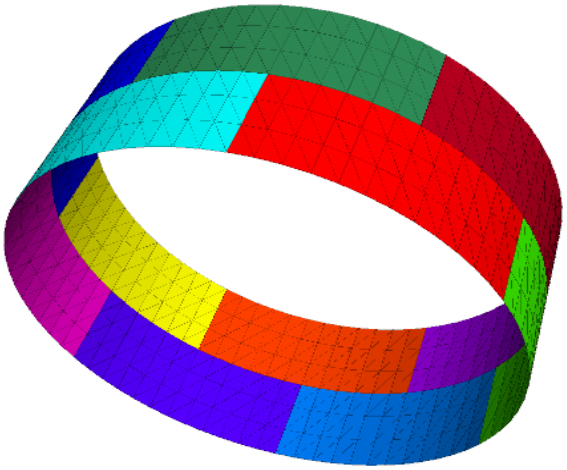
حال نوبت به حفاری تونل می‌رسد.حفاری و سگمنت‌گذاری در این تحقیق به‌صورت مرحله‌به‌مرحله و به‌صورت آنچه که در عمل شاهد اجرای آن هستیم انجام می‌گیرد. به‌عبارت‌دیگر در اجرا دستگاه TBM ابتدا حفاری کرده و سپس پشت سر آن عملیات سگمنت گذاری انجام می‌گردد. در این پایان‌نامه هم ابتدا به‌اندازه یک رینگ حفاری کرده و جلو می‌رویم سپس سگمنت گذاری انجام می‌شود.

حفاری تونل با استفاده از اختصاص دادن مدل تهی به محدوده‌ی مورد نظر انجام می‌گیرد. قطر تونل دایره‌ای ۶ متر در نظر گرفته شده است. برای ایجاد سگمنت در نرم‌افزار، از سیستم نگهداری لاینر استفاده شده است. در این المان سازه‌ای، در جهت برشی امکان اندرکنش اصطکاکی بین لاینر و خاک اطراف وجود دارد. همچنین در جهت نرمال، المان لاینر قادر به تحمل نیروهای فشاری و کششی می‌باشد. این سیستم نگهداری، مستقیماً به سطح زون‌ها به‌وسیله‌ی فنرهایی متصل می‌شوند. رفتار نرمال فصل مشترک لاینر و زون به‌وسیله‌ی سختی در واحد سطح و مقاومت کششی فنر کنترل می‌شود. همچنین رفتار برشی فصل مشترک بر اساس چسبندگی ظاهری و اصطکاک می‌باشد که به‌وسیله‌ی سختی در واحد سطح، مقاومت چسبندگی، مقاومت چسبندگی ظاهری باقیمانده و زاویه‌ی اصطکاک کنترل می‌شود.

مراحل کار در رینگ اول یا رینگ‌های فرد بدین‌صورت است که ابتدا تونل به‌اندازه ۱/۲ متر که طول هر رینگ در جهت محور تونل می‌باشد حفاری می‌گردد.سپس برای هر رینگ ۶ عدد

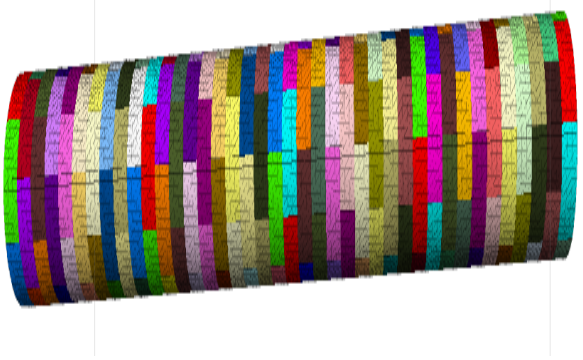
سگمنت تعریف می‌گردد. نحوه تعریف این سگمنت‌ها به‌صورت مختصات بوده که پرداختن به آن خارج از بحث می‌باشد.سپس مدول الاستیسته و ضریب پواسون برای این سگمنت‌ها با توجه به نمونه‌ای که قرار است مورد صحت سنجی قرار گیرد وارد می‌گردد. با توجه به این‌که مش‌بندی محیط به‌صورت مایل می‌باشد ولی بایستی رینگ‌های تونل به‌صورت قائم ایجاد شوند، ابتدا گره‌های لاینر ایجاد و سپس بین سه گره، یک لاینر ایجاد شد. با کنار هم قرار گرفتن چندین لاینر، یک سگمنت و با در کنار هم قرار گرفتن شش سگمنت، یک رینگ تشکیل می‌شود.

