

تحلیل پایداری دامنه تونل ۶۱ راه آهن شمال با استفاده از نرم افزارهای FLAC و CLARA

حسین حسنی و محسن شریفی

چکیده: رعایت شیب مجاز در مسیر راه آهن، استفاده از تونل در مناطق کوهستانی را اجتناب ناپذیر می‌سازد. تونل ۶۱ مسیر شمال در دامنه ارتفاعات سیمین دره در مجموعه سنگهای هوازده سازندتحتانی قم شامل ماسه سنگ، مارن و شیل با بین لایه‌هایی از ژئوپس و انیدرید و نمک حفر گردیده است. مسیر تونل در یال شمالی یک چین دگر شکل یافته از نوع طاق‌دیس که توسط گسلی امتداد لغز قطع شده و به لحاظ لرزه زمین ساخت فعال می‌باشد قرار گرفته است. با توجه به وجود لغزشهای موضعی در سطح دامنه و احتمال وجود لغزش و ایجاد نگرانی در مورد امنیت تونل موضوع پایداری سازه تونل و پایداری دامنه‌ای که تونل در آن واقع شده مد نظر می‌باشد. به منظور تحلیل پایداری دامنه چندین مقطع در طول مسیر تونل در نظر گرفته شده است و تحلیل‌ها بر روی این مقاطع انجام شده است. این مقاطع با نرم افزار CLARA (روش تعادل حدی) و نرم افزار FLAC (روش عددی) تحلیل شده است. همچنین حساسیت پارامترهای مقاومت برشی بر روی پایداری به تفصیل مورد بررسی قرار گرفته است. هندسه مقاطع تقریباً شبیه هم می‌باشد و از بین مقاطع انتخابی مقطع D-D بدلیل پایین بودن مقاومت برشی وضعیت بحرانی را نشان می‌دهد. با توجه به تحلیل حساسیت چنانچه پارامترهای مقاومت برشی به حدی برسند که شیب به آستانه لغزش برسد، آنگاه سازه تونل در مقاطع نزدیک ورودی و خروجی تونل در معرض خطر جدی قرار می‌گیرد.

واژه‌های کلیدی: تونل، تحلیل پایداری، روش تعادل حدی، روش عددی، تحلیل حساسیت

۱. مقدمه

تونل ۶۱ راه آهن شمال در موقعیت جغرافیایی حدود ۲۷° ۵۲° شمالی و ۲۹° ۳۵° غربی و در فاصله حدود ۷۰ کیلومتری مجاورت روستای دمی‌آقا در مسیر گرمسار به فیروز کوه قرار دارد. طول تونل ۳۰۸ متر با امتداد تقریبی شمالی - جنوبی در ارتفاع ۱۳۳۳ متر از سطح دریا به موازات رودخانه حبله رود قرار گرفته است. مسیر تونل دارای قوس افقی به شعاع حدود ۴۰۰ متر و شیب طولی حدود ۱۲ در هزار می‌باشد. کد

ارتفاعی خط پروژه در آغاز تونل ۱۹۷۴/۶ و در پایان آن ۱۹۷۹/۵ و پوشش تونل از نوع پوشش سنگ چین و روبره تونل تا سطح زمین بطور متوسط حدود ۱۵ متر می‌باشد. تونل در داخل زون هوازده بر جا حاصل فرسایش سری سنگهای مارن، لای سنگ، شیل با تداخلهایی از رسوبات تبخیری گچ و نمک نازک لایه حفر شده است. این زون هوازده که مسیر تونل در آن واقع شده بر اساس نتایج عملیات حفاری عمدتاً از مواد رسی با لندهای پراکنده از مارن می‌باشد. در این بخش ۵ گمانه بروش روتاری همراه با مغزه گیری بمنظور دستیابی به پارامترهای ژئومکانیکی مورد استفاده در تحلیل پایداری توسط شرکت خدمات مهندسی زمین کاوش حفر گردیده است.

