بررسی تأثیر وجود گسل بر جابه‌جایی، تنش و ضریب اطمینان تونل (مطالعه‌ی موردی، تونل نقره کمر)

مقاله علمی - پژوهشی

احمدرضا مظاهری*، استادیار، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران
مهدی لک، دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه عمران، دانشگاه آیت الله العظمی بروجردی، بروجرد، ایران
*پست الکترونیکی نویسنده مسئول:a.mazaheri@abru.ac.ir

دریافت: ۱۴۰۰/۰۴/۱۸- پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۰۵
صفحه ۲۸۲-۲۷۱

چکیده

در طراحی و اجرای تونل وجود آب‌های زیرزمینی، توده‌های سنگی خرد شده و گسل از جمله مشکلاتی مسیر عبور تونل هستند که به طور جدی فضای زیرزمینی را تحت تاثیر خود قرار می‌دهند. در صورتی که به هر دلیلی نتوان مسیر تونل را تغییر داد، می توان با راهکارهای ایمنی تونل در مجاورت گسل را طراحی و اجرا نمود. دقت طراحی صحیح این تونل‌ها، به علت عبور گسل از مسیر یا مجاورت تونل می‌باشد که هم از جنبه اقتصادی و هم ایمنی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار هستند. لذا، در این مقاله به طور موردی اثر گسل اطراف تونل نقره کمر واقع در استان مرکزی با جهت‌های مختلف و فواصل گوناگون بر یک تونل بررسی گردید، که این نتایج و پیشنهادات می‌توانند توصیه‌های قابل توجهی برای طراحان داشته باشد. تحلیل مذکور با استفاده از مدلسازی عددی اجزای محدود(Plaxis) و تفاضل محدود(FLAC) انجام گرفته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش فاصله گسل از تونل مقدار جابه‌جایی و خسارات وارده به طوری چشمگیری کاهش می‌یابد و با افزایش ضخامت گسل عکس این مطلب فوق را صدق می‌کند، حداکثر جابه‌جایی به دست آمده از نرم‌افزار پلکسیس و فلک به ترتیب ۱۷ و ۱۷/۵ سانتی‌متر در حالتی که گسل ۹۰ درجه و با ضخامت ۳ متر می‌باشد و در حالتی که گسل با زاویه ۴۵ درجه تونل را قطع می‌کند به ترتیب ۱۳ و ۱۳/۵ سانتی‌متر می‌باشد.

واژه‌های کلیدی: گسل، مدلسازی عددی، تونل ، *Plaxis*، *FLAC*

۱-مقدمه

امروزه با پیشرفت فن‌آوری، سهولت نسبی در حفاری و ساخت سازه‌های زیرزمینی، محدودیت‌های فضاهای سطحی برای اجرای طرح‌های عمرانی و نیز به واسطه مسائل سیاسی و امنیتی، توجه بسیاری از کشورهای توسعه یافته و در حال توسعه به احداث سازه‌های زیرزمینی برای کاربری‌های عمرانی، نظامی و معدنی معطوف شده است (هاشمی، ۱۳۹۳). وجود تونل‌های متعدد آب، راه و راه‌آهن در کشورمان که از محل گسل عبور کرده و دارای صفحات ضعیف می‌باشند، لزوم بررسی تأثیر گسل بر پایداری تونل‌ها را در شرایط استاتیکی و دینامیکی در حین طراحی و در زمان بهره‌برداری ایجاب می‌نماید. بررسی تأثیر پارامترهای مختلف (نظیر وضعیت مکانیکی سنگ و نوع سیستم نگهدارنده) و وضعیت قرارگیری گسل نسبت به مقطع تونل (زاویه شیب گسل، فاصله گسل از مقطع تونل و ...) بر پایداری تونل، می‌تواند در جهت پیش بینی خسارات ناشی از زلزله و اتخاذ تصمیمات مقتضی برای کاهش خسارات راهنمای خوبی باشد (صدقیانی، ۱۳۹۲). احداث تونل تغییرات قابل ملاحظه‌ای

در تنش‌های توده سنگ ایجاد می‌کند به همین دلیل برای رسیدن به پایداری، تنش‌ها و تغییر شکل‌ها در توده سنگ به دقت باید مورد بررسی قرار گیرند. ارزیابی توزیع تنش‌ها برای طراحی یک سیستم نگهداری مناسب در اطراف تونل مهم است. در این ارزیابی وجود ناپیوستگی‌ها و ناهمگنی‌ها، حالت تنش برجا و رفتار ساختمانی غیرخطی توده سنگ و پتانسیل تغییر شکل‌های بزرگ باید در نظر گرفته شوند (هاشمی، ۱۳۹۳).

در حال حاضر، روش‌های عددی متعددی برای تحلیل پایداری فضاهای زیرزمینی وجود دارد. روش‌های المان محدود، تفاضل محدود، المان مجزا و روش‌های ترکیبی از روش‌های عددی پرکاربرد در مکانیک سنگ هستند. درستی و قابلیت اعتماد این روش‌ها تا حدود زیادی به انتخاب مناسب مدل محاسباتی و مکانیکی و پارامترهای ورودی بستگی دارد. پس از انتخاب مدل محاسباتی، کلید موفقیت در انتخاب عقلانی پارامترهای محاسباتی است. پارامترهای زیادی وجود دارد که پایداری توده سنگ را تحت تأثیر قرار می‌دهند و باید درجه اهمیت این پارامترها مشخص شود. تعیین درجه اهمیت این پارامترها در مورد نحوه تعیین و یا تخمین آنها، در روند طراحی مفید است (Hashash, Y. M., & Whittle, 1996 & Brown, 1980).

محققین زیادی از اوایل قرن نوزدهم تا به امروز بر روی مسائل پایداری تونل‌ها کار کرده‌اند و روش‌های مختلفی نیز در این راستا گسترش یافته‌اند. مروری بر مطالعات قبلی در این حوزه نشان می‌دهد که تحقیقات نسبتاً وسیعی در این زمینه انجام شده است. که در این بررسی به بخشی از آن‌ها به طور موردی اشاره می‌گردد.

