

## "تونلسازی و تغییر اقلیم"

۶-۸ آذر ماه ۱۳۹۶

### بررسی اندرکنش ترانشه و تونل مجاور (مطالعه موردی: تونل ۹ آزادراه تهران-شمال)

میلاد قهرمانی<sup>۱</sup>، کورش شهريار<sup>۲</sup>، مرتضی جوادى اصطهباناتی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد مکانیک سنگ، دانشگاه صنعتی امیرکبیر؛ miladq71@aut.ac.ir

<sup>۲</sup> استاد دانشگاه صنعتی امیرکبیر (پلی تکنیک تهران)، دانشکده مهندسی معدن و متالوژی. k.shahriar@aut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، mortezjavadi@gmail.com

### چکیده فارسی

در بسیاری از نواحی کوهستانی، پدیده زمین لغزش و ناپایداری شیروانی های مجاور احداث تونل بعنوان یکی از مسائل مهم هم در زمان طراحی و هم در زمان بهره برداری از اهمیت بسیار زیادی برخوردار است. با توجه به لزوم ترانشه برداری و احداث شیروانی‌ها در مجاورت تونل‌های کوهستانی، بررسی ریسک‌های ناپایداری و مکانیزم‌های شکست احتمالی در جهت ایجاد شرایط ایمن بهره برداری امری ضروری بوده که رسیدن به این هدف، نیازمند تحلیل‌های پیچیده است. در این مقاله، اندرکنش سازه های تونل شماره ۹ آزادراه تهران-شمال و ترانشه سنگی مجاور آن (تاثیر هریک از این سازه ها بر یکدیگر) از نقطه نظر تحلیل های پایداری و بهینه سازی شیب ترانشه مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، از روش المان محدود و نرم‌افزار Phase2 برای ارزیابی پایداری مجموعه تونل و ترانشه تحت شیب‌های متفاوت ترانشه استفاده شده است. تحلیل‌های این سیستم برای چهار شیب مختلف ترانشه به صورت ۱ به ۰/۱، ۱ به ۰/۲، ۱ به ۰/۳ و ۱ به ۰/۴ برای یافتن شیب بهینه از لحاظ پایداری و اقتصادی انجام شد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد: ۱- نرخ افزایش جابجایی‌ها در دیواره تونل بعد از حفاری ترانشه با شیب رابطه معکوس دارد، ۲- بیشترین میزان فاکتور ایمنی و کمترین تغییر شکل‌های اعمالی در اثر حفاری ترانشه با شیب ۱ به ۰/۱ حاصل شده و این شیب بعنوان گزینه برتر پیشنهاد می‌شود.

**واژه‌های کلیدی:** اندرکنش ترانشه و تونل، لغزش شیروانی، شیب بهینه ترانشه

### ۱- مقدمه

در مناطق کوهستانی، شیروانی‌های طبیعی برای ساخت جاده‌ها و دیگر زیرساخت‌ها تعدیل می‌شوند، و مشکل اصلی شیروانی‌های مصنوعی (ترانشه)، ناپایداری احتمالی آن می‌باشد. بررسی منطقه در خطر و مکانیزم‌های شکست احتمالی برای اطمینان از پایداری ضروری است. از طرفی حفر تونل در نزدیکی این ترانشه‌ها (یا شیروانی‌های طبیعی) و اندرکنش این دو سازه این حساسیت را بالاتر می‌برد [۱]. تحلیل‌های سنتی تعادل حدی، معمول‌ترین تکنیک‌ها در طراحی، بر اساس فاکتور ایمنی شیروانی و ساختارهای مشابه می‌باشد. محبوبیت این روش‌ها به دلیل سادگی، توانایی ارزیابی حساسیت پایداری به پارامترهای ورودی با استفاده از داده ورودی می‌نی‌مم می‌باشد. علی‌رغم فواید مذکور، روش تعادل حدی برخی کاستی‌های برجسته‌ای مثل نادیده گرفتن رفتار تنش‌کرنش سنگ‌ها و خاک‌ها و اعمال فرض‌های اختیاری برای ایجاد شرایط معین استاتیکی نیز دارد [۴].

روش المان محدود FEM جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی تعادل حدی می‌باشد؛ نقطه قوت اصلی این روش در مقابل روش المان محدود این است که لازم نیست هیچ فرضی در مورد شکل یا موقعیت سطح شکست، نیروهای جانبی لغزه و جهات آن‌ها گرفته شود [۵]. همچنین روش کاهش مقاومت برشی (SSR) با مکانیزم روش‌های تعادل حدی به FEM امکان محاسبه فاکتور ایمنی را برای شیروانی‌ها می‌دهد. روش SSR

مخصوصاً هنگامی کاربردی است که چندین حالت شکست متفاوت ممکن باشد؛ این روش به طور اتوماتیک مکانیزم‌های بحرانی شکست احتمالی را می‌یابد. علی‌رغم فواید روش SSR، به دلیل اطلاعات محدود گزارش‌شده در مورد استفاده از این تکنیک، استفاده از آن شیوع پیدا نکرده و مطالعات بیشتر در این زمینه ضروری است [۳].

