

تعیین الگو بهینه حفاری و اجرای سیستم نگهداری تونل در سنگ‌های ضعیف (مطالعه موردی)

مسعود منجری^{1*}، محمدعلی طهماسبی²، سید رحمان ترابی³

1- دانشیار استخراج معدن دانشگاه تربیت مدرس، monjezi@modares.ac.ir

2- دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران جنوب mohamadali.tahmasebi@gmail.com

3- دانشگاه صنعتی شاهرود، rtorabi@modares.ac.ir

(دریافت 21 آذر 1389، پذیرش 17 مهر 1390)

چکیده

حفار یک تونل سبب ایجاد تغییرات تمرکز تنش و بروز جابجایی‌هایی احتمالی در اطراف فضای حفاری شده می‌شود. در فرآیند حفار تونل، بحرانی‌ترین مرحله، حفار بخش تاج تونل می‌باشد و چنانچه حفار این بخش بطور صحیح انجام نشود، احتمال ناپایداری افزایش می‌یابد. در عملیات تونلسازی به روش مرحله‌ای تاج و پله، گسترش ناحیه پلاستیک علاوه بر خصوصیات ژئومکانیکی به شکل و نحوه اجرای عملیات وابسته می‌باشد. بر این اساس، گام حفاری تاج و کف تاثیر بسزایی در پایداری تونل دارند. برای محاسبه این دو پارامتر می‌توان از روشهای عددی و تجربی بهره برد. امروزه روشهای عددی بطور موثری در مسائل تحلیل پایداری تونلها به کار گرفته می‌شوند و برای این منظور، روشهای عددی سه بعدی برای مدلسازی حرکات جلو و اطراف سینه کار تونل و همچنین تاثیر آن بر سیستم نگهداری، نتایج دقیق‌تری ارائه می‌نمایند. در این مقاله، پایداری یک تونل که حفار آن به روش مرحله‌ای با گام حفاری 1 متر برای تاج و 2/5 متر برای کف می‌باشد، مورد بررسی قرار گرفته است. جهت تحلیل پایداری نرم افزار **FLAC^{3D}** بکارگیری و نتایج بدست آمده با روشهای تجربی RMR و Q مقایسه گردید. بر این اساس، جهت جلوگیری از ناپایداری و کاهش فشار بر سیستم نگهداری، گام مناسب برای حفاری تاج و کف تونل 0/5 متر بدست آمد. با اجرای نتایج بدست آمده در تونل مطالعه موردی، میزان جابجایی‌ها و اثرات تخریبی وارد بر سیستم نگهداری بطور قابل ملاحظه‌ای کاهش یافت.