اسدی و همکاران (۲۰۱۵)، با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS پایداری، تجزیه و تحلیل مقاومت تونل در مترو خط ٤ تهران را مورد بررسی قرار دادند. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین مقدار جابه جایی در سقف و کف تونل می‌باشد و در کل مقدار جابه جایی ۰,۰۹٦ متر است. مقدار تنش محاسبه شده اصلی در مدل با پوشش ٤۷۸ کیلو نیوتن بر متر مربع می‌باشد که تنش در فاصله ۱۳ متری مرکز تونل به وضعیت عادی خود باز می‌گردد. همچنین نتیجه گرفتند که نوع بتن برای پوشش مورد نظر مناسب است و در برابر فشارهای احتمالی پس از ساخت با توجه به کلیه نیروهای محوری، برشی و خمش‌های خمشی حاصل از شبیه سازی و تحلیل آن با مقاومت بتن در پوشش تونل مقاوم است. ضخامت پوشش بهینه تونل ۳۵ سانتی متر به دست آمد. همچنین مقدار جابه جایی در سقف تونل ۰,۰۰۱ متر به دست آمد. در کل با فرض ضخامت پوشش تونل ۳۰ سانتی‌متر، کل جابه جایی ۰,۰۹۸ متر بدست آمد که می‌توان نتیجه گرفت که این پوشش برای تونل مناسب است (Fasihnikoutalab 1980 ,et al).

ظاهری (۱۳۹٦)، تاثیر پارامترهای مختلف از جمله نوع گسل، ضخامت سگمنت، خصوصیات مکانیکی خاک، عمق قرارگیری تونل و زاویه‌ی گسل بر روی پایداری تونل‌های سگمنتی با استفاده از نرم افزار FLAC3D مورد بررسی قرار داد و نتایج نشان داد که تغییر شکل تونل در اثر حرکت انواع گسل، S شکل می‌باشد. در کل، به دلیل ماهیت فشاری گسل معکوس، جداشدگی بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها اتفاق نمی‌افتد. حال آن که، در اثر حرکت گسل‌های نرمال و امتداد لغز، جداشدگی و لغزش بین سگمنت‌ها و رینگ‌ها مشاهده می‌شود و یکی از راه‌های بهبود عملکرد تونل‌های سگمنتی در هنگام مواجهه با حرکت گسل معکوس، افزایش صلبیت تونل می‌باشد. در گسل نرمال، افزایش صلبیت تونل تأثیر چندانی بر روی پروفیل سطح زمین و تونل ندارد، در مقابل، در گسل امتداد لغزش افزایش ضخامت سگمنت، منجر به افزایش تغییر مکان برشی بین رینگ‌ها می‌شود. در این تحقیق، اثر عمق قرارگیری تونل در اثر حرکت انواع گسل‌ها نیز بررسی و مشاهده گردید که افزایش عمق قرار گیری تونل در هنگام مواجهه با گسلش معکوس منجر به کاهش تغییر شکل قطر تونل می‌شود. در مقابل، در گسلش نرمال و امتداد لغز این افزایش عمق قرارگیری تونل منجر افزایش میزان تغییر شکل‌های تونل می‌شود. در گسلش معکوس، افزایش زاویه‌ی گسل نسبت به افق منجر به کاهش جابه جایی‌های تونل می‌شود. این روند در گسلش نرمال و امتداد لغز برعکس روند مذکور می‌باشد و در اثر حرکت گسل نرمال، تقریباً تمامی تغییر شکل‌ها در قسمت فرادیواره اتفاق می‌افتد. با این حال، شل بودن خاک دانه‌ای و همچنین افزایش زاویه‌ی گسل نسبت به افق منجر به انتقال بخشی از تغییر شکل‌ها به سمت قسمت فرودیواره می‌شود و با جمع‌بندی استنباط می‌گردد که برای تونل‌ها، گسل نرمال خطرناک‌ترین گسل و گسل معکوس کم خطرترین آن می‌باشد. گسل امتداد لغز نیز در حد وسط این دو گسل قرار دارد (ظاهری، ۱۳۹٦). قاضی (۱۳۹۲)، تاثیر زاویه انتشار گسل در خاک، موقعیت قرارگیری تونل‌ها و همچنین

پارامترهای فیزیکی توده خاک برسیستم سازهای، جابه‌جایی دیواره و نیروهای ایجاد شده درتونل‌های مجاور را با انجام مدلسازی عددی بر پایه‌ی نرم‌افزار المان محدود PLAXIS 2D مسئله مورد مطالعه قرار داده است. نتایج این بررسی نشان داد که با افزایش فاصله بین تونل‌ها، جابه‌جایی افقی ابتدا افزایش و سپس کاهش می‌یابد اما مقادیر جابه‌جایی قائم و تنش‌های افقی، قائم و برشی ثابت باقی می‌مانند. همچنین تاثیر پارامترهای هندسی تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که قرارگیری تونل‌ها درمجاور منطقه برشی، تاثیرپذیری تونل‌ها را بسیار افزایش می‌دهد. به نظر می‌رسد، با افزایش زاویه انتشار گسل، جابه‌جایی افقی جداره تونل کاهش و تنش افقی افزایش می‌یابد. با افزایش قطر تونل‌ها تغییرات قابل توجهی در جابه‌جایی‌ها و تنش‌ها ایجاد می‌شود و جابه‌جایی قائم و نیز تنش‌های افقی و قائم افزایش پیدا می‌کنند. (قاضی، ۱۳۹۲).