سپس گره‌ها یا لینک‌هایی که برای رینگ تعریف کردیم را پاک می‌کنیم تا این لینک‌های سگمنت را که همه آن‌ها بتنی می‌باشد.ابتدا به خاک و سپس در محل اتصال سگمنت‌ها به همدیگر متصل کنیم. در ادامه تصویری از قرارگیری رینگ‌های زوج و فرد را کنار هم مشاهده می‌کنیم.



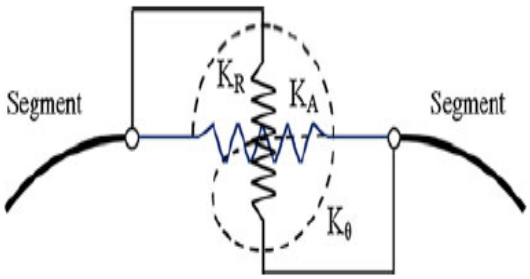
شکل (۴): تصویر قرارگیری رینگ‌های زوج و فرد کنار هم دیگر

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود درزه‌های عرضی نباید در راستای هم قرار بگیرد چراکه امکان آسیب و وارد آمدن خاک به تونل فراهم می‌شود.



شکل (۵): تصویری از سگمنت‌های طراحی شده برای تونل

برای مدل کردن سختی بین قطعه‌ها (سگمنت‌ها) و همچنین رینگ‌ها، فنرهایی تعریف شد که سختی این فنرها از طریق آزمایش و یا از طریق روابط تجربی به دست آمدند. برای قطعه‌های مجاور هم واقع در یک رینگ، سختی‌های K_A و K_R و K_θ همچنین برای رینگ‌های متوالی، سخت‌های K_{AR} و K_{RR} و $K_{\theta R}$ مطابق جدول (۱) تعریف شد. این سختی‌ها به شکل شماتیک در شکل (۶) نمایش داده شده‌اند [۳].



شکل (۶): سختی‌های K_{AR} و K_{RR} و $K_{\theta R}$ [۳]

جدول (۱): سختی‌های استفاده شده توسط DO و همکاران [۳]

Parametr	symbol	value
Rotational stiffness (MN m/rad/m)	K_θ	100
Axial stiffness (MN/m)	K_A	500
Radial stiffness (MN/m)	K_R	1050
Rotational stiffness (MN m/rad/m)	$K_{\theta R}$	100
Axial stiffness (MN/m)	K_{AR}	500
Radial stiffness (MN/m)	K_{RR}	1050

به‌طور مثال، سختی و مقاومت خمشی بین قطعه‌ها و رینگ‌ها با استفاده از روش زیر به دست می‌آید:

ابتدا با استفاده از رابطه‌ی ۳-۶، مقدار لنگر خرابی بین سگمنت‌ها با فرض این‌که میزان دوران مجاز بین سگمنت‌ها ۱٪ می‌باشد، تعیین می‌شود. در این رابطه θ و N و E_{cm} و e و a به‌ترتیب میزان دوران، نیروی محوری متوسط در رینگ‌ها، مدول الاستیسیته‌ی سگمنت، خروج از مرکزیت بار و عرضی که سگمنت‌ها با هم در تماس هستند، می‌باشند. مقادیر هر یک از این پارامترها در تحقیق مذکور در زیر بیان شده است [۳]:

$$\theta = 1\% \ , N = 1100 \ \frac{KN}{m} \ , \alpha = 0.3 \ m \ , E_{cm} = 35Gpa$$

$$\theta = \frac{8N}{9.a.E_{cm}(1-2\times\frac{e}{a})^2} \quad for \ \frac{e}{a} > \frac{1}{6}$$

$$0.01 = \frac{8\times1100\times1000}{9\times0.30\times35\times10^9\times(1-2\times\frac{e}{a})^2} \qquad (۶)$$

$$\frac{e}{a} = 0.45 > \frac{1}{6}$$

$$\frac{e}{a} = \frac{M}{N.a}$$

$$\frac{e}{a} = \frac{M}{N.a} = 045 \quad \rightarrow \quad M = N \times a \times 0.45 = 1100000 \times 03 \times 045 \ = 148.5 \ \ KN.\frac{m}{m}$$

