

"تونلسازی و تغییر اقلیم"

۶-۸ آذر ماه ۱۳۹۶

کنترل پدیده فشارندگی در تونل پونه با سیستم نگهدارنده پلاستیک شونده

سجاد رضوانی فر^۱، حسین بور^۲، بهزاد اهور^۳

^۱ کارشناس ارشد، مهندسین مشاور طاها؛ Sajjad_rezvanifar@yahoo.com

^۲ کارشناس ارشد، مهندسین مشاور طاها؛ Hosseinboor@yahoo.com

^۳ کارشناس ارشد، مهندسین مشاور طاها؛ Behzadahoor@gmail.com

چکیده

باتوجه به صرف هزینه‌های بسیار برای احداث و پایداری تونل‌هایی که در عمق زیاد و جنس ضعیف واقع شده‌اند، ارائه راه‌کارهایی برای کاهش هزینه‌های نگهداری و نیروهای داخلی در اثر پدیده فشارندگی^۱ در سازه نگهبان از اولویت‌های مهندسین طراح می‌باشد. در همین راستا به منظور دست یابی به بهینه‌ترین سیستم نگهداری در تونل پونه، واقع در آزاد راه اراک- خرم‌آباد، برای اولین بار در کشور سعی شد سیستم نگهداری پلاستیک شونده^۲ (انعطاف پذیر) برای زون فشارنده طراحی شود. همچنین به منظور ارائه مزایا این روش نگهداری، سیستم نگهداری پلاستیک شونده با سیستم نگهداری اجرا شده (صلب) تونل مقایسه شده است. با استفاده از روابط تجربی و تحلیلی به تشخیص پدیده فشارندگی پرداخته شده است. سپس رفتار توده سنگ در بر گیرنده تونل با در نظر گرفتن شرایط فشارندگی توسط نرم‌افزار عددی Phase.2D.ver8 شبیه سازی گردید. در انتها سیستم نگهداری پلاستیک شونده (انعطاف پذیر) جهت کنترل شرایط فشارندگی تونل طراحی شده است. برپایه مدل‌های عددی ساخته شده، تغییرات تنش و نیرو برای هر سیستم نگهداری به صورت مجزا بررسی شده. پس از مقایسه این سیستم‌های نگهداری براساس شرایط زمین، بهینه‌ترین سیستم نگهداری انتخاب و ارائه خواهد شد. لازم بذکر است طراحی بتن مسلح تونل براساس آیین نامه ACI آمریکا و با استفاده از نرم‌افزار Sap.Ver.14 انجام شده است. بعلاوه ترخیص تنش رخ داده در سیستم نگهداری پلاستیک شونده (انعطاف پذیر)، نیروهای داخلی کمتری بر سازه نگهبان تونل وارد شده است. این روند از یک سو سبب کاهش هزینه‌های سیستم نگهداری خواهد شد و از سوی دیگر سبب کنترل پدیده فشارندگی و در نهایت افزایش ضریب ایمنی تونل می‌شود.

واژه های کلیدی: فشارندگی، تونل پونه، سیستم نگهداری، پلاستیک شونده(انعطاف پذیر)

۱- مقدمه

امروز صنعت تونل سازی با توجه به حساسیت طراحی و تاثیرگذاری حفاری فضای زیرزمینی بر بودجه‌های عمرانی در تلاش برای استفاده از علم روز دنیا و مقایسه روش‌های مختلف نگهداری به منظور کاهش هزینه و افزایش سرعت اجرا است. با توجه به توسعه علم و فناوری در مطالعات تونل

¹ . squeezing

² . Yielding support

در زمان حفر و آشنایی بهتر و بیشتر با شرایط حاکم بر تونل‌ها، باعث شده که رویکرد جدیدی به تدقیق سیستم نگهداری و تحلیل بررسی مجدد برای تونل، بوجود آید.