در این مقاله علاوه بر بررسی ویژگیهای ژئوتکنیکی اولیه مجموعه‌های لیتولوژیکی مسیر تونل، تحلیل پایداری دامنه تونل با استفاده از نرم افزارهای CLARA و FLAC انجام

مقاله در تاریخ ۱۳۸۳/۳/۴ دریافت شده و در تاریخ ۱۳۸۳/۱۰/۱۹ به تصویب نهایی رسیده است.

دکتر حسین حسنی استادیار دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر، hhassani@cic.aut.ac.ir
محسن شریفی دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی معدن، متالورژی و نفت، دانشگاه صنعتی امیر کبیر

از نظر زمینساختی مجموعه واحدهای سنگی فوق، در یال شرقی یک چین دگر شکل یافته که توسط گسلی امتداد لغز با مکانیسم ریدل (Riedle Mechanism) قطع شده قرار گرفته است. شکستگی‌های مربوط به نحوه شکل‌گیری چین و وجود شکستگی‌های فرعی گسل امتداد لغز نقش عمده‌ای در خواص فیزیکو شیمیایی، ژئوتکنیکی محل دارند. نیروهای تکتونیک با ایجاد چینها و گسلهای دارای روند عمومی شمال غربی - جنوب شرقی و تقریباً شرقی - غربی در منطقه مشخص می‌شوند. نزدیکترین گسل به ساختگاه تونل ۶۱، گسل کبوتر دره در غرب تونل می‌باشد که در فاصله حدود ۳۵۰ متری با راستای N005 عبور می‌نماید.

توپوگرافی محدوده مورد مطالعه کاملاً ناهموار با شیب دامنه‌های تند بوده (شکل ۱) و حاوی تعدادی آبراهه از نوع گالی (Gully) با بریدگیهای نسبتاً عمیق می‌باشد. باتوجه به سستی و فرسایش پذیری بالای سری سنگهای فوق الذکر، در سطح دامنه قشر نسبتاً ضخیمی از مواد هوازده دیده می‌شود. این مواد عمدتاً از رس و بمقدار خیلی کم از لنزهای مارنی تشکیل شده است.

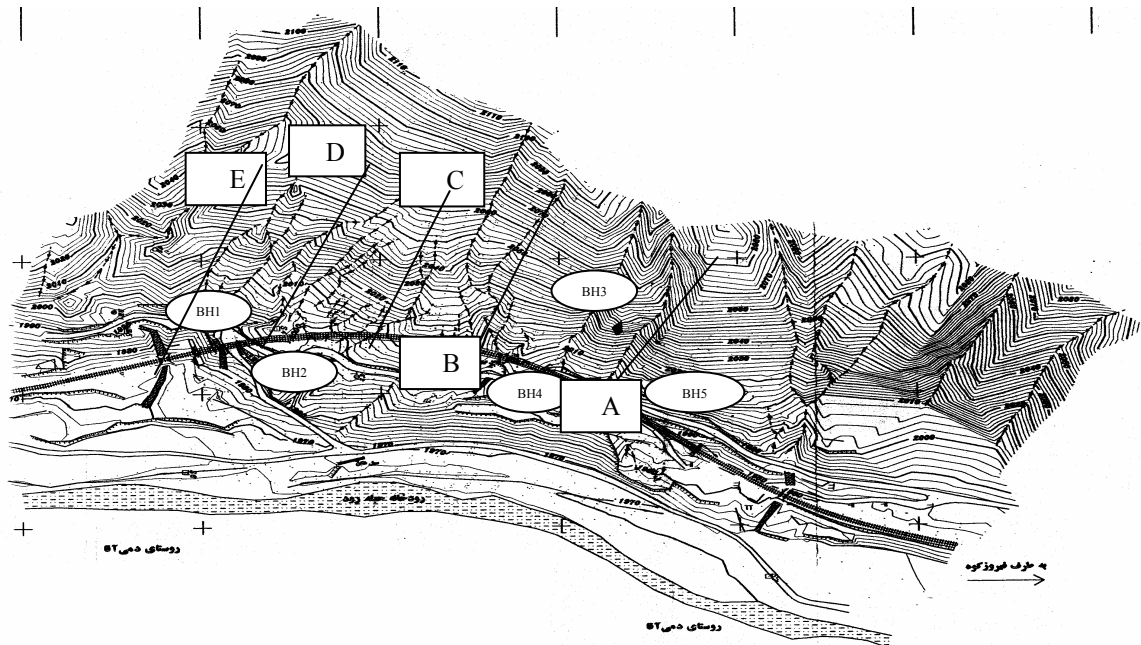
شده است. همچنین بمنظور تعیین مقطع یا مقاطع بحرانی تحلیل حساسیت پارامترهای مقاومت برشی بر روی پایداری دامنه انجام و محلهای ناپایدار مشخص شده است.