داوسون و همکاران (۱۹۹۹)، گریفیث و همکاران (۱۹۹۹) و همما و همکاران (۲۰۰۴) از تکنیک SSR برای محاسبه فاکتورهای ایمنی شیروانی‌ها استفاده نموده‌اند. در این تکنیک مقاومت برشی مواد تا ناپایداری شدن شیروانی کاهش می‌یابد؛ این نقطه ناپایداری فکتور ایمنی شیروانی نامیده می‌شود [۲]. از این جهت روش کاهش مقاومت، همان تعریف روش تعادل حدی را دارد، با این تفاوت که فرض‌های محدود کننده آن را ندارد [۱]. فاکتور ایمنی مساوی مقدار کاهش مقاومت برشی است که باعث شکست شیروانی می‌شود [۴].

در این مقاله اندرکنش تونل و ترانشه به صورت مطالعه موردی تونل شماره ۹ آزادراه تهران-شمال مورد مطالعه قرار گرفته است. در بخش اول معرفی خلاصه‌ای از تونل و مشخصات ژئوتکنیکی و زمین‌شناسی محدوده آن ارائه شده‌است. در ادامه با استفاده از مدل‌های عددی برنامه دوبعدی کرنش صفحه‌ای المان محدود Phase2 برای محاسبه تنش‌ها و جابجایی‌ها حول تونل و ترانشه محاسبه گردید. مقادیر فاکتور ایمنی و تغییرشکل‌ها در چهار حالت شیب متفاوت برای ترانشه شامل ۱ به ۰.۱، ۱ به ۰.۲، ۱ به ۰.۳ و ۱ به ۰.۴ محاسبه شده و تفسیر گردیدند. برای یافتن حالت بهینه از نظر پایداری و اقتصادی بودن طرح ارائه شده، میزان عملیات خاکبرداری مورد نیاز نیز در نظر گرفته شده‌است.

## ۲- معرفی مورد مطالعاتی

پروژه آزادراه تهران-شمال به منظور تامین ارتباط مطمئن، سریع و ارزان بین منطقه شمالی و مرکزی کشور و سهولت ارتباط با کشورهای همسایه شمالی در حال اجراست. این آزادراه بخشی از آزادراه سراسری شمال-جنوب است که کوتاهترین مسیر ارتباطی دریای خزر با خلیج فارس بوده و در ترانزیت منطقه عمده‌ترین نقش را بر عهده خواهد داشت. ناحیه مورد بررسی بخشی از رشته‌کوه البرز مرکزی و دشت تهران را در بر می‌گیرد. تونل ۹ آزادراه تهران-شمال در محدوده کرج-سولقان و حدفاصل K9+475 تا K9+835 قرار گرفته است. در این محدوده ناودیس بزرگی در راستای شمال باختری-جنوب خاوری قابل مشاهده است که با نهشته‌های ائوسن پیشین تا ائوسن پسین متمایز است. توده‌سنگ دربرگیرنده تونل از لایه‌های متوسط تا ضخیم ماسه‌سنگ، توف سبز و کنگلومرا تشکیل شده و کیفیت سنگ سخت را داراست. درزه و ترک‌ها توسعه یافته‌اند و سنگ بستر در ورودی و خروجی تونل بیرون‌زدگی دارد. پوشش گیاهی در شیروانی‌های این منطقه بسیار پراکنده و کم‌پشت بوده و بیرون‌زدگی سنگ آشکار می‌باشد. در این محدوده میانگین سالانه دما ۱۸ درجه سانتیگراد می‌باشد که بازه دمایی از ۲۵- تا ۴۱ درجه می‌باشد. میزان بارش‌ها در بخش‌های شمالی و جنوبی پروژه بسیار متفاوت است؛ در بخش جنوبی که تونل ۹ در آن واقع شده است بارش‌ها اغلب به صورت برف و بیشینه ماهیانه آن ۵۸mm در ماه‌های آبان، آذر، دی و بهمن می‌باشد.

قبل از تونل ۹ محدوده‌ای به طول تقریبی ۱۲۰ متر به صورت ترانشه بلند طراحی گردیده بود که بعد از مطالعات تکمیلی و بررسی‌های فنی اقتصادی ۱۰۰ متر به طول تونل برگشت (چپ) اضافه گردید و لاین رفت به صورت ترانشه در نظر گرفته شد. ترانشه و تونل با انفجارهای مرحله‌ای حفاری می‌شوند. شکل ۱ پورتال تونل را نشان می‌دهد که هنوز ترانشه حفاری نشده‌است. با حفاری ترانشه (با فاصله می‌نی‌مم ۵ متر) روباره تونل کاهش می‌یابد.