باتوجه به صرف هزینه‌های بسیار برای احداث و پایداری تونل‌هایی که در عمق زیاد و جنس ضعیف واقع شده‌اند، طراحی سیستم‌های نگهداری پلاستیک شونده (Yielding support) کمک بسیار بزرگی به توسعه روز این علم و همچنین کاهش هزینه‌های تونل خواهد بود. به منظور دست‌یابی به بهینه‌ترین سیستم نگهداری در تونل پونه برای اولین بار در کشور، سیستم نگهداری پلاستیک شونده برای زون فشارنده طراحی و با سیستم نگهداری اجرا شده (قبل) تونل مقایسه شده است. پدیده مچاله‌شوندگی^۳ به همگرایی‌های بزرگ وابسته به زمان در طی حفاری تونل گفته می‌شود. این پدیده زمانی اتفاق می‌افتد که ترکیب تنش‌های القائی و مواد ضعیف، باعث ایجاد تنش‌های القائی فراتر از مقاومت برشی شده، جایی که خزش^۴ آغاز می‌شود و باعث می‌شود این بخش از اطراف تونل به داخل هجوم آورد. این تغییر مکان‌ها ممکن است در طی حفاری تونل یا در دوره زمانی طولانی ادامه داشته باشد. میزان همگرایی تونل، نرخ تغییر مکان‌ها و وسعت حوزه ناحیه پلاستیک در اطراف تونل به خواص زمین‌شناسی و ژئوتکنیکی منطقه، تنش برجا، جریان آب، فشار آب حفره‌ای و خواص توده‌سنگ بستگی دارد. از طرفی مچاله‌شوندگی رابطه نزدیکی با تکنیک‌های حفاری و نصب سیستم نگهداری دارد. به طور مثال اگر نصب سیستم نگهداری به تعویق انداخته شود، تنش‌ها توزیع مجدد شده و توده‌سنگ به داخل تونل رانده می‌شود. در عوض اگر تغییر مکان‌ها به وسیله نصب سریع سیستم نگهداری کنترل شود، سیستم نگهداری تحت فشار بالایی قرار می‌گیرد [۹]. تونلسازی در زمین‌های با رفتار مچاله‌شونده باعث تأخیرات طولانی در احداث یک پروژه تونلسازی و تحمیل هزینه‌های اقتصادی زیاد می‌شود. موارد موفقیت‌آمیزی نیز با درک درست از مسائل مچاله‌شوندگی و تشخیص مناسب رفتار توده‌سنگ در اروپا از قبیل تونل کریستینا^۵ در ایتالیا، گوتهارد^۶ در سوئیس، تونل سیمپلون^۷ بین ایتالیا و سوئیس گزارش شده است [۵].

۲- زمین‌شناسی مهندسی و ژئوتکنیک تونل پونه

۲-۱- تونل آزادراه اراک - خرم آباد

موقعیت تونل دوقلوی پونه (کیلومتر ۱۲۰+۹۹ الی ۲۲۰+۱۰۲) حدود ۲۵ کیلومتری جنوب غربی شهر بروجرد و حدود ۳۶ کیلومتری شمال شرقی خرم آباد قرار دارد. تونل‌های فوق در قطعه سوم آزاد راه اراک - خرم آباد واقع شده است (شکل ۲-۱).



شکل ۲-۱ راه‌های دسترسی منطقه مورد مطالعه

۲-۲- زمین‌شناسی مهندسی

گستره مورد مطالعه در تقسیم بندی ساختاری - رسوبی ایران زمین در ناحیه زاگرس گسل خورده (زاگرس مرتفع) قرار دارد. حد شمالی ناحیه مذکور با زون سندنجد - سیرجان به وسیله گسل راستالغز راستگرد دورود و حد جنوبی آن توسط زاگرس چین خورده محدود می‌گردد. زون مزبور (زاگرس مرتفع)، عمیق‌ترین قسمت فرورفتگی زاگرس (اقیانوس) را طی مزوزوئیک و اوایل ترسیر تشکیل می‌داد [۱]. بر اساس اطلاعات موجود و برداشت‌های صحرایی توده سنگ‌های در برگیرنده و همچنین با در نظر گرفتن گستردگی لایه‌های سنگ آهکی - ماری، شیلی و آبرفتی، تونل