۲. زمین‌شناسی محدوده طرح

محدوده مورد مطالعه در بخش میانی زون ساختمانی البرز در بخش شمالی فرو نشست فشاری گرمسار واقع شده است (Alavi, M. (1996). این منطقه از تناوب لایه‌های مارنی، شیلی و لای سنگ همراه با بین لایه هائی از رسوبات گچ و نمک لایه نازک سازند قرمز با لائی قم تشکیل شده است. سازند مزبور هم در سطح زمین و هم در مقاطع حفاری بخوبی مطالعه شده است و به دوزیر واحد تقسیم می‌شود:

زیر واحد تبخیری زیرین M_1 به ضخامت ۳۰۰ تا ۵۰۰ متر متشکل از نمک، انیدریت لایه‌های ریگ‌دار و شیل‌های نازک لایه و رس‌های نمک‌دار قرمز تیره میباشد.

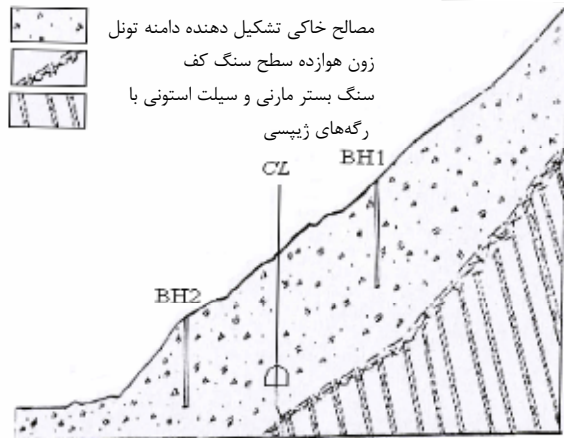
زیر واحد فوقانی M_2 ، ضخامت ۴۰۰۰ تا ۵۰۰۰ متر متشکل از مارن‌های گچ‌دار و ماسه سنگهای قرمز قهوه‌ای تیره رنگ در قسمت تحتانی، مارن و ماسه سنگهای زرد قهوه‌ای تا قرمز روشن. در قسمت فوقانی، دو بخش مزبور به وسیله یک لایه کلیدی از مارن سبز رنگ از هم جدا می‌شوند.



شکل ۱. نقشه توپوگرافی محدوده مورد مطالعه ، محل گمانه ها (BH) و مقاطع (A-E)

جدول ۱. پارامترهای مقاومت برشی دامنه

محدوده جنوبی تونل				محدوده شمالی تونل			
مارن		رس		مارن		رس	
Φ (درجه)	C (KPa)	Φ (درجه)	c (KPa)	Φ (درجه)	C (KPa)	Φ (درجه)	c (KPa)
۲۱	۶۸	۲۳	۸۸	۳۰	۹۸	۳۵	۷۸/۵