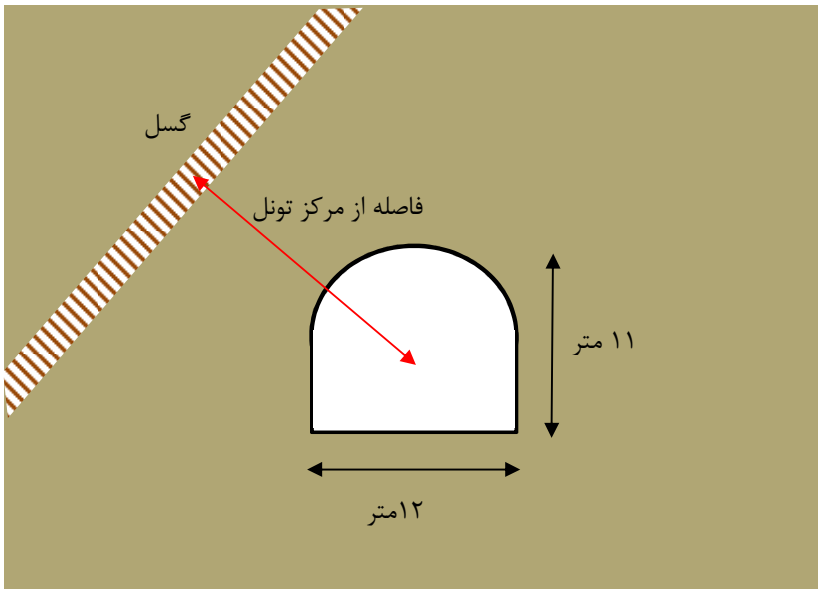
هاشم‌زاده (۱۳۹۷)، تاثیر نواحی گسله بر پایداری تونل تحت چهار حالت برخورد با گسل افقی، گسل قائم، گسل مورب ٤٥ + درجه و گسل افقی با فاصله یک متری از تاج تونل در واحدهای سنگی مقاوم و ضعیف موجود در بستر حفاری تونل پایاب نیرو گاه تلمبه ذخیره‌ای آزاد کردستان توسط روش تجربی Q را مورد بررسی قرار داد و در ضمن سیستم نگهداری پیشنهادی روش تجربی برای هر واحد سنگی در حالت‌های مختلف برخورد با زون‌های گسله به وسیله روش عددی راستی آزمایی کرد که بر اساس نتایج حاصل از تحلیل عددی به وسیله نرم‌افزار المان مجزای UDEC، در نواحی با توده سنگ مقاوم، گسل افقی با فاصله یک متری از تاج تونل با ۵,۳ سانتی متر جابه جایی بیشترین و گسل قائم با ۳,٦ سانتی متر جابه جایی کمترین تاثیر را داشته است و همچنین در نواحی با توده سنگ ضعیف ، گسل افقی با فاصله یک متری از تاج تونل با ٤٤ سانتی متر جابه جایی بیشترین و گسل مورب ٤٥ + درجه با ۳۲ سانتی متر جابه جایی کمترین تاثیر را بر پایداری تونل داشته‌اند. همچنین سیستم نگهداری پیشنهادی توسط روش تجربی Q در واحدهای سنگی مقاوم موجود در مسیر حفاری تونل در هنگام برخورد با زون‌های گسله کارایی کافی را دارا بوده ولی در واحدهای سنگی ضعیف کارآمد نبوده و نیاز به بازبینی و اصلاح دارد (هاشم‌زاده، ۱۳۹۷). ژانگ و همکاران (۲۰۱۷) به بررسی تاثیر موقعیت و ضخامت گسل بر روی پایداری سنگ اطراف تونل پرداختند. ایشان در تحقیقات خود موقعیت‌های مختلفی برای مکان گسل در نظر گرفتند و با استفاده از روش عددی به شبیه‌سازی رفتار گسل‌ها پرداختند. نتایج تحقیق این محققین نشان داد که موقعیت گسل نسبت به تونل می‌تواند اغلب منجر به ایجاد تغییر شکل، تنش و ایجاد زون پلاستیک در اطراف تونل شود. ایشان همچنین نشان دادند که ضخامت گسل رابطه‌ای غیرخطی با جابه جایی‌های اطراف تونل دارد و با افزایش ضخامت گسل سطح تاثیر تنش کششی و زون پلاستیک به صورت صعودی افزایش می‌یابد(Zhang et al, 1980).

هدف این بررسی مقایسه‌ی نتایج جابه‌جایی و تنش تحلیل نرم‌افزارهای PLAXIS و FLAC با استفاده از روش‌های عددی بر پایداری است. در این تحقیق تحلیل پایداری و طراحی یک تونل در توده سنگ درزه‌دار (گسله) با استفاده از روش عددی ارایه می‌گردد. داده‌های زمین شناسی و ژئوتکنیکی مورد استفاده در این جا بر مبنای نتایج آزمایشات آزمایشگاهی و صحرایی انتخاب گردیده است. به منظور بررسی رفتار توده سنگ یک مدل عددی با برنامه PLAXIS و FLAC ساخته شده و رفتار توده سنگ و پارامترهایی مانند موقعیت قرار گیری، زاویه شیب گسل، خصوصیات خاک محیط در مقاطع عرضی مختلف تونل با دقت بیشتر مطالعه گردید. در نهایت نتایج دو روش مورد مقایسه قرار گرفت و انطباق مناسب و قابل قبولی حاصل گردید. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌تواند برای آنالیز پایداری تونل در توده سنگ ناپیوسته با دقت مناسب به کار برده شود.

۲-روش کار

۲-۱-نحوه بررسی

در این مقاله با استفاده از روش تحلیل عددی به بررسی پایداری، محاسبه ضریب پایداری سطوح دامنه‌ها و اثر گسل بر تونل با توجه به زوایا و فواصلِ مختلف گسل از تونل پرداخته شده است و به عنوان مطالعه‌ی موردی اثر زاویه (Dip)، فاصله‌ی (R) و پهنای گسل از تونل نقره کمر واقع در استان مرکزی تحت بررسی قرار گرفت و راهکار پیشنهادی برای کاهش تغییر مکان و تنش تونل ارایه گردید. مشخصات فیزیکی تونل و نمای کلی آن در شکل ۱ نشان داده شده است. مشخصات مصالح وگسل موجود نیز در جدول ۱ بیان گردیده است.



شکل ۱. هندسه، فاصله و شیب گسل از تونل

جدول۱. مشخصات فیزیکی و هندسی در نظر گرفته شده برای سنگ و گسل

مشخصات سنگ						
دهانه تونل	وزن مخصوص	چسبندگی	زاویه اصطکاک	مدول الاستیسته	ضریب پواسون	زاویه اتساع
10 m	$26\ ^{kN}/_{m^3}$	$90\ ^{kN}/_{m^2}$	20°	$1.961E+05\ ^{kN}/_{m^2}$	0.3	4°
مشخصات گسل						
ضخامت	**چسبندگی**	**زاویه اصطکاک**	**مدول الاستیسته**	**ضریب پواسون**	**زاویه اتساع**	
100-400 cm	$40\ ^{kN}/_{m^2}$	15°	$9067\ ^{kN}/_{m^2}$	0.3	0°	