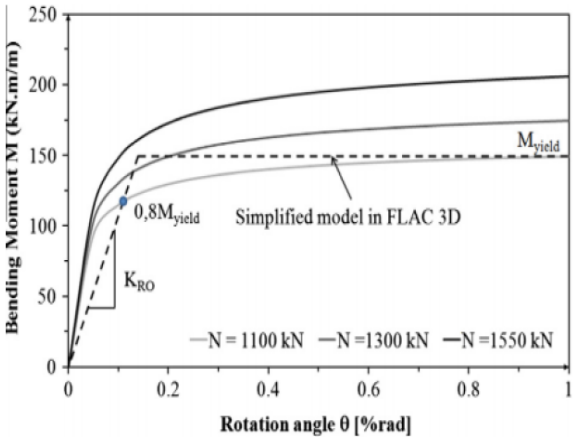
$$M \cong 150 \ \ KN.\frac{m}{m}$$

رابطه‌ی بین لنگر و دوران بین قطعه‌ها را تقریباً می‌توان همانند شکل (۷) به‌صورت دو خط ساده‌سازی کرد. همان‌طور که بیان شد، میزان لنگر خرابی ۱۵۰ به‌دست آمد. با توجه به این‌که $0.8\times M_{yield}$ بر روی خط گذرنده از مبدأ قرار دارد و شیب این خط بیانگر سختی خمشی بین سگمنت‌ها می باشد، می‌توان سختی خمشی سگمنت‌ها را به دست آورد [۴] .

$$M_{yield}\left(N = 1100\frac{KN}{m}\right) = 150 \ \ KN\frac{m}{m} \quad , \theta = 1\%$$

$$0.8 \times M_{yield} = 0.8 \times 150 = 120KN.\frac{m}{m} \qquad \theta = 0.1212\%$$

$$K_{\theta R} = \frac{120}{0.001212} = 98.41 \ \frac{KN.m}{rad.m} \cong 100 \ \frac{KN.m}{rad.m}$$



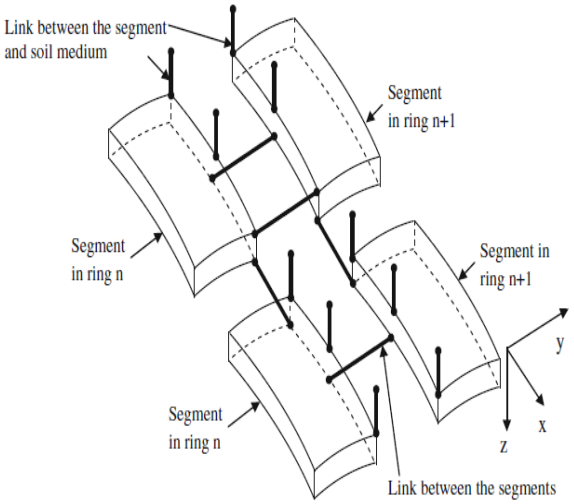
شکل(۷): رابطه بین لنگر و دوران سگمنت‌ها [۴]

علاوه بر فنرهای مذکور، فنرهایی بین سگمنت‌ها و خاک اطراف تونل تعریف شد که مقدار سختی این فنرها بنا به توصیه‌ی راهنمای برنامه FLAC3D ، ۱۰۰ برابر مقدار به‌دست آمده از رابطه‌ی زیر انتخاب شد:

$$\mathrm{Maz}[\frac{k+\frac{4}{3}G}{\Delta z_{min}}]$$

که در آن، K و G به ترتیب مدول بالک و مدول برشی خاک می باشند و مقدار Δzmin فاصله‌ی کوچک‌ترین اندازه‌ی مش خاک در جهت نرمال می‌باشند. روابط مربوط به K و G به‌ترتیب در روابط (۴) و (۵) تعریف شدند.

نحوه‌ی اتصال قطعه‌ها به هم و همچنین اتصال آن‌ها به خاک اطراف تونل مطابق شکل (۸) می باشد[۴].



شکل(۸): اتصال بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها به هم و اتصال سگمنت‌ها با خاک اطراف[۳]

همان‌طور که در شکل بالا مشاهده می‌شود اتصال بین قطعه‌ها باهم و همچنین اتصال بین سگمنت‌ها با خاک توسط درجه‌های آزادی تعریف شد که مقدار عددی همگی محاسبه شد و در کدها لحاظ گردید.بدین ترتیب اتصال سازه‌ای سگمنت‌ها برقرار گردید[۳].