شکل (۱): الف) توده‌سنگ محل ترانشه قبل از حفاری ب) پورتال تونل

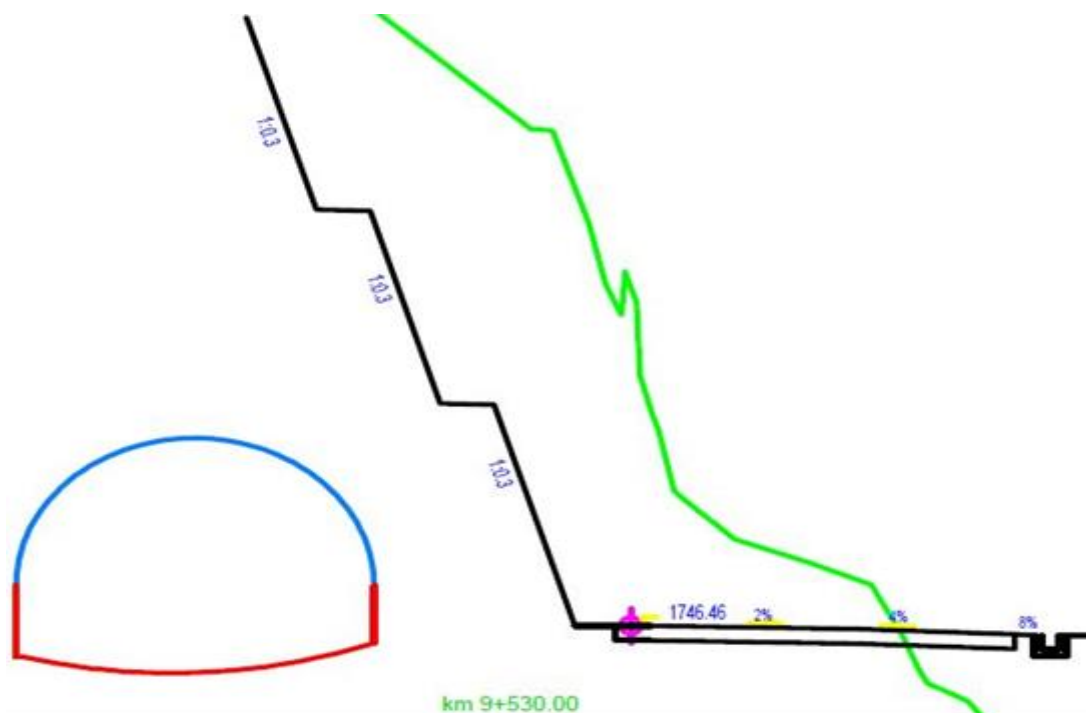
در طول مطالعات ژئوتکنیکی آزادراه دو گمانه در منطقه مورد نظر حفاری تونل شماره ۹ تا عمق ۵۰ متری حفاری شده‌است که داده‌های مورد استفاده در این تحلیل‌ها از گزارش‌ها و با استفاده از آزمایش‌های ژئوتکنیکی روی نمونه‌های حاصل از این گمانه‌ها استخراج شده‌است. آب زیرزمینی در این منطقه تا حد زیادی مربوط به آب ذخیره شده در منفذهای سنگ بستر بوده و نیازی به وارد کردن آن به محاسبات وجود ندارد. توده‌سنگ در رده‌بندی RMR در رده ۳ قرار می‌گیرد و از لایه‌های متوسط تا ضخیم ماسه‌سنگ گراولی، توف سبز و کنگلومرا تشکیل شده‌است و کیفیت خوبی دارد. جدول ۱ پارامترهای ورودی مورد استفاده در مدل‌سازی را نشان می‌دهد. در مدل‌ها، پارامترهای پیک (peak) به مقدار باقیمانده بعد از تکمیل شکست پلاستیک در ترانشه و حول تونل کاهش می‌یابند.

جدول (۱): مشخصات توده‌سنگ مورد استفاده در محاسبات

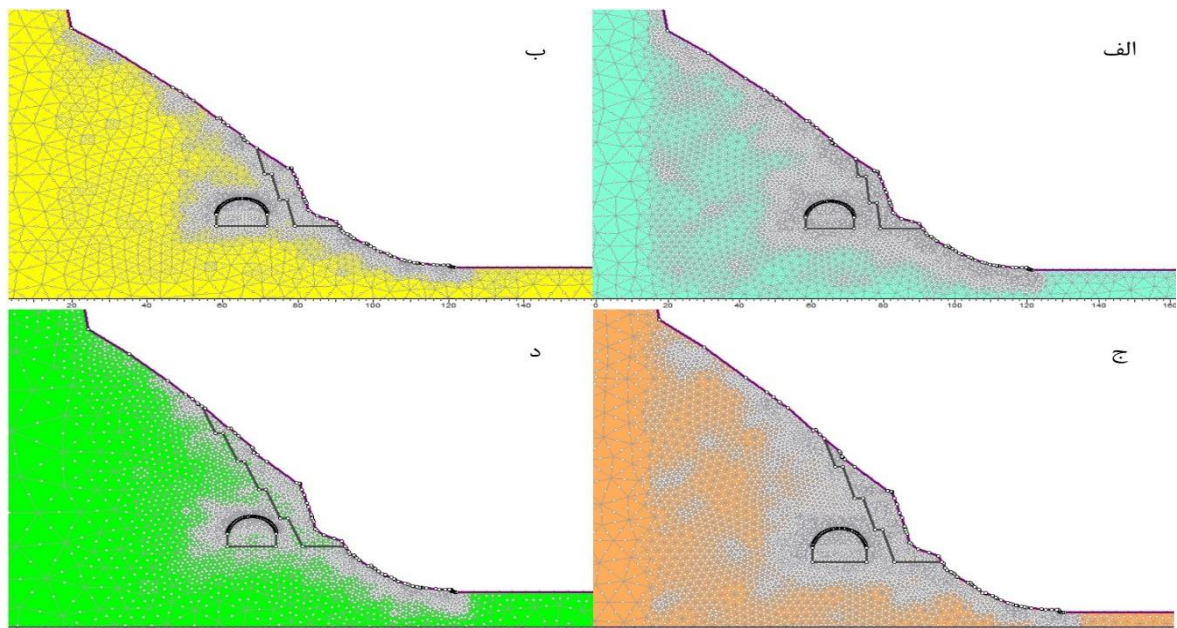
مشخصات مواد	
GSI	۵۵
RMR	۶۰
مقاومت فشاری ماده‌سنگ (MPa)	۱۰۰
مقاومت فشاری توده‌سنگ (MPa)	۴
مدول الاستیسیته ماده‌سنگ (MPa)	۲۲۰۰۰
مدول الاستیسیته توده‌سنگ (MPa)	۳۸۰۰
نسبت پواسون	۰.۲۲
وزن واحد حجم ( $MN/m^3$ )	۰.۰۲۴
چسبندگی (MPa)	۸
زاویه اصطکاک داخلی ماده‌سنگ	۵۴.۸۳