۲-۲- موقعیت و زمین‌شناسی محدوده مورد بررسی

تونل نقره کمردر موقعیت جغرافیایی $34^{\circ}\ 37'$ و $34^{\circ}\ 38'$ عرض شمالی، $49^{\circ}\ 50'$ و $49^{\circ}\ 55'$ طول شرقی و به طول۷۵۰ متر در ارتفاع متوسط ۲٤۰۰ متری از سطح دریا در منطقه ای کوهستانی در استان مرکزی واقع شده است. شیب طولی تونل به صورت یکطرفه و در حدود ۳/۰۸٦ درصد به طرف دهانه خروجی تونل می‌باشد (اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان مرکزی، ۱۳۹۲). منطقه مورد بررسی در اثر عملکرد کوهزایی تا حدود زیادی دچار تغییرات ساختاری از جمله چین خوردگی شده است. با توجه به بررسی‌های به عمل آمده، ملاحظه شده است که در محدوده‌ی تونل نقره کمر، گسل هایی از نوع معکوس و عادی وجود دارد که عملکرد آنها باعث خردشدگی نسبتاً زیاد رسوبات سنگی شده است. لیتوگرافی زمینه تونل شامل سنگ‌های شیلی سیاه رنگ به همراه تناوبی از ماسه سنگ‌های آهکی و شیل‌های آهکی و ماسه‌ای می‌باشد که به صورت ریتمیک بر روی هم قرار دارند. با توجه به مطالعات زمین شناسی و زمین شناسی مهندسی صورت گرفته در محل، مجموعا در محدوده تونل ۳ واحد زمین‌شناسی مهندسی قابل تفکیک است که خصوصیات این واحدها به صورت خلاصه در جدول ۲ آورده شده است (اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان مرکزی، ۱۳۹۲).

جدول۲. مجموعه واحدهای سنگی وخاکی شناسایی شده در مسیر تونل

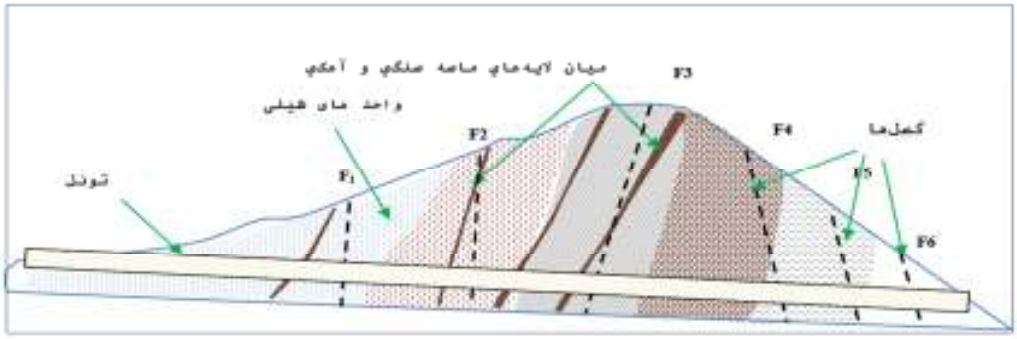
ردیف	واحد زمین شناسی مهندسی	نماد	توصیف
۱	شیل‌های با روباره کم	Sh_s	متشکل از رسوبات شیلی با روباره کم که که منجر به هوازدگی شیل‌ها شده است
۲	شیل‌های با روباره زیاد	Sh_d	رسوبات شیلی به همراه ماسه سنگ‌های آهکی و شیل آهکی
۳	زونهای گسله	FZ	زون‌های ضعیف، شکسته شده و ناپایدار

تونل به طور عمده در زون shd قرار دارد و در بخش‌های ورودی و خروجی توده سنگ shs دربرگیرنده تونل می‌باشد. از خصوصیات بارز شیل‌ها می‌توان به هوازدگی شدید آنها اشاره کرد زون‌های شدید گسله نیز به تناوب در مسیر تونل مشاهده می‌شوند. در جدول ۳ مقادیر مقاومت تک محوری و دانسیته‌ی خشک سنگ برای مقاطع مختلف تونل مشاهده می‌گردد.

جدول ۳. مقاومت تک محوری و دانسیته ی خشک سنگ در مسیر تونل

پارامتر		واحد	مقدار		
			Sh_s	Sh_d	FZ
پارامترهای سنگ	مقاومت تک محوره	MPa	۲۵-۱۵	۳۵-۲۰	۳۵-۲۰
	دانسیته خشک	gr/cm^3	۲/۵-۲/٤	۲/٦-۲/۵	۲/۱-۲/۳
	مقاومت کششی	MPa	۲/۵-۱/۵	۳/۵-۲	۰

با توجه به مطالعات زمین شناسی فعالیت لرزه‌خیزی منطقه تونل نقره کمر تحت تاثیر سه گسل اصلی گسل ایندیس، گسل تفرش و گسل نقره کمر می‌باشد. سوابق لرزه‌خیزی منطقه نشان می‌دهد که در اثر فعال شدن گسل‌های مذکور، زلزله‌ای در حد متوسط تا نسبتاً بالا رخ خواهد داد. در محدوده تونل نقره کمر تعدادی سطوح لغزش و گسل مشاهده شده است که نشان دهنده حرکت بلوک‌های طرفین این سطوح می‌باشد این شکستگی‌ها محلی می‌باشند و در طول زیادی مشاهده نمی‌شوند. رسوبات و لایه‌های تشکیل دهنده تونل نسبتاً پر درزه و ترک بوده و تعدادی گسل کوچک و محلی نیز در آن دیده می‌شود ولی هیچ گسل یا راندگی بزرگ و قابلِ اهمیت در محدوده تونل نقره کمر واقع نشده است. با در نظر گرفتن موقعیت کلی گسل‌های نرمال و معکوس، چنین به نظر می‌رسد که سنگ‌های تشکیل دهنده‌ی تونل تا حدودی خرد شده و دارای درزه و شکاف فراوان می‌باشند (اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان مرکزی، ۱۳۹۲)، (شکل ۲).