کلمات کلیدی

روش مرحله ای تاج و پله، **FLAC^{3D}**، روشهای تجربی RMR و Q

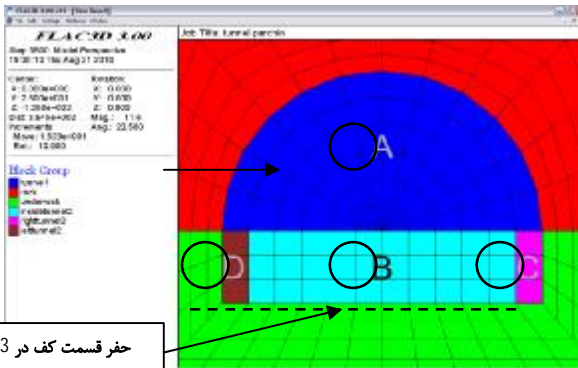
1- مقدمه

یکی از پارامترهای مهم در طراحی تونل، گام حفاری می باشد. در طراحی مقدماتی برای حفر قسمت تاج تونل، ابتدا گام حفاری باید به عنوان یکی از عوامل اصلی در طراحی تونل مشخص باشد. در صورت عدم انتخاب مناسب گام حفاری، جابجایی های دیواره و سقف تونل افزایش می یابد و این جابجایی ها تا پشت جبهه کار نیز ادامه خواهد داشت [1]. بنابراین تغییر شکل در توده سنگ به حدی می رسد که شل شدن مواد خرد شده دیگر غیر قابل برگشت می شود در نتیجه احتمال ریزش و فشار وارد بر سیستم نگهداری افزایش یافته و سبب افزایش نیروی برشی و گشتاور خمشی به سیستم نگهداری می شود [2]. در این راستا تعدادی از محققین برای تخمین مقادیر نرمال شده این جابجایی ها، روابطی را برای یک تونل دایره ای در میدان تنش هیدرواستاتیک و بر اساس تحلیل های اجزاء محدود ارائه کرده اند [3].

طراحی یک تونل و تحلیل پایداری آن با چند روش امکان پذیر است که عبارت اند از روش های تحلیل مستقیم و عددی [4]. روشهای مستقیم انواع مختلفی دارد که شامل روشهای تجربی، مشاهده ای و تحلیلی است و روشهای عددی شامل روشهای اجزای محدود، اجزای مرزی، روش تفاضل محدود و... می باشد. در این مقاله برای بررسی پایداری تونل از هر دو روش، تجربی و روش تفاضل محدود (FDM) استفاده شده است [5].

2- مطالعه موردی

تونل - مطالعه موردی در کنگلومرای سازند هزار دره یا واحد A قرار دارد. این سازند شامل یک مجموعه از شن های زاویه دار یا نیمه گرد شده، قلوه سنگ، گاهی قطعه سنگ با یک ماتریکس ماسه ای به همراه سیلت و رس می باشد که فاقد جورشدگی است. این کنگلومرا دارای سن پلیستوسن می باشد. رسوبات در محل احداث تونل به صورت یکدست، از کنگلومرای همگن بدون لایه بندی به رنگ خاکستری روشن تشکیل شده است. ضخامت واقعی بخش خاکستری 106/66 متر می باشد و شیب زمین در این بخش 28 درجه و 53% است و ضخامت این واحد در تونل تقریباً 110 متر می باشد. در این پروژه 142 متر از طول حفاری در واحد کنگلومرای قرار دارد. طول تونل تقریباً 1100 متر و محور تونل مستقیم با شیب طولی 5 درصد می باشد. تونل با ابعاد 9x12 با شعاع قوس 6 متر و دیواره 3/5 متر بصورت نعل اسبی حفر می شود که حفر آن بر اساس حفاری مرحله ای و بصورت شکل (1) می باشد [6].



حفر قسمت کف در 3 مرحله

شکل (1): تونل مطالعه موردی و نمایش ترتیب مراحل حفاری

حفر قسمت تاج در 1 مرحله

در روند حفر، تونل با مشکل اساسی روبرو می گردد و ان ایجاد ترکی در راستای محور تونل، در سیستم نگهداری می باشد. بنابراین با توجه به مشکل پیش آمده، در ادامه ی تحقیق دو عامل موثر در بروز این پدیده یعنی گام حفاری و نحوه حفر قسمت کف مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرند.

3- تحلیل پایداری تونل به کمک روش تجربی

سیستم های طبقه بندی توده سنگ می تواند برای برآورد اولیه نگهداری های مورد نیاز و خواص مقاومتی و تغییر شکل توده سنگ به کار رود.

جدول 1- ارزش Q و RMR برای سنگهای تونل [7].

RMR	Q	توده سنگ
20	0/05	زون ضعیف و کنگلومرا

باتوجه به مقادیر مذکور، در زون ضعیف و کنگلومرا، حداکثر عرض دهانه بدون نگهداری از رابطه (1) بدست می آید [8].