### ۳- مدل‌سازی و تحلیل پایداری

تحلیل‌ها در مقطع km 9+530 تونل و ترانشه با استفاده از Phase2 (المان محدود) صورت پذیرفت. توده‌سنگ به عنوان ماده الاستوپلاستیک در نظر گرفته شده و قانون شکست هوک و براون مورد استفاده قرار گرفت. برای ارزیابی پایداری این مقطع، تکنیک SSR موجود در بسته نرم‌افزار به کار گرفته شد. این تکنیک اجازه کاهش تدریجی پارامترهای مقاومت برشی را به کاربران می‌دهد تا یک فاکتور ایمنی برای شیروانی‌ها و ترانشه‌ها بتوان محاسبه نمود [۱]. فاکتور ایمنی هر شیب را می‌توان با توجه به فاکتور کاهش مقاومت SRF تعیین نمود. فاکتور کاهش مقاومت (SRF)، نسبت مقاومت الاستیک به مقاومت تسلیم می‌باشد و معادل فاکتور ایمنی شیروانی می‌باشد [۷]. توپوگرافی، موقعیت تونل و عرض جاده مجاور به همراه ترانشه با شیب ۱ به ۰.۳ در شکل ۲ قابل مشاهده است.



شکل (۲): موقعیت تونل و جاده مجاور در مقطع Km9+530



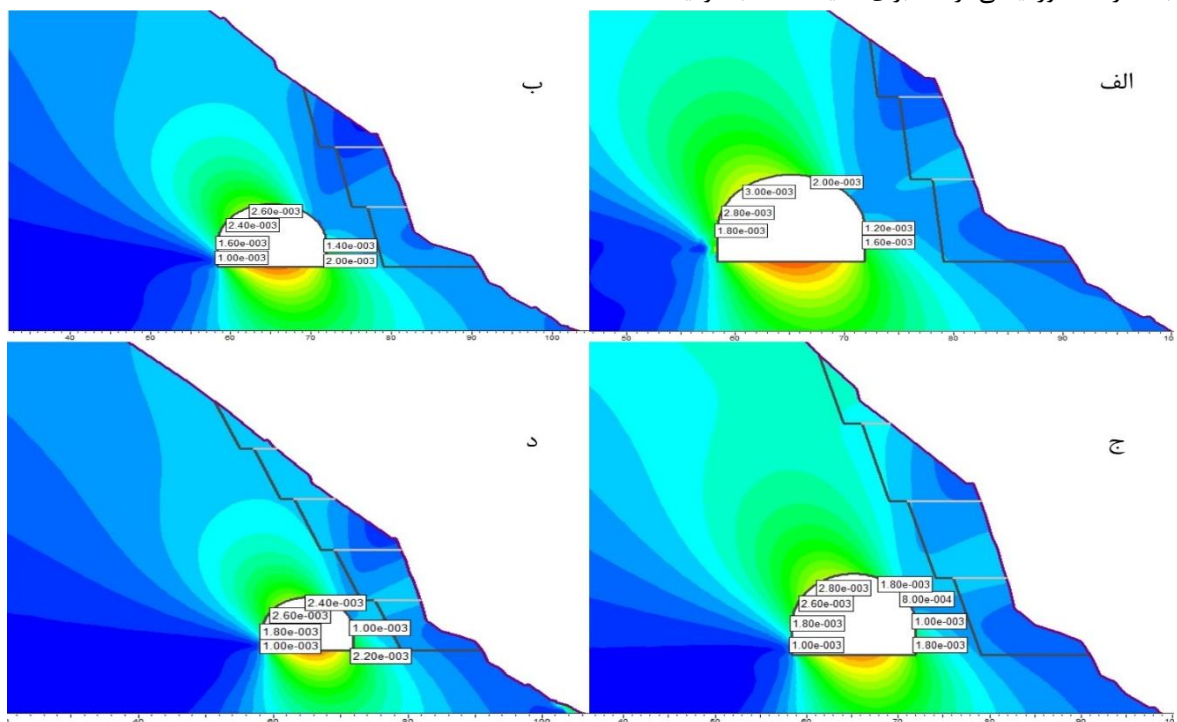
شکل (۳): مدل‌های محیط برنامه Phase2 برای هر یک از شیب‌های مورد ارزیابی ترانشه؛ الف) ۱ به ۰.۱ (ب) ۱ به ۰.۲ (ج) ۱ به ۰.۳ و د) ۱ به ۰.۴