شکل ۲. مقطع عرضی دامنه تونل، مقیاس ۱:۱۰۰۰

۳. تهیه داده های ورودی تحلیل

نتایج برداشت های زمین شناسی و حفر گمانه های اکتشافی وجود مواد رسی همراه با مقادیر کمی از لنزهای مارنی مشخص ساخته است. بخشهای رسی که قسمت اعظم مواد سازنده تونل را تشکیل میدهند دارای چسبندگی نسبتا بالا و حاوی ذرات پراکنده گچ می باشد. لنزهای مارنی نیز پراکنده و با چسبندگی بالا در برخی نقاط در نمونه های حاصل از حفاری مشاهده می شوند. پارامترهای مقاومت برشی این مواد بر اساس نتایج آزمایشات شرکت خدمات مهندسی زمین کاوش در جدول ۱ آمده است. مقادیر مدول الاستیسیته در بخش شمالی و جنوبی بترتیب ۴۵۰ و ۴۰۰ کیلو گرم بر سانتی متر مربع میباشد. پروفیل توپوگرافی ۵ مقطع انتخابی بمنظور تحلیل پایداری در نقشه شماره ۱ مشخص شده است (A-E). این مقاطع به گونه ای انتخاب گردیده اند که تا حد امکان نمایانگر کل منطقه باشند مقادیر پارامترهای مقاومت برشی مورد استفاده در تحلیل، از میانگین مقادیر بخشهای رسی و مارنی به شرح زیر مورد استفاده قرار گرفته است:

محدوده شمالی:

چسبندگی (C) : ۸۸ کیلو پاسکال

زاویه اصطکاک داخلی (Φ) : ۳۰ درجه

مدول الاستیسیته (E) : ۴۵۰ کیلو گرم بر سانتی متر مربع

محدوده جنوبی:

چسبندگی (C) : ۷۸ کیلو پاسکال

زاویه اصطکاک داخلی (Φ) : ۲۲ درجه

مدول الاستیسیته (E) : ۴۵۰ کیلو گرم بر سانتی متر مربع

آزمایشات فوق الذکر بروش سه محوری در شرایط UU و برش مستقیم انجام شده و مقادیر C، Φ و E میانگین نتایج آزمایشات می باشد.

۴. تحلیل تعادل حدی (Limit Equilibrium Method)

در این روش رابطه بین تنشها و مقاومت در شرایط بحرانی یا حدی بررسی میشود (Espinza, R. D. & Bourdeau P. L. 1992) و این مرز بحرانی برای جسمی که تحت تاثیر نیروهای مختلف قرار گرفته است، در واقع نقطه ایست که در آن برابری لغزش تمام نیروهای وارده در سطح لغزش با مقاومت جسم در برابر لغزش برابر باشد. در این شرایط ضریب پایداری یعنی نسبت مقاومت موجود جسم به مقاومت مورد نیاز برای پایداری برابر واحد باشد.

به منظور انجام تحلیل تعادل حدی از نرم افزار CLARA استفاده گردید. این نرم افزار قابلیت تحلیل پایداری دو بعدی و سه بعدی با استفاده از روش های بیشاپ، جانبو و ... را داراست. برای شروع تحلیل پایداری دامنه پنج مقطع یاد شده در بالا مورد بررسی واقع گردیده اند. در ادامه به تشریح نتایج به دست آمده، از این تحلیل پرداخته می شود.

جدول ۲. نتایج حاصل از تحلیل پایداری مقاطع با نرم افزار CLARA

Section	Safety Factor	Slide Center (m)		Weight of slide Mass (MN)	Sliding Surface Area (m ²)
		Y	Z		
A-A	1.462	73	162	110	222
B-B	1.616	76	204	120	240
C-C	1.853	110	195	204	308
D-D	1.356	125	205	154	202
E-E	1.988	112	168	93	210

به منظور بررسی این موضوع در دامنه تونل ۶۱ تحلیل سه بعدی انجام شده است. بلوکی که برای این منظور در نظر گرفته شد، بین مقاطع A-A و B-B واقع گردیده است. در شکل ۳ هندسه این بلوک دیده می شود.

نتایج تحلیل سه بعدی مشخص ساخت که ضریب اطمینان ۱/۶۳۴ است. همانطور که بیان شد این مقدار بیش از ضریب اطمینان به دست آمده از تحلیل دو بعدی است.