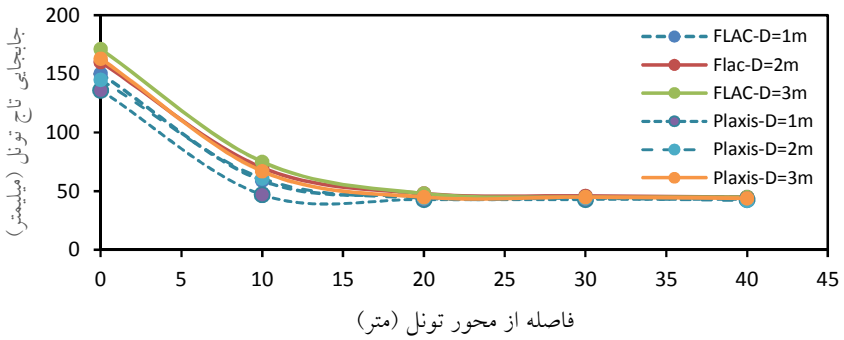
شکل۲. محل تقاطع گسل با تونل نقره کمر

۳-بحث و بررسی نتایج

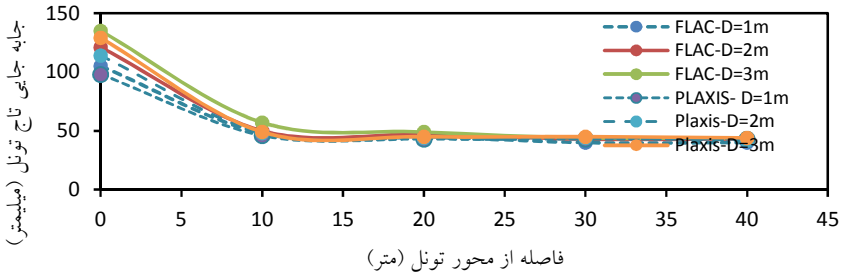
در این مطالعه همانطور که ذکر گردید با استفاده از تحلیل عددی به بررسی اثرات زاویه، ضخامت و فاصله گسل پرداخته شده است. تحلیل‌ها نشان می‌دهد تغییر شکل ناشی از عبور گسل از تونل در محل برخورد گسل و تونل، حداکثر ۱۷/۵ و حداقل در حدود ۱۰ سانتیمتر حاصل شده است. بنابراین ضرورت دارد که به تقویت نگه دارنده‌ها و یا مقاوم سازی در محل تقاطع تونل و گسل توجه گردد. در این قسمت دو نوع گسل با زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه و در چهار موقعیت با فواصل، صفر، ۱۰، ۲۰، ۳۰ و ۴۰ متر از مرکز تونل و با سه ضخامت گسل متفاوت ۱ الی ۳ متر مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد در موقعیتی که گسل محور تونل را قطع کرده است بیشترین نشست را ایجاد می شود، همچنین با افزایش ضخامت گسل نیز این افزایش جابه جایی بیشتر می شود. در ضمن با افزایش فاصله گسل از محور تونل مقدار جابه‌جایی کاهش و ضریب ایمنی افزایش می‌یابد و مقدار تغییرات جابه‌جایی در ضخامت و زوایایی مختلف در این موقعیت نسبت به موقعیتی که گسل از محور تونل عبور می‌کند بیشتر است.

۳-۱- بررسی تاثیر گسل بر نشست

همانطور که بیان گردید به منظور بررسی تاثیر گسل بر جابه جایی‌های ایجاد شده در تاج تونل دو نوع گسل با زاویه ۴۵ و ۹۰ درجه در موقعیت‌های ۰ تا ۴۰ متر از تاج تونل مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است که نتایج آن در شکل ۳ و ٤ نشان داده شده است.



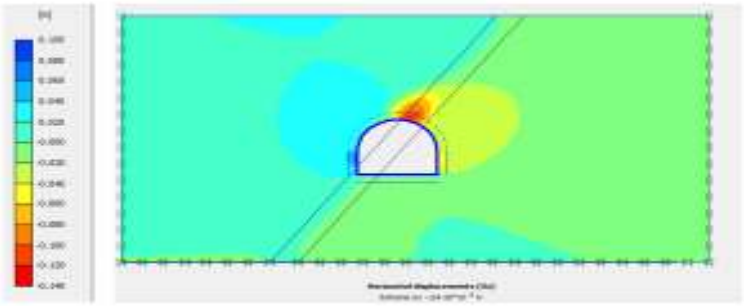
شکل ۳. جابه‌جایی در تاج تونل برای ضخامت های ۱ تا ۳ متر گسل ۹۰ درجه



شکل٤. جابه‌جایی در تاج تونل برای ضخامت های ۱ تا ۳ متر گسل ٤۵ درجه

همانطور که در شکل‌های ۳ و ٤ مشاهده می‌گردد که با افزایش فاصله‌ی گسل از محور تونل مقادیر جابه جایی کاهش می‌یابد به طوری که تقریبا از ۳ برابر شعاع تونل به بعد، اثر فاصله‌ی گسل بر جابجایی تونل ناچیز شده است. همانطور که در اشکال فوق مشاهده می‌گردد مقادیر تغییر مکان تاج تونل برای زاویه ی گسل ۹۰ درجه بیش از زاویه‌ی گسل ٤٥ درجه است. در اشکال ۳ و ٤ گسل با ضخامت‌های ۱، ۲ و ۳ متر تحت دو زاویه ٤٥ و ۹۰ درجه نیز مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آن نشان می‌دهد که در گسل با ضخامت ۳ متر و در حالت ۹۰ درجه حداکثر جابه جایی محور تونل ما بین ١٦٠ تا ١٨٠ میلی‌متر می‌باشد که این تغییرات با کاهش ضخامت به ۱ متر با زاویه ۹۰ درجه ۱۳۰ میلی‌متر است. شایان ذکر است این رفتار گسل در موقعی که ضخامت گسل ۳ متر با زاویه ٤٥ درجه است با کاهش ٤٠ میلی‌متری به ۱۳۰ تا ١٤٠ میلی‌متر می‌رسد. همچنین با افزایش فاصله بیش از ۳۰ متری گسل از محور تونل وجود گسل تاثیر چندانی بر جابه‌جایی‌های ایجاد شده در تاج تونل ندارد. همانطور که در اشکال مشاهده می‌گردد تاثیر ضخامت گسل نیز از اهمیت زیادی برخوردار می‌باشد و تاثیر ضخامت گسل بر روی جابه جایی ۲۰ الی ٤٠ میلی‌متر می‌باشد.

مقایسه نتایج حاصل از دو نرم‌افزار Plaxis و Flac نشان از تفاوت ناچیز نتایج این دو نرم‌افزار دارد و این تفاوت در جابه‌جایی‌ها در حد ۵ میلی‌متر و کمتر از ۵ درصد می‌باشد. بنابراین می‌توان بیان نمود که نتایج هر دو نرم‌افزار همدیگر را تثبیت می‌کنند. به مبنای نتایج ایجاد شده می‌توان توصیه کرد که در صورت امکان، فاصله‌ی گسل از تونل بیش از ۳ برابر شعاع تونل باشد تا کمترین اثر بر تغییر مکان و تنشِ اطراف تونل داشته باشد. در غیر این صورت ضرورت دارد تا به قبل از احداث تونل مصالح اطراف تونل تقویت گردند. در شکل ۵ مدل خروجی تحلیل در حالتی که گسل با زاویه ٤٥ درجه محور تونل را قطع نموده، نشان داده شده است.