روباره تونل از تاج به صورت عمودی تا سطح توپوگرافی ۲۶ متر است که بعد از حفاری ترانشه به ۱۹ متر کاهش خواهد یافت. فاصله افقی دیواره تونل نیز تا ترانشه از ۱۷ متر به ۱۱ متر کاهش می‌یابد. شکل ۳ مدل‌های عددی مربوط به چهار شیب متفاوت را نشان می‌دهد. حفاری‌ها به طور مرحله‌ای (تونل در دو مرحله و هر پله ترانشه در مرحله‌ای جداگانه) صورت گرفته‌اند. در مدل‌سازی‌ها نیز مانند شرایط عملیاتی، ابتدا تونل و سپس ترانشه حفاری شده است.

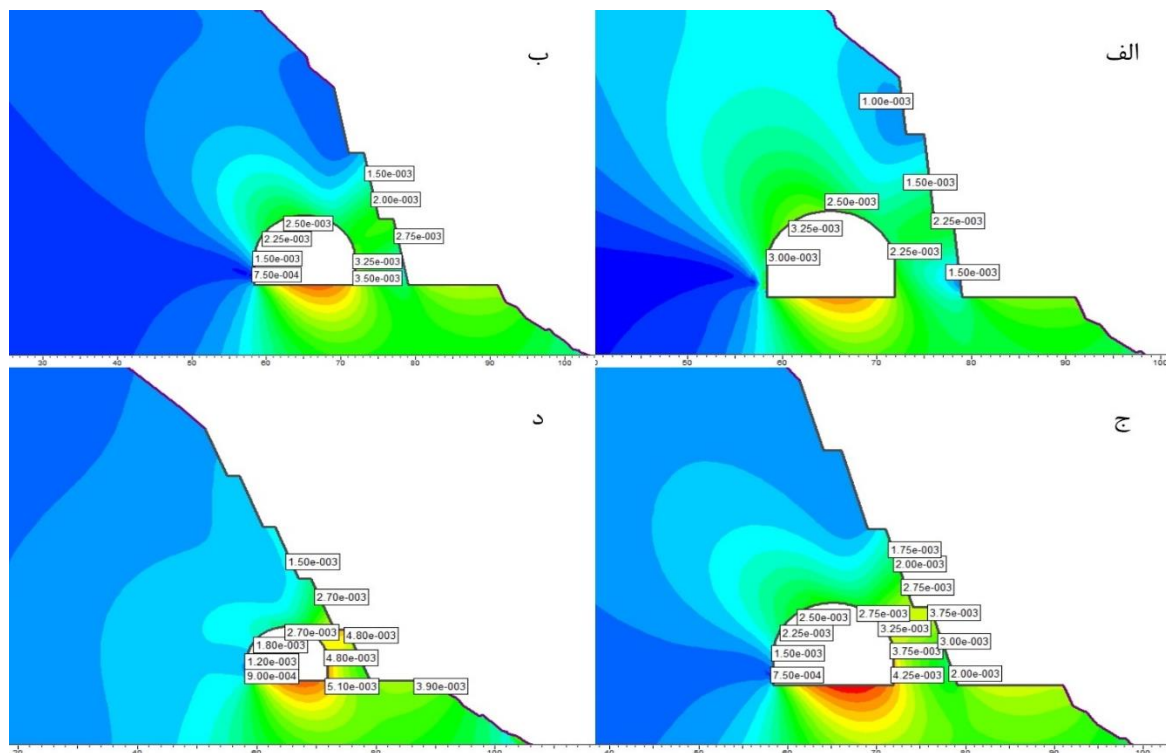
#### ۴- نتایج

##### ۴-۱- جابجایی‌ها و تغییرشکل

مطالعات پایداری ترانشه و تونل با بررسی جابجایی‌ها، تغییرشکل‌ها و فاکتور ایمنی در شیب‌های ۱ به ۰.۱، ۱ به ۰.۲، ۱ به ۰.۳ و ۱ به ۰.۴ صورت پذیرفت. در این مدل‌سازی‌ها حفاری به صورت مرحله‌ای صورت پذیرفت تا هماهنگی با شرایط واقعی داشته باشد. جابجایی‌های حول تونل و داخل ترانشه به همراه فاکتور ایمنی ترانشه برای مقایسه انتخاب گردید.