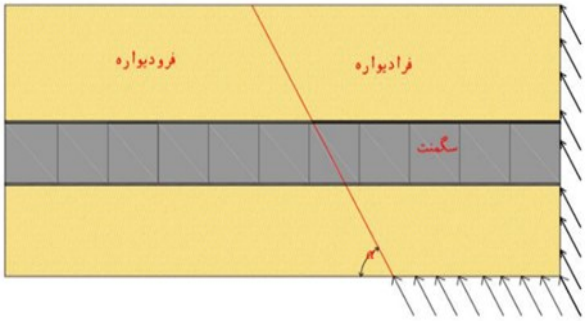
۲-۶- صفر کردن تمامی سرعت‌ها و جابجایی‌ها

با توجه به این‌که هدف این پایان‌نامه بررسی تأثیر حرکت گسل بر میزان جابجایی‌های تونل می‌باشد، بایستی بعد از به تعادل رسیدن مدل، جابجایی‌ها و سرعت‌ها را در تمامی گره‌های مدل صفر کرد. لذا قبل از حفاری و بعد از حفاری مدل به تعادل رسیده و جابجایی‌ها و سرعت‌ها در تمامی گره‌ها صفر لحاظ شد.

۲-۷- اعمال گسلش

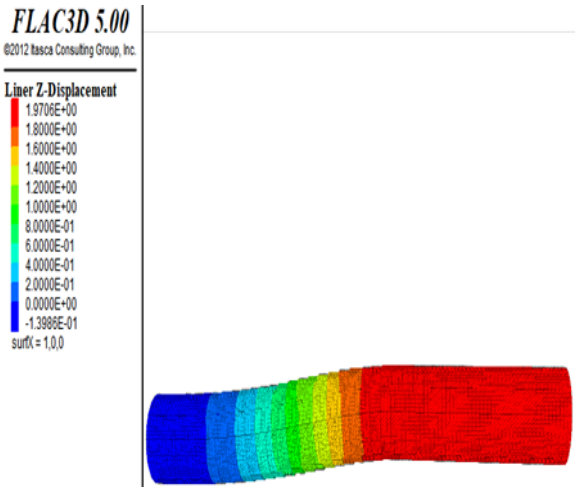
در تحقیق حاضر، گسلش معکوس مدل‌سازی شده است. برای اعمال جابجایی معین به یک مرز، باید به مرزها در جهت مورد نظر، سرعت اعمال کرد. لازم به ذکر است که این سرعت باید در

تعدادی گام اعمال شود. به‌عبارت‌دیگر، اگر جابجایی مورد نظر d باشد، بایستی سرعت V در طی N گام اعمال شود. ($N=\frac{d}{v}$) با توجه به این‌که جابجایی گسل در امتداد صفحه‌ی گسل ۲/۵ متر فرض شده است، بنابراین تغییر شکل‌ها بزرگ بوده و لازم است که در هر گام اعمال گسل، مختصات نقاط با توجه به جابجایی‌های اعمالی تغییر کند. با توجه به اینکه این ماکزیمم جابه‌جایی در جهت مایل اعمال شده است لذا مقدار آن را در جهت افقی و قائم تجزیه کرده و درواقع سرعت گسلش را در دو جهت افقی و مایل اعمال می‌کنیم. شکل شماتیک نحوه‌ی اعمال گسلش معکوس در شکل(۹) نشان داده شده است.

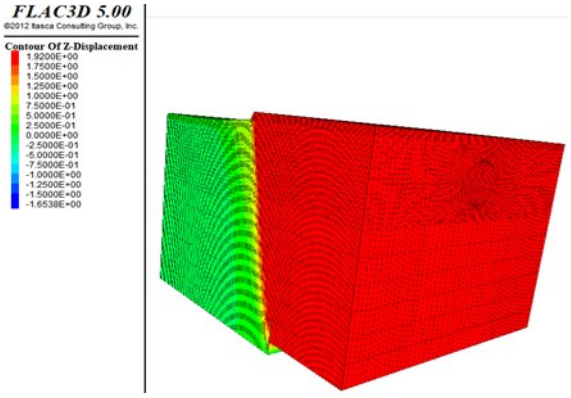


شکل (۹): شکل شماتیک نحوه اعمال گسلش معکوس

برای اعداد اعمالی گسلش بر اساس گام و سرعت اعمالی جدولی تنظیم می‌گردد.برای به دست آوردن این مقادیر مقدار ۲/۵ را به‌اندازه زاویه گسلش که ۶۰ و ۷۵ و۸۰ و ۸۵ می‌باشد تجزیه می‌کنیم سپس مقدار زمان را طوری قرار می‌دهیم تا اولاً در نتایج حاصل گسیختگی اتفاق نیفتد، ثانیاً خروجی‌ها با مدل فیزیکی مطابقت داشته باشد.