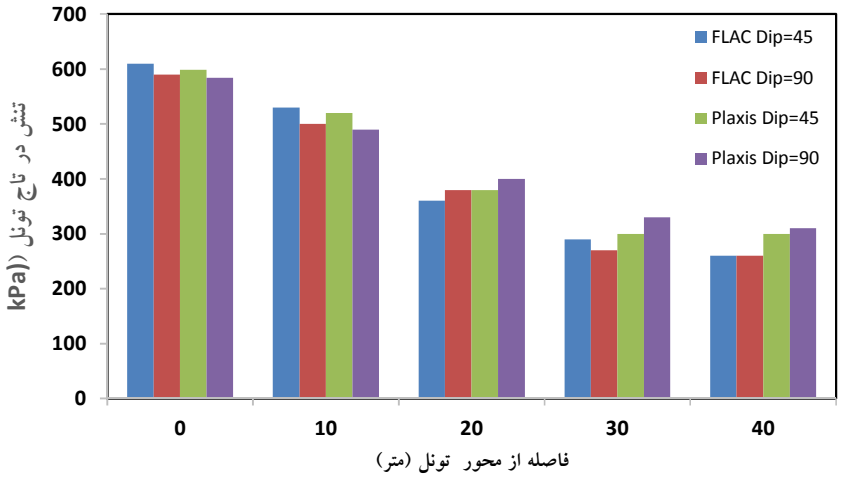
شکل ۵. مدل خروجی تحلیل در حالت قطع محور تونل با گسل زاویه ٤٥ درجه

۲-۳- بررسی تاثیر گسل بر تنش

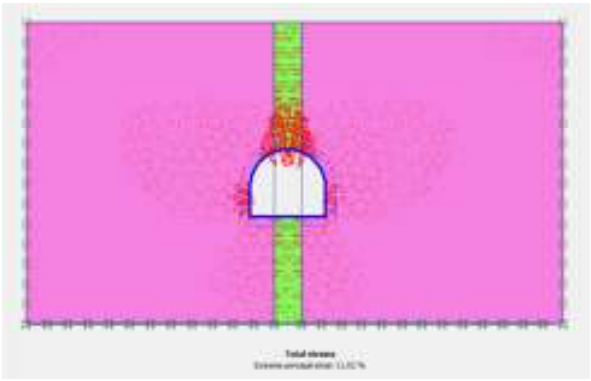
این قسمت به بررسی تنش وارد شده بر تاج تونل در حالتی که گسل زاویه ٤٥ و ۹۰ درجه می‌باشد پرداخته شده است. برای این منظور حالتی که ضخامت گسل برابر ۲ متر می باشد مورد ارزیابی قرار گرفته است. قابل ذکر است در حالتی که گسل وجود ندارد در عمق ۲۵ متری از سطح زمین تنشی برابر ٢٦٠ کیلو نیوتن بر متر مربع بر تاج تونل وارد می‌شود. نتایج بررسی تنش وارد بر تاج تونل در شکل ٦ نشان داده شده است.

نتایج به‌دست‌آمده نشان داد که بیشترین مقدار تنش موقعی بر محور تونل وارد می‌شود که گسل محور تونل را با زاویه ٤٥ درجه قطع کرده باشد و با افزایش زاویه به مقدار ۹۰ درجه مقدار تنش وارده کاهش می‌یابد و مقدار این تغییرات در حدود ۱۰ الی ۲۰ کیلوپاسکال می‌باشد. در ضمن نتایج حاصل از دو نرم‌افزار فلک و پلکسیس نشان می‌دهد که نتایج حاصل از دو نرم‌افزار همدیگر را هم پوشانی می‌کنند و تفاوت نتایج کمتر از ۵ درصدی را نشان می‌دهد.

همچنین مقدار تغییرات تنش نیز با افزایش فاصله گسل از محور تونل نزولی می‌باشد که از ۳۰ متری محور تونل به بعد می‌توان گفت به یک مقدار ثابتی می‌رسد. در شکل ۷ نیز مناطق متمرکز تنش ارایه شده است و همانطور که از قبل قابل تصور بود و در شکل ٦ نیز بررسی گردید، در تاج تونل بخاطر تحت تاثیر بودن نیرو مقدار تنش بیشتر می‌باشد که بعد از تاج تونل قسمت‌های جانبی تونل بیشتر تحت تاثیر تنش قرار می‌گیرند.



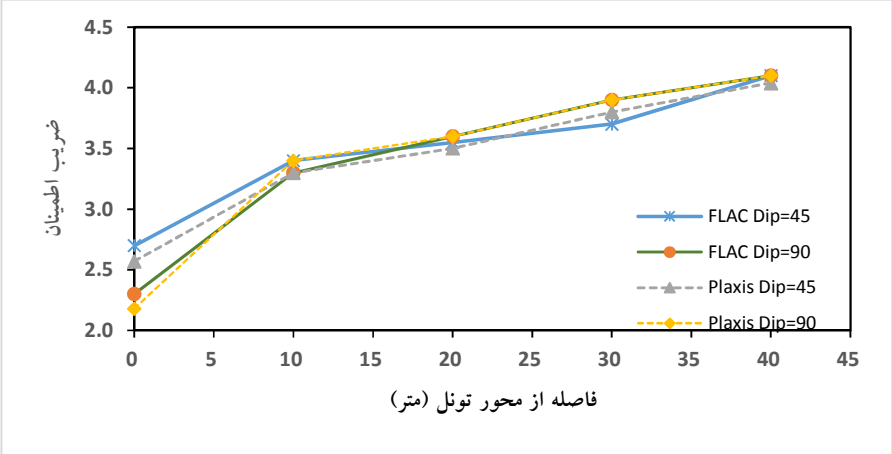
شکل٦. تغییرات تنش در گسل با زوایایی ٤٥ و ۹۰ درجه با عرض ۲ متر