شکل (۴): جابجایی‌ها در اطراف تونل قبل از حفاری ترانشه



شکل (۵): میزان جابجایی‌ها در اطراف تونل و پله‌های ترانشه بعد از حفاری ترانشه

شکل ۴، جابجایی حول تونل را قبل از حفاری ترانشه نشان می‌دهد که به منظور مقایسه میزان افزایش جابجایی‌ها و تغییر شکل‌ها هر چهار مدل نمایش داده شده‌است. چون در این مرحله هنوز هیچ حفاری ترانشه‌ای صورت نگرفته است، تمامی مقادیر در چهار مدل مختلف نزدیکی قابل قبولی دارند. در شکل ۵ نیز میزان جابجایی‌ها در اطراف تونل و پله‌های ترانشه مشاهده می‌شود.

همانطور که در شکل ۵ مشخص است کمترین میزان افزایش جابجایی‌ها مربوط به شیب ترانشه ۱ به ۰.۱ می‌باشد؛ که جابجایی در دیواره سمت ترانشه تونل از مقدار ۱.۶mm به ۲.۲۵mm و به میزان ۰.۶۵mm افزایش یافته است. این میزان افزایش در شیب‌های ۱ به ۰.۲، ۰.۳ و ۰.۴ به ترتیب ۱.۵، ۲.۴۵ و ۲.۹ میلی‌متر می‌باشد. در تاج و دیواره غربی تونل (دیواره دور از ترانشه) میزان جابجایی‌ها قبل و بعد از حفاری ترانشه تفاوت چندانی ندارند. میزان بیشینه جابجایی‌ها در دیواره ترانشه نیز با پایین آمدن شیب، افزایش می‌یابد.

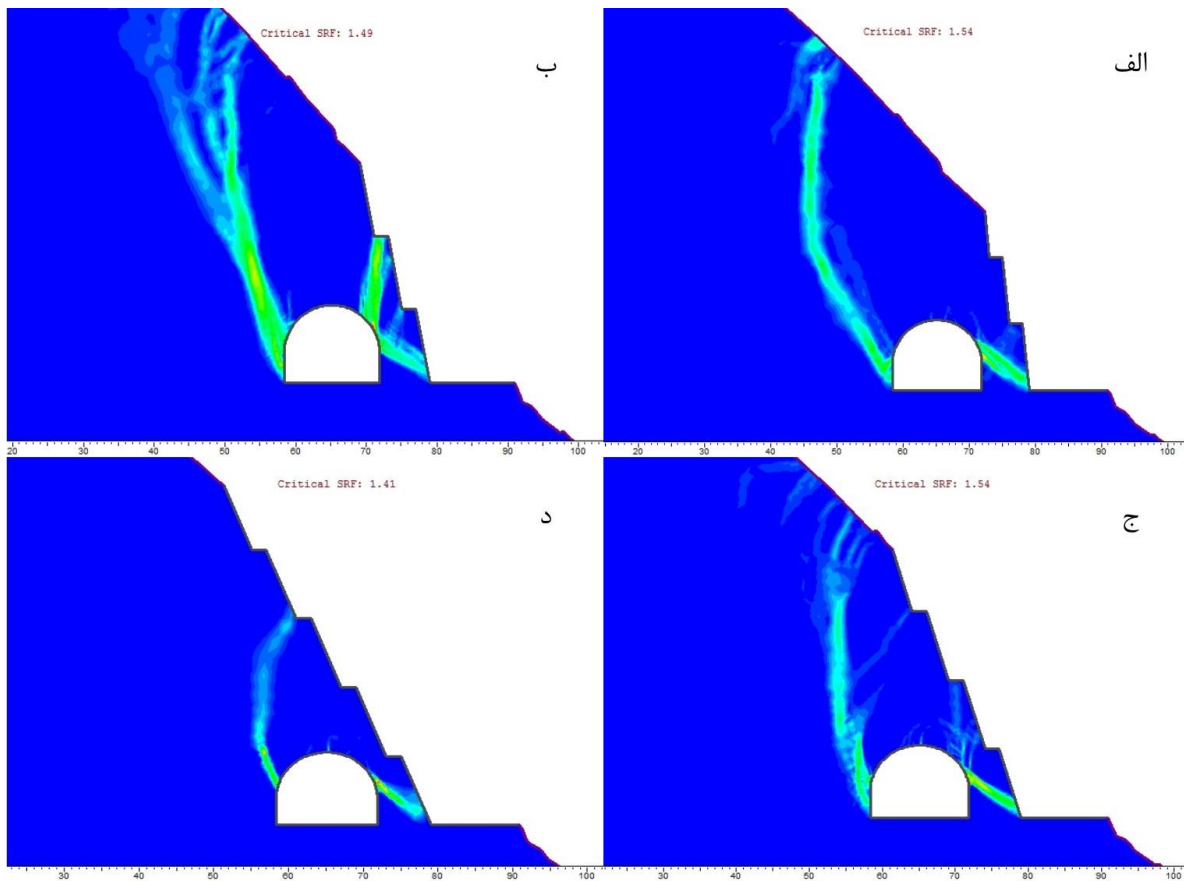
البته میزان جابجایی‌ها در محدوده ۲ تا ۶ میلی‌متر قرار دارد که برای هر دو سازه مقادیر قابل قبولی حساب می‌شوند. زیرا طبق نظر کوهل‌باک و همکاران (۲۰۱۵) میزان جابجایی‌ها در تونل تک خطه در حین حفاری به اندازه ۳۰mm در نظر گرفته می‌شود و شکست در صورت تغییر جابجایی‌ها در محدوده ۱۰۰-۳۰۰mm گزارش می‌شود [۶]. کیفیت خوب توده‌سنگ با مقدار GSI، در حدود ۵۵ و مقاومت فشاری ۴ MPa میزان جابجایی‌ها در توده‌سنگ را کنترل می‌نماید.