شکل (۹): خرابی حاصل از گسلش معکوس زاویه ۷۵ درجه و سربار ۳ متر برای تونل



شکل (۱۰): خرابی حاصل از گسلش معکوس زاویه ۸۰ درجه و سربار ۳ متر برای رینگ‌ها

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مقدمه

در این قسمت، اثرات حرکت گسل معکوس بر روی عملکرد تونل‌های قطعه‌ای از طریق مطالعه‌ی پارامتریک مورد بررسی قرار می‌گیرد تا اهمیت هر یک از پارامترهای تأثیرگذار تعیین شود. این مطالعه شامل ۲۴ تست بوده که در آن‌ها، تأثیر، زاویه گسل، عمق قرارگیری تونل و همچنین مقاومت و سختی بین سگمنت‌ها بر روی پروفیل تغییر شکل تونل و پروفیل سطح زمین و همچنین ناحیه‌ی متأثر در تونل (Le) و سطح زمین (W) در اثر حرکت گسل معکوس مورد ارزیابی قرار می‌گیرد.همان‌طور که قبلاً گفته شد به دلیل اینکه عمده گسل‌های کشور عزیزمان از نوع معکوس می‌باشد اهمیت مطالعه این نوع از گسلش نسبت به بقیه انواع گسل بیشتر می باشد.

با فرض این‌که ابعاد مدل عددی ۵۰ برابر ابعاد مدل فیزیکی کیانی و همکاران می‌باشد، تونلی با قطر ۶ متر در عمق۳ و ۴/۵ و ۶ و ۷/۸ و ۱۰ و ۱۲ متری که در خاک دانه‌ای متراکم واقع‌شده است و گسلی با زاویه‌ی ۶۰ و ۷۵ و ۸۰ و ۸۵ درجه (نسبت به محور افقی) آن را قطع می‌کند با سرعت‌های مختلف گسلش مدلسازی شده است. در ادامه تصاویری از مدلسازی و خرابی حاصل از گسلش برای تونل را مشاهده می‌کنیم:

۳-۲-تحلیل نتایج

در این قسمت ابتدا به صحت سنجی مدل عددی با مدل فیزیکی می‌پردازیم و سپس نتایج حاصل از تغییر پارامترها نظیر تغییر عمق قرارگیری، تغییر زاویه گسلش و همچنین تغییر ضخامت خواهیم پرداخت.

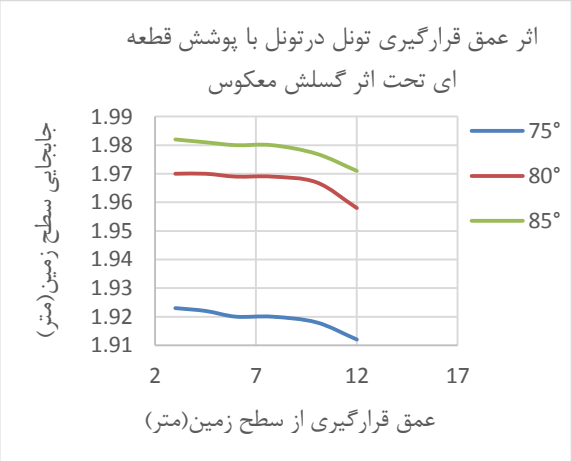
۳-۳- صحت سنجی

با توجه به مواردی که گفته شد این تحقیق نمونه مدلسازی عددی تحقیق صورت گرفته توسط کیانی و همکاران می باشد. برای مطابقت دادن مدل فیزیکی با مدل عددی از مدلی با مشخصات زیر استفاده می‌کنیم.

جدول (۲): مشخصات مدل عددی و فیزیکی برای صحت سنجی

نوع آزمایش	نوع گسلش	عمق قرارگیری تونل(متر)	زاویه گسلش	قطر داخلی(متر)	
فیزیکی	معکوس	۴/۵	۶۰	۵	
عددی	معکوس	۴/۵	۶۰	۶۰	۵

در مدل فیزیکی مقدار جابجایی گسل در راستای قائم به ۳۴/۸ میلی‌متر(۱/۷۴ متر در واقعیت) رسید.همچنین مقدار بالاآمدگی در سقف مدل به ۲/۱۱ میلی‌متر(۱۰/۵ سانتی‌متر در واقعیت) رسید. این مقادیر در مدل عددی برای جابجایی گسل در راستای قائم به ۱/۷۳ متر رسید و برای بالاآمدگی سقف مدل به ۹/۵ سانتی‌متر رسید که مقدار خطا برای آن قابل‌قبول می‌باشد.همچنین شکل حاصل از خرابی قطعه‌ها و مدل تطابق خوبی باهم داشتند.