$$\text{Span} = 2ESR Q^{0.4} \quad (1)$$

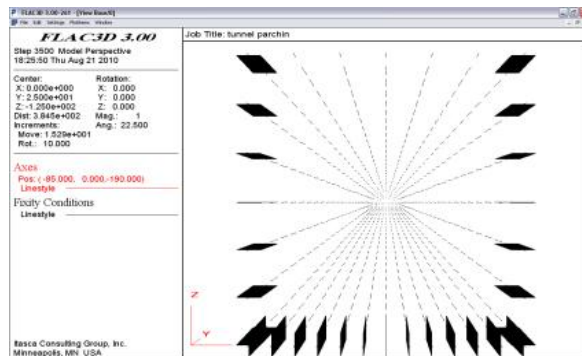
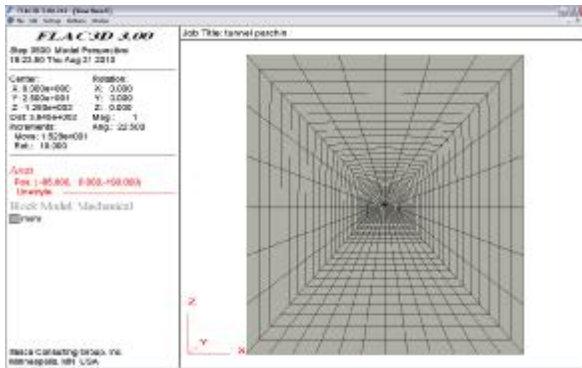
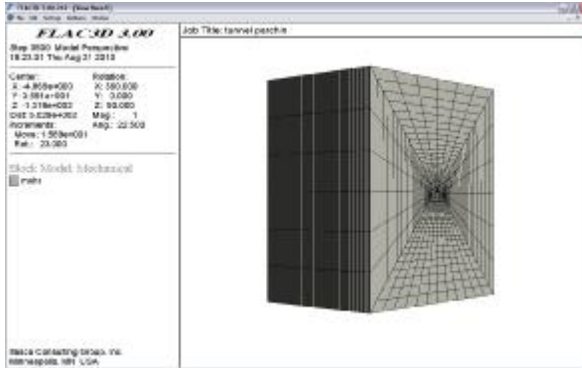
Span: حداکثر عرض دهانه بدون نگهداری

ESR: ضریب اهمیت نگهدارنده

ESR برای تونل های راه و راه آهن برابر یک در نظر گرفته می شود. بنابراین سیستم نگهداری مورد استفاده، شامل شاکریت به ضخامت 15 سانتی متر در سقف و دیواره، مش های فولادی، قاب فولادی به فاصله نیم متر از یکدیگر می باشد و در نهایت حداکثر عرض دهانه بدون نگهداری تقریباً 0/5 متر خواهد بود [8 و 9].

4- تحلیل پایداری تونل به کمک روش عددی

روش های عددی به دو گروه عمده تقسیم می شوند: یک گروه برای محیط های پیوسته و گروه دوم برای محیط های ناپیوسته مورد