#### ۴-۲- میزان فاکتور ایمنی (SRF) و خاکبرداری

نکته دیگر در ارزیابی پایداری این دو سازه، فاکتور ایمنی ترانشه حفاری شده و همچنین میزان خاکبرداری مورد نیاز می‌باشد؛ زیرا طرح ارائه شده باید علاوه بر امنیت، اقتصادی و قابل اجرا نیز باشد. از این رو با استفاده از تکنیک SSR در بخش ۳ تشریح شده، فاکتور ایمنی ترانشه‌های مختلف محاسبه گردیده و با حجم خاکبرداری (در هر متر) مورد نیاز مقایسه گردیده است تا بهینه‌ترین طراحی ارائه گردد.

شکل ۶ نتایج حاصل از تحلیل SSR برای چهار شیب مورد بررسی را نشان می‌دهد که توزیع بیشینه کرنش برشی و سطح لغزش محتمل برای هر یک از حالات مشخص شده است. بیشترین میزان فاکتور ایمنی در شیب‌های ۱ به ۰.۱ و ۱ به ۰.۳ به دست آمده است. اما در بخش ۴-۱ مشاهده شد که جابجایی‌های اطراف تونل در شیب ۱ به ۰.۳ بسیار بیشتر از شیب ۱ به ۰.۱ (۰.۶۵mm در مقابل ۲.۴۵mm) می‌باشد. البته میزان عملیات خاکبرداری لازم نیز در این تصمیم‌گیری بسیار مهم است.

با استفاده از داده‌های فاکتور ایمنی و میزان خاکبرداری لازم در هر مورد نمودار شکل ۷ رسم شده تا مقایسه بین موارد شیب مختلف صورت بپذیرد. میزان فاکتور ایمنی و حجم عملیات خاکبرداری (در هر متر) در جدول ۲ ارائه شده‌است.

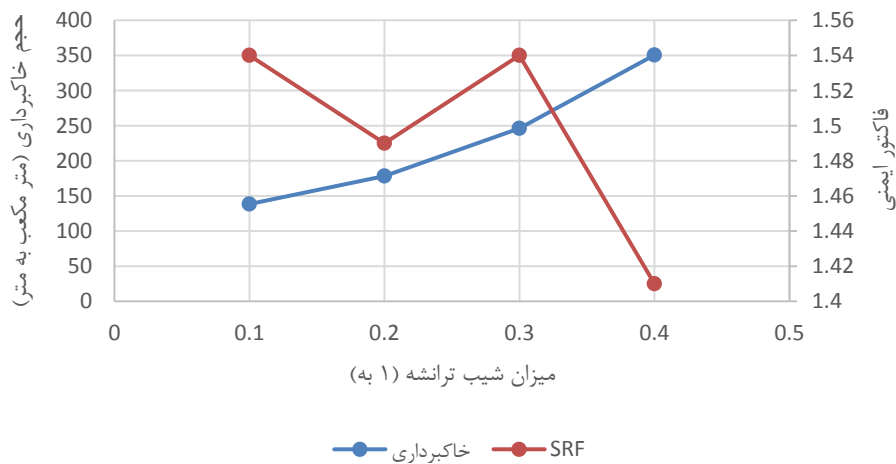


شکل (۶): توزیع بیشینه کرنش برشی و سطح شکست محتمل بعد از حفاری ترانشه

جدول (۲): فاکتور ایمنی و حجم عملیات خاکبرداری برای هر یک از شیب‌ها

شیب ترانشه	حجم خاکبرداری (m <sup>3</sup> /m)	SRF
۰.۱ به ۱	۱۳۸.۴۸	۱.۵۴
۰.۲ به ۱	۱۷۸.۳۸	۱.۴۹
۰.۳ به ۱	۲۴۶.۲۲	۱.۵۴
۰.۴ به ۱	۳۵۰.۴۵	۱.۴۱

مقایسه خاکبرداری و فاکتور ایمنی



شکل (۷): نمودار مقایسه‌ای حجم خاکبرداری و فاکتور ایمنی

همانطور که از نمودار شکل ۷ مشخص است در شیب ۱ به ۰.۱ کمترین میزان عملیات خاکبرداری و بالاترین میزان فاکتور ایمنی حاصل می‌شود و بهینه‌ترین شیب برای حفاری ترانشه می‌باشد.