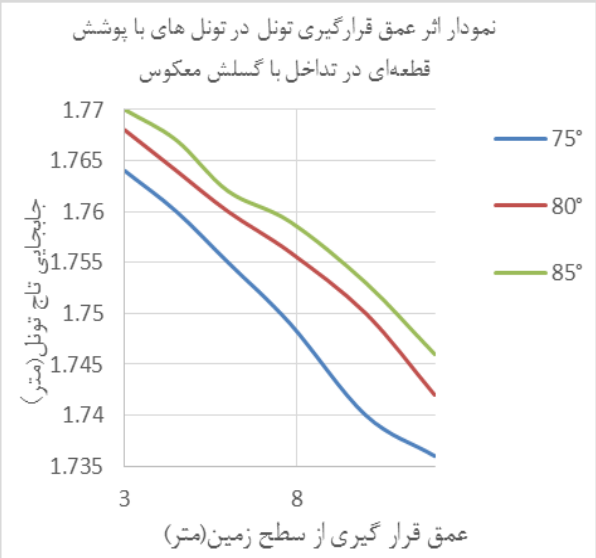


شکل (۱۲): نمودار جابجایی‌های سطح زمین با افزایش عمق قرارگیری تونل در زوایای گسلش ثابت

۳-۴- اثر تغییر عمق قرارگیری تونل

برای بررسی اثر عمق قرارگیری تونل، در عمق‌های ۳ و ۴/۵ و ۶ و ۷/۸ و ۱۰ و ۱۲ متر جابجایی‌های سطح زمین و جابجایی قائم تاج تونل در زوایای ثابت یادداشت و نمودار آن رسم گردید.

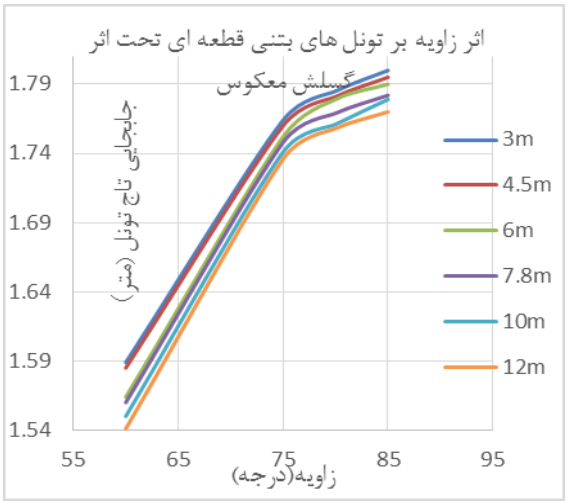
مشاهده می‌شود که با افزایش عمق قرارگیری تونل تحت اثر گسلش معکوس برای همه زوایا جابجایی‌های سطح زمین کاهش می‌یابد. نکته قابل‌توجه افزایش شیب تغییرات با افزایش سربار بالای تونل می‌باشد. مقدار جابجایی ایجاد شده در تراز تاج تونل نیز مطابق شکل (۱۲) مشابه به رفتار سطح زمین می‌باشد و با افزایش عمق شیب تغییرات افزایش پیدا می‌کند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش وزن توده خاک بر اثر افزایش سربار و در نتیجه کاهش توان گسل برای اعمال جابجایی در کل مقطع خاک باشد.



شکل (۱۳): نمودار جابجایی‌های تاج تونل با افزایش عمق قرارگیری تونل در زوایای گسلش ثابت

۳-۵- اثر تغییر زاویه گسلش معکوس

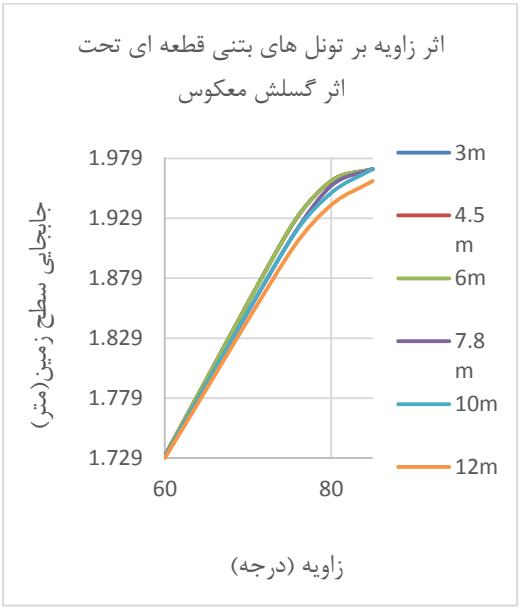
برای بررسی اثر تغییر زاویه در گسلش معکوس، در زوایای ۶۰ و۷۵ و ۸۰ و ۸۵ متر جابجایی‌های سطح زمین و جابجایی قائم تاج تونل در عمق‌های ثابت یادداشت و نمودار آن رسم گردید.