شکل۷. تغییرات تمرکز تنش در محور تونل و مناطق گسله

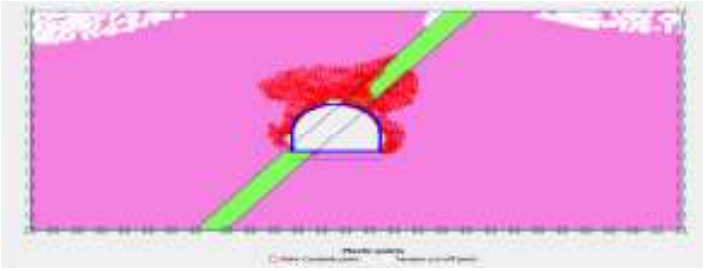
۳-۳- بررسی تاثیر گسل بر ضریب اطمینان

در اجرای لاینیگ تونل یکی از مواردی که نیاز است بررسی شود تا بتوان از عملکرد تونل اطمینان حاصل نمود ضریب اطمینان پایداری تونل در معرض گسل می باشد. ضریب اطمینان نشان می دهد که آیا ضخامت لاینینگ ایجاد شده در تونل مناسب بود است. در این قسمت به بررسی تاثیر محل گسل، ضخامت و زاویه آن بر رفتار تونل مورد بررسی قرار گرفته است.

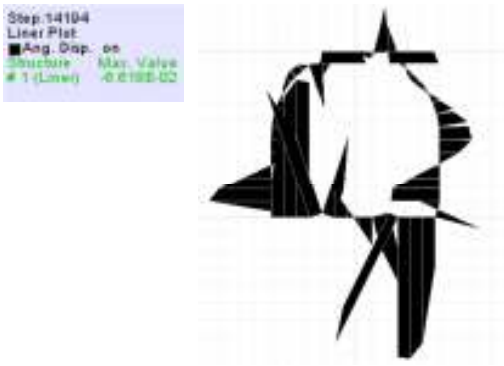


شکل ۸. تغییرات میانگین ضرایب پایداری در گسل با زوایایی ۴۵ و ۹۰ درجه با عرض ٤ متر

نتایج ضریب‌ایمنی نشان می‌دهد که موقعی که گسل با زوایه ۹۰ درجه محور تونل را قطع می‌کند دارای ضریب‌پایداری ۲/۲ در نرم‌افزار پلکسیس و ۲/۳ در نرم‌افزار فلک می‌باشد که کمترین مقدار ضریب‌پایداری را به خود اختصاص می‌دهند. همچنین در مواقعی که گسل با زاویه ٤٥ محور تونل را قطع می‌کند تغییرات ضریب پایداری در نرم‌افزار پلکسیس و فلک به ترتیب به ۲/٦ و ۲/۷ افزایش می‌یابد. شایان ذکر است فاصله تغییرات ضریب‌ایمنی با افزایش فاصله گسل از محور تونل به صورت کاهشی می‌باشد. بطور خلاصه نتایج ضریب ایمنی حاصل از تحلیل استاتیکی با تغییرات طول و زاویه گسل با استفاده از نرم‌افزار *Plaxis* و *FLAC* برای مقاطع تحلیل شده در شکل ۸ ارایه شده است. نتایج به‌دست آمده از تحلیل مقاطع نشان می‌دهد که بیشترین ضریب‌ایمنی موقعی حاصل می‌شود که گسل با محور تونل زاویه ٤٥ درجه می‌سازد و با افزایش فاصله گسل از محور تونل این عبارت فوق نیز صدق می‌کند ولی در موقعی که گسل با محور تونل زاویه ۹۰ درجه می‌سازد. مقدار ضریب ایمنی به نسبت حالت قبلی کاهش می‌یابد. پس از بررسی‌های انجام شده می‌توان به این نتیجه رسید که، وجود گسل موجب ایجاد خسارات زیادی در تونل می‌شود. بنابراین، بررسی میدان نقاط پلاستیک و گسترش آن در اطراف تونل ناشی از گسل و پیشنهاد راهکار مناسب جهت کنترل آن می تواند از ایجاد خسارت بر تونل جلوگیری نماید. بنابراین در این تحلیل نقاط پلاستیک در اطراف تونل، در شرایط قبل و پس ازعبور گسل مورد بررسی قرار گرفته است و نقاط ناپایدار به منظور پایدارسازی تعیین و مشخص گردید. در شکل ۹ نمونه‌ای از میدان نقاط پلاستیک برای حالتی که گسل با زاویه ٤٥ درجه و با ضخامت ۲ متر محور تونل را قطع نموده، ارایه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این نقاط پلاستیک بیشتر در تاج تونل و به مقدار کمتر در جوانب تونل تشکیل یافته‌اند. بنابراین، این نقاط نیازمند پایدارسازی می‌باشند.



شکل ۹. نقاط میدان پلاستیک در حالت‌های مختلف در اطراف تونل



شکل ۱۰. مقدار جابه جایی لاینینگ تونل در مواقع قطع محور تونل با گسل ۹۰

شکل ۱۱. مقدار جابه جایی لاینینگ تونل در مواقع قطع محور تونل با گسل ٤٥

اشکال ۱۰ و ۱۱ تاثیر فاصله و زاویه گسل بر لاینر (تونل) را نشان می‌دهد. شکل‌های فوق نشان می‌دهد که با کاهش زاویه گسل به مقدار ٤٥ درجه مقدار تغییرات مکانی کاهش می‌یابد و با افزایش مقدار زاویه گسل مقدار جابه‌جایی افزایش می‌یابد. همچنین نتایج فوق نشان می‌دهند که با افزایش ضخامت گسل، تغییر مکان تاج تونل بطور فوق‌العاده افزایش می‌یابد (اشکال ۳ و ٤). این نمودار نشان می‌دهد که عرض گسل بر تغییر مکانِ اطراف تونل تاثیر قابل توجهی دارد.