## ۵- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی

در این مقاله، اندرکنش سازه‌های تونل شماره ۹ آزادراه تهران-شمال و ترانشه سنگی مجاور آن (تاثیر هریک از این سازه‌ها بر یکدیگر) از نقطه نظر تحلیل‌های پایداری و بهینه‌سازی شیب ترانشه مورد مطالعه قرار گرفته است. بدین منظور، از روش المان محدود و نرم‌افزار کرنش صفحه‌ای Phase2 برای ارزیابی پایداری مجموعه تونل و ترانشه تحت شیب‌های متفاوت ترانشه استفاده شده است. توده‌سنگ دربرگیرنده تونل از لایه‌های متوسط تا ضخیم ماسه‌سنگ، توف سبز و کنگلومرا تشکیل شده و کیفیت سنگ سخت را داراست. کیفیت خوب توده‌سنگ با مقدار GSI، در حدود ۵۵ و مقاومت فشاری بالا میزان جابجایی‌ها در توده‌سنگ را کنترل می‌نماید. تحلیل‌های این سیستم برای چهار شیب مختلف ترانشه به صورت ۱ به ۰/۱، ۱ به ۰/۲، ۱ به ۰/۳ و ۱ به ۰/۴ برای یافتن شیب بهینه از لحاظ پایداری و اقتصادی انجام شد. از تکنیک کاهش مقاومت برشی SSR که در مجموعه نرم‌افزار موجود است بدین منظور استفاده گردید. این روش با فاکتورهای کاهش مقاومت متفاوت پایداری تونل را بررسی نموده و فاکتور بحرانی را که معادل فاکتور ایمنی است ارائه می‌دهد. میزان عملیات خاکبرداری لازم برای هر یک از این شیب‌ها نیز در نظر گرفته شده است و بدیهی است که با کاهش شیب ترانشه و افزایش ارتفاع آن حجم این عملیات و هزینه‌های آن افزایش می‌یابد. میزان خاکبرداری برای شیب ۱ به ۰.۱ (بالاترین شیب) میزان  $138.48 \text{ m}^3/\text{m}$  و برای شیب ۱ به ۰.۴ (کمترین شیب)  $350.45 \text{ m}^3/\text{m}$  می‌باشد. در بررسی‌های فاکتور ایمنی برای هر یک از شیب‌ها، فاکتور ایمنی ترانشه‌های ۱ به ۰.۲ (۱.۴۹) و ۱ به ۰.۴ (۱.۴۱) از فاکتور ایمنی شیروانی‌های ۱ به ۰.۳ و ۱ به ۰.۱ (هر دو ۱.۵۴) کمتر بودند. نرخ افزایش جابجایی‌ها در دیواره تونل بعد از حفاری ترانشه در شیب ۱ به ۰.۱ کمترین میزان خود (۱.۴) و در شیب ۱ به ۰.۴ بیشترین میزان (۲.۸۱) را نشان می‌دهد. نتایج حاصل از این مطالعه نشان می‌دهد: ۱- نرخ افزایش جابجایی‌ها در دیواره تونل بعد از حفاری ترانشه با شیب رابطه معکوس دارد، ۲- بیشترین میزان فاکتور ایمنی و کمترین تغییرشکل‌های اعمالی و حجم عملیات خاکبرداری لازم در اثر حفاری ترانشه با شیب ۱ به ۰/۱ حاصل شده و این شیب بعنوان گزینه برتر پیشنهاد می‌شود.

علی‌رغم اینکه تونل و ترانشه ایمن پیش‌بینی می‌شوند، کیفیت عملیات آتشفکری و انفجار در طول ترانشه جاده باید کنترل شود و تا حد امکان نرخ اغتشاش (Disturbance Factor) کاهش بیابد. در مورد تغییرات پیش‌بینی نشده در کیفیت توده‌سنگ حین حفاری باید تحلیل‌های پایداری از ابتدا تکرار شوند. پیشنهاد می‌شود نقاط مونی‌تورینگ در دیواره کناری تونل (نزدیک به ترانشه) و همچنین پله‌های ترانشه برای کنترل منظم تغییرشکل‌ها نصب گردد.

## مراجع

- [۱] Tanriseven, E. N., Bilgin, H.A., Tutluoglu, L., Unluturk, B., "Coupled stability analyses of a road cut slope and a railway tunnel in use", Rock Mechanics and Rock Engineering: From the Past to the Future, London, 2016.
- [۲] Alkasawneh, W., Malkawi, A. I., Nusairat, J. H., Albataineh, N. "A comparative study of various commercially available programs in slope stability analysis", *Computers and Geotechnics*, 35(3): 428-435. 2008.
- [۳] Dawson, E., Roth, W., Drescher, A., "Slope Stability Analysis by Strength Reduction", *Geotechnique* 49(6): 835-840. 1999.
- [۴] Griffiths, D., Lane, P., "Slope stability analysis by finite elements", *Geotechnique*, 387-403. 1999.
- [۵] Hammah, R., Curran, J., Yacoub, T., Corkum, B., "Stability Analysis of Rock Slopes using the Finite Element Method", *Proc. of the ISRM Regional Symposium EUROCK 2004 and the 53rd Geomechanics Colloquy*. 2004. Salzburg.
- [۶] Kohlböck, B., "Design of Tunnels in Various Rock Conditions", Proc. of Austrian Tunneling Seminar, Ankara, Turkey. 31 March-1 April 2015.
- [۷] Rocscience Inc. 2004. "A New Era in Slope Stability Analysis: Shear Strength Reduction Finite Element Technique", RocNews. Cited in Tanriseven, E.N. 2012. Stability investigation of Eti copper mine tailings dam using finite element analysis. MSc Thesis.