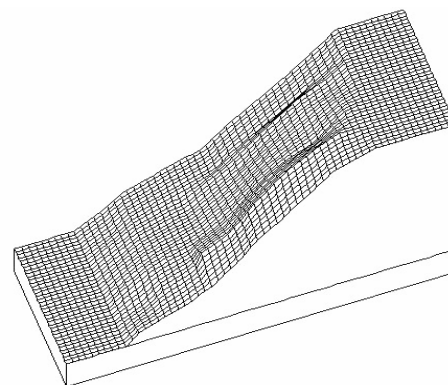
۴-۳. تحلیل حساسیت

عدم اطمینان به پارامترهای ورودی و احتمال تغییر آنها بحث تحلیل حساسیت را مطرح می سازد. پارامترهای مقاومت برشی مهمترین پارامترهای ورودی هستند. لذا میزان تاثیر این پارامترها بر روی پایداری شیب بررسی گردیده است. بر اساس تحلیل حساسیت های انجام گرفته بر روی پارامترهای مقاومت برشی مقطع D-D، میزان تاثیر این پارامترها بر روی پایداری شیب بررسی شد. نتایج حاصله از این تحلیل ها که در شکل های ۴- الف، ب و ج ارائه شده است، تاثیر تغییرات چسبندگی، زاویه اصطکاک و شتاب افقی زلزله بر روی ضریب اطمینان مشاهده می شود.

همانطور که دیده می شود حتی در مقادیر پائین چسبندگی شیب به حد گسیختگی نمی رسد. بالعکس با کاهش زاویه اصطکاک تا حدود ۱۴ درجه وقوع لغزش پیش بینی می شود. لرزه خیزی ساختگاه یکی از خطرات بالقوه است که پایداری دامنه را تهدید میکند. اگر چه تعیین خطرپذیری ساختگاه نیازمند تحلیل خطر زلزله است، اما تاثیر عامل لرزه با تغییر شتابافقی زلزله ارزیابی شد. نرم افزار CLARA عامل لرزه را به صورت یک نیروی افقی بر شیب اعمال میکند و اساسا تحلیل

۴-۱. تحلیل دو بعدی مقاطع

نرم افزار CLARA این قابلیت را داراست که هندسه شیب را به طور دقیق دریافت می دارد. بدین ترتیب هندسه هر پنج مقطع به نرم افزار داده شد و تحلیل پایداری با استفاده از روش بیشاپ انجام پذیرفت. نتایج این تحلیل در جدول ۲ آمده است. همانطور که مشاهده می شود کلیه مقاطع پایدار بوده و در این میان مقطع D-D کمترین ضریب اطمینان را دارا می باشد.



شکل ۳. بلوک در نظر گرفته شده برای تحلیل سه بعدی

۴-۲. تحلیل سه بعدی

نرم افزار CLARA امکان انجام تحلیل سه بعدی را نیز فراهم می سازد. تحلیل دو بعدی نتایج محافظه کارانه تری را در پی دارد، زیرا در واقعیت لغزش دایره ای از دو جهت انحناء دارد (قاشقی شکل) که این تاثیر در تحلیل دو بعدی در نظر گرفته نمی شود و مقدار ضریب اطمینان کمتر از تحلیل سه بعدی به دست می آید.

۵. تحلیل عددی (Numerical Method)

اساس روشهای عددی تبدیل یک محیط با بی نهایت درجه آزادی به محیطی با تعداد درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط محیط می باشد (Bromhead, E.M., 1992). با بررسی اثر نیرو و بارگذاری در این نقاط و تعیین میزان تغییر شکل آنها با استفاده از میانمایی میتوان تغییر شکلهای سایر نقاط را نیز بدست آورد. موقعیت، تعداد و ارتباط فوق الذکر توسط المان بندی محیط مشخص میشود. در تمام روشهای عددی، المانهای متنوعی وجود دارد و یک مدل خاص میتواند دارای چندین نوع المان مختلف باشد که انتخاب آنها به نوع مسئله و هدف مدلسازی بستگی دارد.