شکل (2): مدل 3 بعدی تونل و نمایش شرایط مرزی

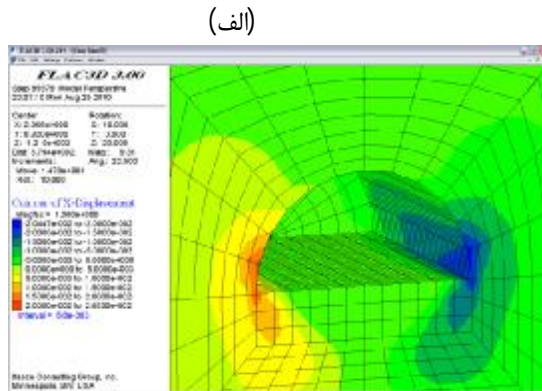
استفاده قرار می گیرند. گروه اول، زمین را همانند یک محیط پیوسته در نظر گرفته و برای حل، آن را به اجزایی تقسیم می کنند. در صورتی که گروه دوم زمین را به صورت مجموعه ای از بلوک های مجزا در نظر می گیرد که در آن درزه ها و ناپیوستگی ها مرز بین بلوک ها را تشکیل می دهد. در پروژه حاضر، با توجه به خاکی بودن خاستگاه تونل و عدم وجود سطوح ناپیوستگی، روش عددی مناسب برای محیطهای پیوسته بکار گرفته می شود. بر این اساس نرم افزار FLAC برای تحلیل پایداری انتخاب گردید [5 و 10]. به هنگام انتخاب مدل رفتاری در یک آنالیز خاص باید خصوصیات مشخص شده از مواد مدل شده و هدف کاربردی آنالیز مدل را در نظر داشت. برای مثال مدل موهر-کولمب زمانی بکار می رود که سطح تنشها به گونه ای باشد که شکست مواد مورد انتظار است [10 و 11]. در این مرحله با توجه به ترتیب مراحل مدلسازی، مدل مورد استفاده مدل موهر-کولمب در نظر گرفته می شود و شرایط موجود در منطقه و کلیه محاسبات در سه مرحله، قبل از حفار، بلافاصله بعد از حفار و در نهایت پس از نصب سیستم نگهداری انجام شده و در هر مرحله کلیه تنشها و جابجائیها در اطراف تونل محاسبه می شود. در شکل (1) نحوه شبکه بندی و تعریف هندسه مدل نشان داده شده است. همچنین در جدول (1) مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ برای مدل سازی آورده شده است. در این نوع شبکه بندی سعی شده تا با در نظر گرفتن فاصله دقیق زونها و شرایط موجود در منطقه (شرایط اولیه و مرزی) به واقعیت نزدیک شده و جوابهای دقیق تری از نرم افزار بدست آورد. در مدل ساخته شده، برای اعمال شرایط مرزی جابجائی افقی در طرفین بلوک و جابجائی قائم در کف مدل صفر می گردد. همچنین بر اساس نظر هوک و همکاران ضریب تمرکز تنش (K) یا نسبت تنش های افقی به قائم برابر یک در نظر گرفته می شود [6].

جدول 2- مشخصات ژئومکانیکی توده سنگ [12].

توده سنگ	روباره (m)	مدول یانگ (GPa)	چسبندگی (MPa)	زاویه اصطکاک (درجه)	دانسیتته (t/m ³)	ضریب پواسون
کنگومرا	120	0/87	0/23	24/7	2/2	0/3

در ادامه، گامهای حفاری 0/5 متر و 1متر مدلسازی می شود و نتایج حداکثر عرض دهانه بدون نگهداری برای حفر قسمت تاج برای 5 متر پیشروی مطابق جدول (3) می باشد. بنابر نتایج بدست آمده از مقایسه گامهای حفاری 0/5متر و 1متر می توان پی برد که گام حفاری 0/5 متر بهترین گزینه برای حفاری قسمت تاج است.

جدول 3- نتایج حفر 5متر از قسمت تاج تونل (قسمت A)



(الف)

شکل (3): خطوط تراز جابجاییهای قائم (الف) و افقی (ب)

تونل مشکل ناپایداری ندارد. کرنش بحرانی حاصل از تراز هشدار خطر II به عنوان مبنای طراحی نگهداری تونل های مهندسی پیشنهاد شده است و تراز هشدار خطر III پایداری کوتاه مدت را نشان می دهد. با تعیین کرنش مجاز و با استفاده از رابطه (3) و (4) جابجائی مجاز مشخص می گردد [15]. جدول 5 نشان دهنده خصوصیات ژئومکانیکی مواد تشکیل دهنده تونل مورد مطالعه می باشد.

$$\gamma_c = (1 + \nu) \cdot \epsilon_c \quad \text{رابطه (3)}$$

ν : نسبت پواسون و γ_c : کرنش برشی بحرانی

$$u_{cm} = \epsilon_{cm} \cdot a \quad \text{رابطه (4)}$$

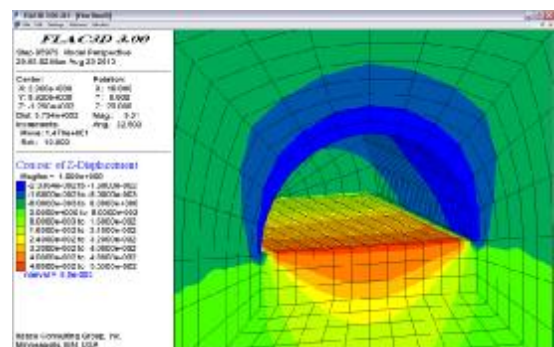
u_{cm} : جابجایی بحرانی (m) و ϵ_{cm} : کرنش مجاز توده سنگ (%) و a : شعاع تونل (m)