شکل (۱۴): نمودار جابجایی‌های قائم تاج تونل با افزایش زاویه در عمق‌های ثابت

مشاهده می‌شود که با افزایش زاویه گسلش تونل تحت اثر گسلش معکوس برای همه عمق‌ها جابجایی‌های سطح زمین کاهش می‌یابد.

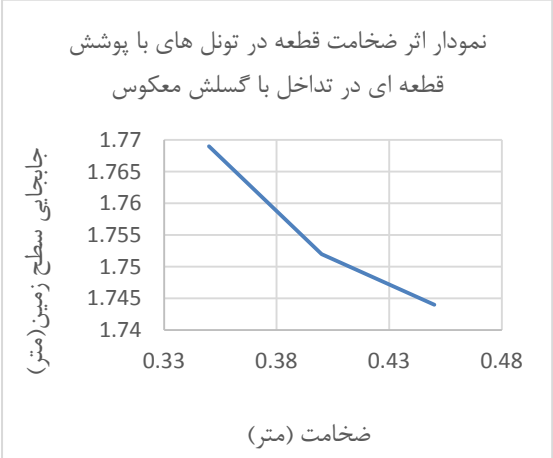
با بررسی شکل (۱۲) مشاهده می‌گردد که در گسلش معکوس با افزایش زاویه گل از ۶۰ به ۷۵ درجه مقدار جابجایی‌های قایم تاج تونل حدود ۲۰ سانتی‌متر افزایش پیدا کرده و سپس با افزایش مجدد زاویه گسلش این مقدار تقریباً ثابت می‌ماند. مطابق شکل ۱۵ در گسلش معکوس با افزایش زاویه گسلش مقدار جابجایی‌های سطح زمین افزایش پیدا می‌کنند. در گسلش معکوس با افزایش زاویه گسلش از ۷۵ به ۸۵ مقدار تغییرات ایجاد شده در میزان جابجایی تراز تاج تونل بسیار کمتر می‌باشد.



شکل (۱۵): نمودار جابجایی‌های قائم سطح زمین با افزایش زاویه در عمق‌های ثابت

۳-۶- اثر تغییر ضخامت

برای بررسی تغییر ضخامت پوشش سگمنتی بر روی پروفیل سطح زمین و پروفیل تونل ضخامت‌های ۰/۳۵ و ۰/۴۰ و ۰/۴۵ متر به‌عنوان پوشش تونل در نظر گرفته شد. می‌توان ملاحظه کرد که افزایش ضخامت سگمنت در هنگام مواجهه با گسل معکوس می‌تواند منجر به کاهش جابجایی‌های سطح زمین و تونل شود. به دلیل ماهیت فشاری گسل معکوس و همچنین عملکرد بهتر سگمنت‌ها در فشار، بازشدگی در درزهای عرضی آن‌ها مشاهده نمی‌شود.



شکل (۱۶): نمودار جابجایی‌های سطح زمین در اثر افزایش ضخامت سگمن‌ها

۴- نتیجه‌گیری

تونل‌ها معمولاً جزو زیرساخت‌های یک کشور به‌حساب می‌آیند. برخی از تونل‌ها از قبیل تونل‌های تأسیسات و مترو می‌توانند جزو شریان‌های حیاتی محسوب گردند. توسعه روش‌های تونل سازی، استفاده از TBM و به‌تبع آن پوشش قطعه‌ای را موجب گردیده است. عدم شناخت دقیق از مکانیزم خرابی تونل‌های قطعه‌ای تحت اثر گسلش ضرورت تحقیق حاضر بوده است. استفاده از مدل‌سازی در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی یکی از بهترین روش‌های شناخت رفتار می‌باشد، خصوصاً در شرایطی که تاریخچه موردی معتبری در خصوص موضوع وجود نداشته باشد. در این پژوهش تونل قطعه‌ای و جابجایی ماندگار زمین (گسلش معکوس) که در سانتریفیوژ ژئوتکنیکی توسط کیانی و همکاران مدلسازی شده بود، مورد صحت سنجی قرار گرفته است. هدف اصلی پژوهش شناخت مکانیزم خرابی احتمالی تونل‌های قطعه‌ای در اثر گسلش بوده است.در این پژوهش ۲۴ مدل عددی جهت شناخت رفتار تونل‌های قطعه تحت اثر گسلش معکوس ساخته‌شده است. قطعات بتنی پیش‌ساخته یا به اصطلاح "سگمنت بتنی" اغلب به‌عنوان سیستم نگهداری تونل‌های شهری به کار می‌روند. به دلیل برخی محدودیت‌ها، گاهی این تونل‌ها ناگزیر به عبور از گسل‌های موجود در مسیرشان می‌باشند. حرکت این گسل‌ها ممکن است پایداری تونل‌ها را به مخاطره بیندازد و به‌تبع آن ممکن است تونل‌ها کارایی خود را از دست داده و حمل‌ونقل شهری را با مشکلاتی مواجه سازند. در نتیجه، شناخت تأثیر حرکت انواع گسل بر عملکرد تونل‌های شهری با توجه به لرزه‌خیز بودن بسیاری از مناطق کشور ایران امری ضروری به نظر می‌رسد. یکی از راه‌های شناخت این تأثیر بر روی تونل‌ها، مطالعه این مسئله با استفاده از روش‌های عددی می باشد. لذا در این