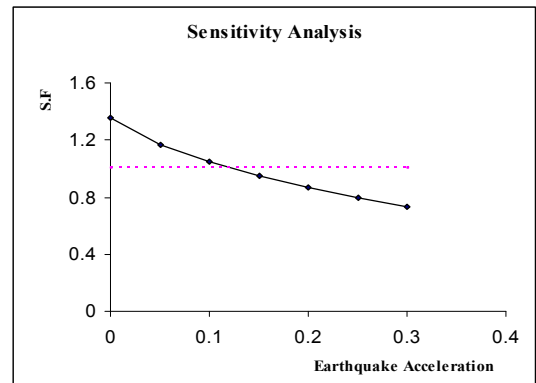
امروزه روش های عددی کاربرد وسیعی در پروژه های مکانیک سنگی پیدا کرده اند. یکی از نرم افزار های توانمند موجود در این زمینه نرم افزار FLAC می باشد که بر اساس روش تفاضل محدود (Finite Difference Method) توسعه داده شده است. استفاده از این نرم افزار در تحلیل پایداری شیب های خاکی بسیار موفقیت آمیز بوده است. از این رو تحلیل پایداری دامنه توسط این نرم افزار به عنوان گام بعدی تحلیل انتخاب شد.

در بخش ۴-۱ مشخص شد که مقطع D-D دارای کمترین ضریب اطمینان می باشد. لذا این مقطع به عنوان مقطع بحرانی انتخاب گردید. در شکل ۵ مدل ساخته شده این مقطع مشاهده می شود. این مدل دارای عرض ۴۰۰ متر و ارتفاع ۲۰۰ متر می باشد.

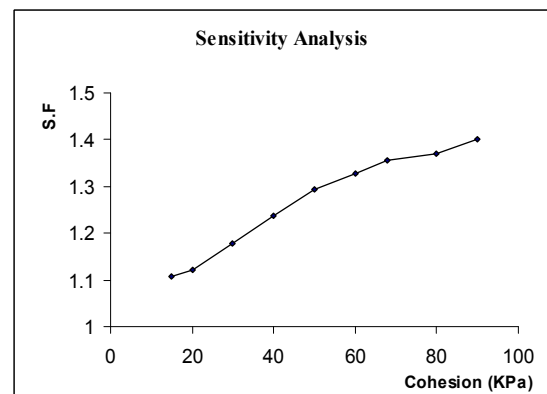
۵-۱. تحلیل حساسیت

در این بخش نیز میزان تاثیر گذاری پارامترهای چسبندگی و زاویه اصطکاک مورد بررسی قرار گرفت. بدین منظور شش حالت مختلف انتخاب گردید که در جدول ۴ آمده است. نتایج تحلیل حساسیت مشخص میکند که در حالت های ۳ و ۴ یعنی در شرایطی که چسبندگی به ترتیب ۲۰ و ۱۰ کیلوپاسکال است، دامنه به ناپایداری می رسد. این موضوع در تحلیل حساسیت با روش تعادل حدی نیز دیده شد. در شکل ۷ توزیع زون پلاستیک برای حالت ۳ دیده میشود. همچنین بردارهای جابجائی و توزیع ضریب اطمینان برای حالت یاد شده به ترتیب در شکل ۸ و ۹ آمده است. بدیهی است در این شرایط دامنه دچار گسیختگی می شود.

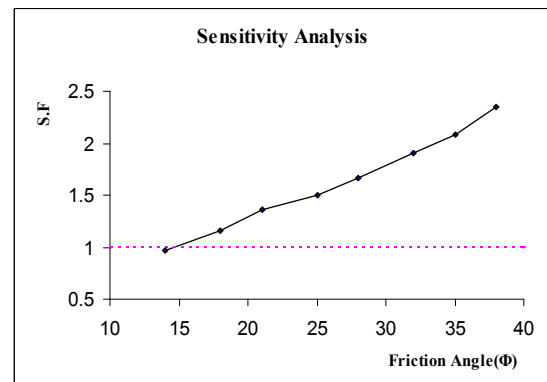
شبه استاتیک انجام می دهد. از شکل ۴-ج مشخص می گردد که پایداری دامنه به این پارامتر بسیار حساس بوده و احتمال ناپایداری آن در دامنه وجود دارد. این مساله نیازمند تحلیلهای جامعتر در مراحل بعدی طراحی است. همچنین در جدول ۳ تاثیر ترکیبی پارامترهای مقاومتی بر روی یکدیگر آورده شده است. طبق این جدول مشاهده میشود که در محدوده هایی از این پارامترها ناپایداری ایجاد میشود.