uc	a	γ_c	ϵ_c	Em	σ_c
1/7cm	6m	-3	-3	7782GPa	5MPa
		$3/6416 \times 10^4$	$2/8 \times 10^4$	1	

(m) و ν : کرنش مجاز توده سنگ (%) و a : شعاع در تونل مطالعه موردی، نحوه حفر قسمت کف تونل بدین گونه است که با برداشتن قسمت میانی، پایه هایی بجا خواهد ماند که کل سیستم نگهداری بر روی این پایه ها قرار خواهند گرفت شکل (4). تونل (m)

دیواره (cm)	کف (cm)	سقف (cm)	حداکثر جابجایی گام حفاری
1/2631	2/258	1/3371	0/5 متر
1/8950	3/045	1/9243	1 متر

سیستم نگهداری زمانی اعمال می شود که جابجایی دیواره به 0/45 - 0/4 جابجایی ماکزیمم برسد. در نهایت نتایج بدست آمده برای 15 متر حفاری قسمت تاج با گام حفاری 0/5 متر به شرح جدول (4) می باشد.



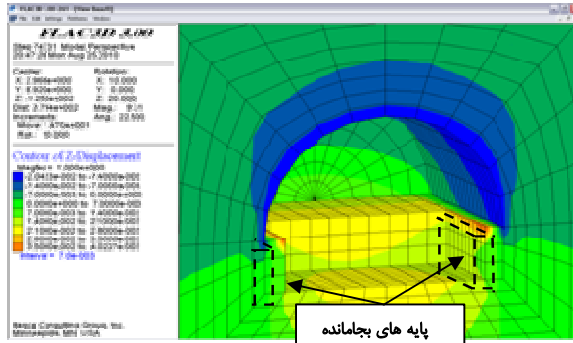
جدول 4- نتایج حفر 15 متر از قسمت تاج تونل با گام نیم متر

دیواره (cm)	کف (cm)	سقف (cm)	حداکثر جابجایی متر از حفاری
0/47925	0/49904	0/4964	0/5 متر اول
1/2631	2/258	1/3371	5 متر با نگهداری
1/6166	4/3937	1/9196	10 متر با نگهداری
2/0447	5/5305	2/2364	15 متر با نگهداری
4/8656	7/4282	4/7881	15 متر بدون نگهداری

در تحلیل پایداری، پارامترهای لازم در مدلسازی عددی برای مدل مورد نظر تعیین گردید و نتایج جابجائی در این ناحیه با نرم افزار بدست آمد که مقدار این جابجائیها با جابجائی مجاز مقایسه شده و وضعیت پایداری تونل بررسی گردید. جابجائی مجاز از روش کرنش بحرانی و با روابط ذیل تعیین می گردند [14].

تراز هشدار خطر I $\log \epsilon c = -0.25 \log E - 0.85$
 تراز هشدار خطر II $\log \epsilon c = -0.25 \log E - 1.22$
 تراز هشدار خطر III $\log \epsilon c = -0.25 \log E - 1.5$
 E مدول تغییر شکل توده سنگ (کیلوگرم نیرو بر سانتیمتر مربع) و ϵc کرنش بحرانی برحسب درصد. در شرایط تراز هشدار خطر I