پژوهش از نرم‌افزار تفاضل محدودی FLAC 3D برای مدل‌سازی مسئله مورد نظر استفاده شد.

جهت کالیبراسیون مدل عددی از نتایج مدلسازی فیزیکی استفاده شد. بدین ترتیب که تعداد گام‌های اعمال حرکت گسل در نرم‌افزار طوری تنظیم شد که نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی (با توجه به انتخاب مدل رفتاری و تخصیص پارامترهای آن و همچنین حساسیت سنجی نسبت به محل مرزهای مدل) با نتایج حاصل از مدل فیزیکی در سانتریفیوژ همخوانی داشته باشد. سپس به مطالعه پارامتریک، تأثیر عوامل مختلفی همچون ضخامت سگمنت، عمق قرارگیری تونل، زاویه‌ی گسل نسبت به افق مورد توجه قرار گرفت. تعداد آنالیزهای انجام گرفته در این تحقیق شامل۲۴ تست می‌باشد که در ادامه اهم نتایج ذکر می‌شود.

هدف اصلی این تحقیق بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر رفتار تونل‌های ساخته‌شده در ناحیه نزدیک گسل می‌باشد. به این منظور پارامترهای زاویه گسل، ضخامت سگمنت، سر بار، مورد بررسی و تحقیق قرار گرفته است.

با توجه به خروجی‌های این تحقیق می‌توان به نتایج زیر اشاره کرد:

- با افزایش ضخامت سگمنت جابجایی‌های تاج تونل و جابجایی‌های سطح زمین کاهش می‌یابد. مقدار این کاهش با توجه به داده‌های محاسبه شده ۳ درصد می‌باشد.

- اثر عمق قرارگیری تونل در اثر حرکت انواع گسل‌ها بررسی گردید. افزایش عمق قرارگیری تونل در هنگام مواجهه با گسلش معکوس منجر به کاهش تغییر مکان‌های تونل و سطح زمین می‌شود.مقدار این کاهش با توجه به داده‌های محاسبه شده ۱۱ درصد می‌باشد.

- همچنین مشاهده گردید در گسلش معکوس افزایش زاویه‌ی گسل نسبت به افق منجر به افزایش جابجایی‌های تونل و سطح زمین می‌شود. مقدار این افزایش با توجه به داده‌های محاسبه شده ۱۳ درصد می باشد.

۵- مراجع

[1] M. Kiani, et al., "Experimental evaluation of vulnerability for urban segmental tunnels subjected to normal surface faulting." Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 89, pp. 28-37, 2016.

[2] M. Zaheri, et al., "Performance of segmental and shotcrete linings in shallow tunnels crossing a transverse strike-slip faulting," Transportation Geotechnics, vol. 23,: p. 100333, 2020.

[3] N.-A.Do, et al., "2D numerical investigation of segmental tunnel lining behavior," Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 37, pp. 115-127, 2013.

[4] B. Das and K. Sobhan, "Principles of Geotechnical Engineering, CENGAGE Learning, Stamford, USA," 2013.

[5] M. H. Baziar, et al., "Centrifugemodeling of interaction between reverse faulting and tunnel," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, vol. 65, pp. 151-164, 2014.

[6] M.-L. Lin, et al., "The deformation of overburden soil induced by thrust faulting and its impact on underground tunnels," Engineering Geology, vol. 92(3-4), pp. 110-132, 2007.

[7] Z. Zhang, et al., "Influence of fault on the surrounding rock stability of a tunnel: Location and thickness," Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 61, pp. 1-11, 2017.