الف



ب

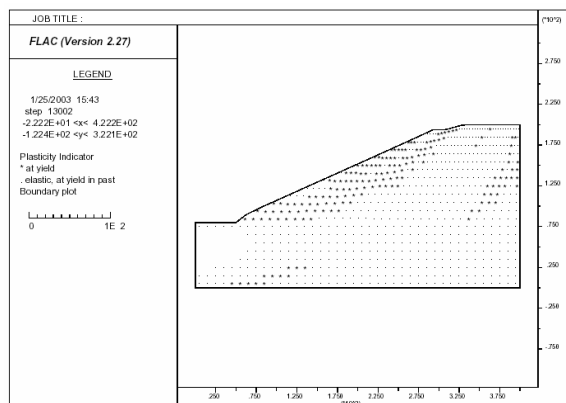


ج

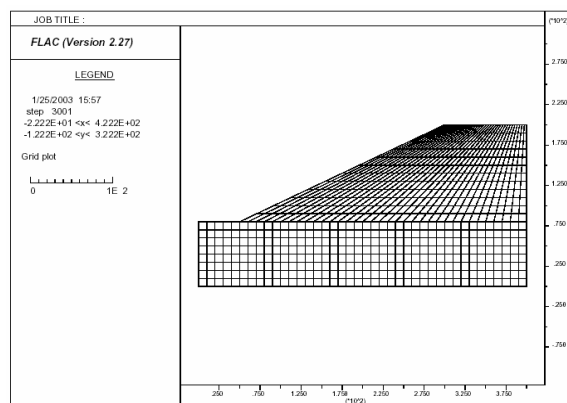
شکل ۴. تحلیل حساسیت مقطع D-D نسبت به: الف) شتاب افقی زلزله ب) چسبندگی و ج) زاویه اصطکاک

جدول ۳. تاثیر ترکیبی پارامترهای مقاومتی و شتاب زلزله بر روی پایداری مقطع D-D

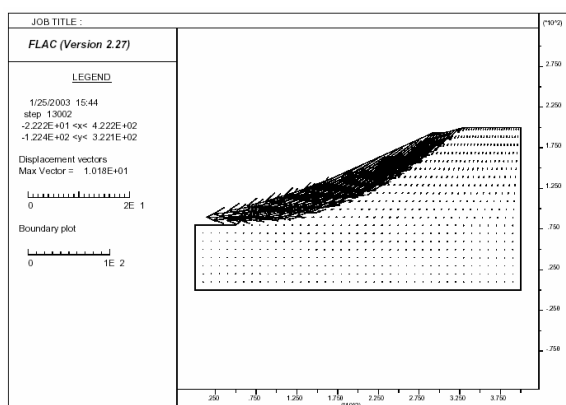
Variations for Friction Angle and Cohesion		Safety Factor				
		K=0	k=0.1	K=0.2	k=0.25	K=0.3
$\phi=21^\circ$	c=50 KPa	1.293	0.966	0.796	0.730	0.672
	c=40 KPa	1.236	0.925	0.764	0.700	0.644
	c=30 KPa	1.179	0.891	0.732	0.670	0.617
$\phi=18^\circ$	c=50 KPa	1.142	0.849	0.700	0.643	0.592
	c=40 KPa	1.085	0.819	0.668	0.613	0.564
	c=30 KPa	1.029	0.778	0.637	0.583	0.537
$\phi=14^\circ$	c=50 KPa	0.919	0.698	0.582	0.548	0.506
	c=40 KPa	0.893	0.661	0.546	0.522	0.482
	c=30 KPa	0.836	0.623	0.514	0.471	0.434



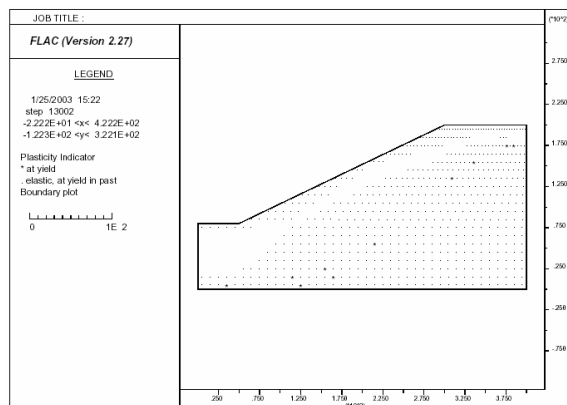
شکل ۷. توزیع زون پلاستیک در حالت سوم تحلیل حساسیت