در (الف) رایط



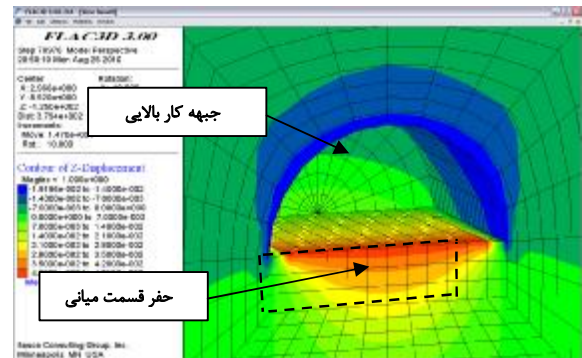
جدول 5- خصوصیات ژئومکانیکی خاستگاه تونل

(ب)

شکل (4): حفر قسمت میانی (الف) و بجا گذاشتن پایه ها (ب)

این امر سبب تشکیل یک حلقه برابر را اطراف تونل می شود و نتیجه آن، کاهش مقدار لنگر خمشی و نیروی برشی وارد بر سیستم نگهداری است.

بنابراین در این قسمت به بررسی نحوه برداشت پایه ها و تاثیر آن بر جابجایی ها و سیستم نگهداری خواهیم پرداخت.



جدول 6- نتایج حاصل از حفر قسمت کف

پارامترهای ارزیابی	ماکزیمم لنگر خمشی شاتکریت (ton.m)	ماکزیمم نیروی برشی قاب فولادی (ton)	نوع طراحی
الگوی (الف)	2/6	11/28	
الگوی (ب)	3/5	13/96	

پارامترهای ارزیابی	ماکزیمم جابجایی کف (cm)	ماکزیمم جابجایی دیواره (cm)	نوع طراحی
الگوی (الف)	2/2531	2/0250	
الگوی (ب)	2/9541	3/12683	

5- نتیجه گیری

در این مقاله با توجه به روشهای تجربی و روش عددی، مناسب ترین گام حفاری، برای سنگهای ضعیف و قسمت کنگلومرا 1/5 متر در نظر گرفته می شود. همچنین نوع سیستم نگهداری و زمان بهینه نصب آن، با توجه به روشهای مذکور، شامل

با توجه به (شکل 4- الف) چون سیستم نگهداری هنوز بر روی پایه های جانبی قرار دارد، حداکثر جابجایی های قائم بعد از حفر قسمت میانی، تغییر چندانی نخواهند داشت بنابراین مهمترین قسمت عملیات کف برداری، نحوه حذف پایه های جانبی و بستن کف تونل می باشد. در این قسمت 2 الگو برای حفاری پایه ها مورد بررسی قرار می گیرد. الگوی الف، الگوی پیشنهاد شده توسط محقق بوده و الگوی ب، الگوی استفاده شده در تونل مطالعه موردی می - باشد.

الگوی الف- حفاری و نگهداری کف با گام حفاری نیم متر و اختلاف فاز 10 متر (فاصله بین جبهه کار تاج و جبهه کار کف تونل)

الگوی ب- حفاری و نگهداری کف با گام حفاری 2/5 متر و اختلاف فاز 10 متر

در هر دو الگو حداکثر جابجایی قائم در قسمتی که پایه ها بر داشته می شوند رخ می دهد ولی مقدار و وسعت حداکثر جابجایی قائم و افقی در الگوی (ب)

نسبت به الگوی (الف) بیشتر است همچنین به دلیل بسته شدن به موقع کف در الگوی (الف)، وسعت و مقدار جابجایی در کف تونل (آماس کف) به مراتب کمتر از الگوی (ب) است.

با مقایسه الگوهای ارائه شده در جدول (6) می توان پی برد که بستن به موقع کف، سبب کاهش جابجایی های سنگهای پیرامون تونل می شود بنابراین دگرشکلی سنگهای پیرامون تونل بسیار کم شده و مقاومت اولیه سنگ تا جایی که ممکن است حفظ می گردد

سرعت حفاری در این قسمت، می توان به این نکته توجه کرد. همچنین میزان همگرایی تونل باستن کف و تکمیل به موقع سیستم نگهداری محدود می شود.