٤-نتیجه‌گیری

در این مقاله اثر گسل بر تونل به عنوان عامل موثر بر تغییرات تنش-کرنش در مرزهای تونل با دو نرم‌افزار Plaxis و FLAC مورد بررسی قرار گرفت. گزارش‌های مختلفی مبنی بر خسارت‌های ناشی از اثر گسل بر تونل منتشر شده است که ضرورت بررسی این موضوع در هر تونل دیگری را بیان می‌کند. بررسی نتایج در این تحلیل نشان می‌دهد که اگر فاصله‌ی گسل از تونل بیش از ۳ برابر شعاع تونل باشد، کمترین اثر را بر مقادیر تنش-کرنش در مرزهای تونل خواهد داشت. در صورتی که فاصله‌ی گسل از تونل کمتر از ۳ برابر شعاع تونل باشد، حوزه ی نقاط پلاستیک در اطراف تونل افزایش می‌یابد. بنابراین، ضرورت دارد تا در صورت وجود گسل در اطراف تونل و فاصله‌ی کمتر از ۳ برابر شعاع آن، نگه‌دارنده‌ی تونل افزایش یابد و یا اطراف تونل تقویت شود. بررسی حوزه‌ی نقاط پلاستیک در اطراف تونل نقره کمر واقع در استان مرکزی، ناشی از عبور گسل از تونل، ضرورت تقویتِ اطراف تونل را نشان می‌دهد. تقویت اطراف تونل توسط تزریق و به شعاع ۲ متر، حوزه‌ی نقاط پلاستیک را به مقدار قابل توجهی کاهش می‌دهد تا پس از بهره برداری از تونل، کمترین مشکل به وجود آید. هر چند تغییراتِ موقعیت گسل و اندازه‌ی دهانه‌ی تونل، در شعاع تزریق و یا افزایشِ نگه دارنده‌ها موثر است.

مقدار ضریب ایمنی بدست آمده نیز بیانگر صحت مطلب فوق می‌باشد، به طوری که گسل با زاویه ۹۰ درجه محور تونل را قطع می‌کند دارای کمترین مقدار ضریب‌ایمنی می‌باشد و با کاهش درجه به مقدار ٤٥ درجه، ضریب‌ایمنی به مقدار ۰,٤ افزایش می‌یابد تا در موقعی که فاصله ٤۰ متر با محور تونل می‌سازد به بیشترین از ٤ می‌رسد. بنابراین، تغییرات ضریب‌ایمنی با افزایش فاصله گسل از محور تونل به صورت کاهشی می‌باشد.

همچنین تغییرات نتایج حاصل بین نرم‌افزار فلک و پلکسیس به هم نزدیک بوده و در مجموع کمتر از ۱۰ درصد تفاوت بین نتایج به دست آمده حاصل از دو نرم‌افزار را نشان می‌دهد.

۵-مراجع

– هاشمی، م. (۱۳۹۳)، "مقایسه اثر تحلیل دوبعدی و سه‌بعدی در حالت استاتیکی و شبه دینامیکی برنگهدارنده‌های تونل با استفاده از مدل‌های عددی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: محمد حاجی عزیزی رازی: دانشکده فنی و مهندسی، گروه عمران، دانشگاه رازی.

– صدقیانی، م.ح.، ضامنی، ش.، (۱۳۹۱)، "بررسی تاثیر گسل در پایداری تونل تحت بار زلزله، نهمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران"، دانشگاه صنعتی اصفهان.

– ظاهری، م.، (۱۳۹۶)، "مدلسازی عددی و تحلیل تصادفی تأثیر انواع گسل بر عملکرد تونل‌های سگمنتی"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مسعود رنجبرنیا، تبریز، دانشکده عمران، گروه ژئوتکنیک، دانشگاه تبریز.

– قاضی، م.، (۱۳۹۲)، "اثر گسلش ناشی از زلزله بر تونل‌های مجاورهم"، پایان‌نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: مسعود عامل سخی، ارومیه: دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی خاک و پی، دانشگاه ارومیه.

– هاشم‌زاده، ص.، (۱۳۹۷)، "بررسی تأثیر زاویه شیب گسل بروی پایداری تونل‌های دایره‌ای شکل مطالعه موردی: تونل انحراف سد آزاد"، پایان نامه کارشناسی ارشد، استاد راهنما: علی عالی انوری، کاشان: دانشکده مهندسی، گروه مهندسی معدن، دانشگاه کاشان.

– اداره‌ی کل راه و شهرسازی استان مرکزی، (۱۳۹۲)، شهرستان اراک، ایران.

-Brown, E. T., (1980), “Underground excavations in rock”. CRC Press, “Ground movement prediction for deep excavations in soft clay”. Journal of geotechnical engineering, Vol. 122, No.6, pp. 474-486.

-Fasihnikoutalab, M. H., Huat, B. B., Asadi, A., & Daneshmand, S., (2012), “Numerical stability analysis of tunnel by PLAXIS”. EJGE, Vol. 17, pp. 451-461.

-Zhang, Z., Chen, F., Li, N., Swoboda, G., & Liu, N., (2017), “Influence of fault on the surrounding rock stability of a tunnel: Location and thickness”, Tunneling and Underground Space Technology, Vol.61, pp.1-11.

Investigating the Effect of Fault on Displacement, Subsidence and Tunnel Safety Factor (Case Study: Noghre Kamar Tunnel)

Ahmadreza Mazaheri, Assistant Professor, Department of Engineering Faculty Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran.

Mehdi Lak, M.Sc., Student, Department of Engineering Faculty Ayatollah Borujerdi University, Borujerd, Iran.

E-mail: a.mazaheri@abru.ac.ir

Received: August 2021-Accepted: February 2022

ABSTRACT

Tunnel design and construction in developed and developing countries have been widely considered by government officials to maximize the use of underground space. Meanwhile, the presence of groundwater, crushed rock masses and faults are among the problems of the tunnel passage that seriously affect the underground space. If for any reason the tunnel route cannot be changed, the tunnel can be designed and implemented in the vicinity of the fault with safety solutions. The accuracy of the correct design of these tunnels is due to the passage of the fault through or near the tunnel, which are of special economic and safety importance. Therefore, in this article, the effect of the fault around the Noghre Kamar tunnel located in Markazi province with different directions and different distances on a tunnel was investigated, and these results and suggestions can have significant recommendations for designers. This analysis has been investigated using finite element numerical modeling (Plaxis) and finite difference (FLAC).The results show that with increasing the distance of the fault from the tunnel axis, the amount of displacement and damages are significantly reduced and with increasing the thickness of the fault, the opposite is true. The average maximum displacement obtained from Plexis and Falak software is 17 and 17.5 cm, respectively, in the case of a 90-degree fault with a width of 3 meters, and in the case where the fault intersects the tunnel at a 45-degree angle, it is 13 and 13.5 cm, respectively. Also, the total stress changes in the position where the fault intersects the tunnel at an angle of 45 degrees is the minimum and in this position the maximum value of the safety factor is obtained.

Keywords: Fault, Numerical Modeling, Tunnel, Plaxis, FLAC