شکل ۵. هندسه شیب در نرم افزار FLAC



شکل ۸. بردارهای جابجایی در حالت سوم تحلیل حساسیت



شکل ۶. توزیع زون پلاستیک در شیب

می باشد. به همین دلیل تحلیل حساسیت انجام شده بر روی آن مقطع برای مقاطع دیگر نیز معتبر است.

- با توجه به تحلیل حساسیت انجام شده چنانچه پارامترهای مقاومت برشی به حدی برسند که شیب به آستانه لغزش برسد، آنگاه سازه تونل در مقاطع نزدیک ورودی و خروجی تونل در معرض خطر جدی قرار می گیرد.
- در بارگذاری لرزه ای دامنه شرایط ناپایدار را دارد. البته باید توجه کرد که ضریب اطمینان کمتر از یک در تحلیل شبه استاتیک لزوما نشانه گسیختگی نیست و ممکن است پس از جابجائی معین، شیب پایدار بماند. لذا باید از روشهای دینامیکی مبتنی بر جابجائی یا روشهای عددی استفاده شود.

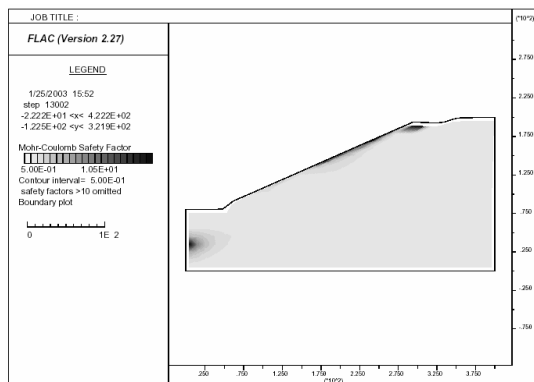
مراجع

[۱] شرکت خدمات مهندسی ژئوتکنیک زمین کاوش، "مطالعات ژئوتکنیک تونل ۶۱ مسیر راه آهن شمال"، مرکز تحقیقات راه آهن ایران (۱۳۸۰)

[1] Alavi, M. (1996), "Tectono Stratigraphic Synthesis and Structural Style of the Alborz Mountain System in Iran", J. Geodynamic, Vol. 21, No. 1, PP 1-33.

[2] Bromhead, E.M., 1992, "The Stability of Slopes", Published by Blackie Academic & Professional, Second Edition.

[3] Espinoza, R.D. & Bourdeau, P.L. 1992 "Unified Formation for Analysis of Slopes with General Slip Surface", ASCE, Journal of the Geotechnical Eng. Division.



شکل ۹: توزیع ضریب اطمینان در حالت ششم تحلیل حساسیت

۶. نتیجه گیری

- با توجه به نتایج حاصله از روش تعادل حدی و روش عددی، شیب پایدار می باشد. همچنین حفر تونل هیچ گونه ناپایداری در شیب بوجود نخواهد آورد.
- تحلیل های پایداری انجام گرفته در حالت خشک می باشد، از این رو لازم است در مراحل بعدی مطالعات اطلاعات دقیقی از ویژگیهای هیدرولوژی منطقه جمع آوری و در تحلیل ها استفاده گردد.
- روش تعادل حدی بخاطر ارائه ضریب اطمینان برای هر مقطع روش مناسبی به نظر می رسد، اما فقط در مورد پایداری و عدم پایداری قضاوت می کند در صورتی که روش عددی اگر چه به صراحت ضریب اطمینان را نمی دهد، ولی رفتار شیب (جابجائیها، تنش، نقاط پلاستیک و ..) را نشان می دهد.
- هندسه مقاطع تقریباً شبیه یکدیگر هستند و تنها علت بحرانی بودن مقطع D-D پارامترهای مقاومت برشی پایین آن