شاتکریت به ضخامت 15cm در سقف و دیواره، شبکه های فولادی وقابهای فولادی صلب به فاصله نیم متر از یکدیگر، می باشد. همچنین زمان بهینه نصب سیستم نگهداری، نصب آن بلافاصله بعد از هر گام پیشروی می باشد.

در حفاری قسمت کف، برداشتن قسمت میانی، تغییر چندان در حداکثر جابجایی های قائم نخواهد داشت، بنابراین برای افزایش بسزایی برخوردار می باشد افزایش گام حفاری تاج و کف تونل موجب بروز گشتاورهای خمشی در جهت محور و عمود برمحور تونل می شود و نتیجه آن ایجاد تمرکز تنش زیاد در در پای دیواره های جانبی می باشد. پیشنهاد می شود به منظور بررسی تأثیر گسل ها و درزه ها، آزمایش هایی برای بدست آوردن خصوصیات ژئومکانیکی آنها انجام شود. همچنین برای بررسی میزان تاثیر بارهای ناشی از زلزله، لازم است آنالیز دینامیکی نیز انجام شود.

مراجع

- [6]. Hoek, C. van den, Breeman. A. M., Bak, R. P. M., Buurt. G. van (1978). The distribution of algae, corals and gorgonians In relation to depth, Light attenuation, water movement and grazing pressure in the fringing coral reef of Curaao, Netherlands Antilles. *Aquat. Bot.* 5: 1-46
- [7]. گزارش "زمین شناسی تونل مطالعه موردی"، (1388). شرکت پارس گرما
- [8]. Goodman, R. E., (1989). *Introduction to Rock Mechanics*, 2nd Edition.
- [9]. Hoek, E., Kaiser, P. K., Bawden, W. F., (1995). "Support of Underground Excavation in Hard Rock".
- [10]. Itasca consulting. Group, Inc, 2004, "FLAC.3 D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3 Dimensions", version 3.00, User's Manual.
- [11]. منجری، مسعود، رضاخواه، مجتبی، (1386)، طراحی شیب پایدار دیواره های معدن مس سونگون، نشریه علمی - پژوهشی "مهندسی معدن" دوره دوم، شماره سوم صفحه 41 تا 49
- [12]. گزارش "آزمایشگاه مکانیک خاک تونل مطالعه موردی"، (1388)، شرکت پارس گرما
- [13]. Hoek, E. (2001). "Rock Engineering". Evert Hoek Consulting Engineer Inc.
- [14]. Sakurai, S., (1993), "Direct Strain Evaluation Technique in Construction of Underground openings", In Proc. 22. U.S. Symp. Rock Mech. Boston, MA. (Edited by H.H. Einstein), pp 278-282.
- [15]. Sakurai, S., (1997), "Lessons Learned from field measurements in tunnelling", *Tunnelling and underground space technology*, vol. 12, No. 4, pp 453-460
- [1]. Corbetta and Nguyen Minh, (1992) "steady state method for analysis of advancing tunnels..in..elastoplastic..and..viscoplastic..media", proc. of the forth. international symposium in numerical models in geomechanics
- [2]. همتی، جلال، (1383)، طراحی سیستمهای نگهداری در معادن (ترجمه)، چاپ دوم، انتشارات جهاد دانشگاهی واحد تهران
- [3]. Panet, M., (1993). Understanding deformations in tunnels. In: Hudson, A., Brown, E.T., Fairhurst, C., Hoek, E. (Eds.), *Comprehensive Rock Engineering*, Vol. 1. Pergamon, London, pp. 663-690.
- [4]. Sakurai, S., (1985), Evaluation of plastic zone around underground opening by means of displacement measurement, Fifth Int. Conf. on Numerical Method in Geomechanics Edited by Kawamoto, T. and Ishicawa, Y., Nagoya, Japan. PP. 111-118.
- [5]. باقرزاده، افضل، (1386)، مقدمه ای بر مدل سازی و تحلیل با نرم افزار FLAC 3D (ترجمه)، چاپ اول، نشر دیباگران تهران