³ Squeezing

⁴ Creep

⁵ Cristina

⁶ Gotthard

⁷ Simplon

شامل ۹ زون می‌باشد. که در هر یک از این زون‌ها اطلاعات ناپیوستگی‌ها و زمین‌شناسی برداشت شده است [۲]. براساس طبقه بندی های انجام پذیرفته، بازه های T1 و T2 بیشترین پتانسیل رخ داد پدیده فشارندگی دارند. بازه T1 واحد سنگ آهک مارنی $K6^{ml}$ است که این واحد شامل سنگ آهک مارنی همراه با رگ و رگچه کلسیت با میان لایه‌هایی از مارن سبز، مارن سنگ و مارن آهکی می‌باشد که در بخش ورودی تونل در زیر نهشته‌های آبرفتی قرار گرفته است. گذر تونل‌های راست و چپ به ترتیب با طول ۱۵۲۸ و ۱۴۵۰ متر از رسوبات سنگی این واحد می‌باشد. در محدوده نهشته‌های این واحد گمانه‌های BH:TU04, BH:TU07, BH:TU05 حفاری شده است. بازه T2 شامل واحد شیل آهکی K^{sh} این واحد شامل شیل آهکی به رنگ قرمز است که به صورت رخنمون‌هایی با ریخت تپه ماهوری در بخش ورودی تونل قابل رویت می‌باشد. واحد شیل آهکی همانند واحد قبل با رگ و رگچه کلسیت همراه است که هوازده و کم مقاومت است. این واحد در تونل‌های راست و چپ به ترتیب ۱۳۳ و ۱۳۱ متر را شامل می‌شود [۴].

۱-۲-۲- تحلیل و بررسی Q و RMR در زون‌های فشارنده

سیستم طبقه بندی تجربی، وسیله‌ای است که طراح را قادر می‌سازد تا تجربیات کسب شده قبلی در مورد شرایط سنگ و حائل‌های مورد نیاز سایر ساختگاه‌های زیرزمینی مشابه را با خصوصیات پروژه پیش‌رو هماهنگ نماید. براساس ارزیابی پایداری تعداد ۲۱۲ سازه زیرزمینی که در گذشته حفاری و اجرا شده‌اند، بارتون، لین و لوند از انستیتو ژئوتکنیک نروژ، طبقه بندی توده سنگی معروف به روش (Q) را در سال ۱۹۷۴ پیشنهاد و شاخص (Q) را برای تعیین کیفیت توده سنگی حفاری شده برای ایجاد تونل، مطرح نمودند (معادله ۱-۲) [۶]. پس از ارزیابی ناپیوستگی‌های توده سنگ دربرگیرنده سازه زیرزمینی و تعیین اعداد مربوط به هر یک از ۶ سنجه پایین، به کمک جداول تهیه شده توسط بارتون و همکاران عدد (Q) که نشان دهنده کیفیت توده سنگ است، تعیین می‌گردد (جدول ۱-۲).

$$Q = \left(\frac{RQD}{J_n} \right) \times \left(\frac{J_r}{J_a} \right) \times \left(\frac{J_w}{SRF} \right) \quad (1-2)$$

جدول ۱-۲ رده بندی توده سنگ میزبان در تونل به روش Q

نشانه	T1	T2
شاخص (Q)	0.28	0.17

۱-۱-۲-۲ تحلیل و بررسی RMR در زون‌های مختلف

در روش Rock Mass Rating ابتدا ۵ سنجه برای توده سنگ منظور می‌شود و به هریک امتیازی تعلق می‌گیرد تا مجموع امتیازها با نشانه (BRMR) محاسبه گردد. با توجه به پیمایش‌های صحرایی صورت گرفته در محدوده تونل‌های دوقلوی پونه و روی محور طولی آن، مقدار عددی روش (RMR) امتیازاتی تعلق می‌گیرد (جدول ۲-۲). با توجه به اینکه امتیاز سنجه ششم روش (RMR) به اختلاف راستا، زاویه شیب لایه بندی و ناپیوستگی‌های غالب با امتداد و جهت حفاری و همچنین انجام عملیات حفاری از یک یا دو سمت تونل وابسته است، دارای مقادیر متفاوتی برای سمت‌های ورودی و خروجی تونل خواهد بود [۳].

جدول ۲-۲ رده بندی توده سنگ میزبان در تونل به روش (RMR)

نشانه	T1	T2
شاخص BRMR	41	30
امتیاز کلی (TRMR)	28	39
طبقه بندی نهایی	IV	IV

۲-۱-۲-۲ هم ارزی دو روش (RMR) و (Q)

کاربرد هریک از روش‌های تجربی (RMR) و (Q) در رده بندی توده سنگی میزبان تونل، کمک قابل ملاحظه‌ای به اخذ تصمیمات مشکل عملی مانند نوع حفاری و حائل بندی تونل‌ها به شمار می‌آید. برای ایجاد سهولت در مقایسه دو روش یاد شده بالا، بنیواسکی رابطه زیر را به منظور هم ارز نمودن مقادیر (RMR) و (Q) پیشنهاد کرده که تا اندازه‌ای روش‌های مزبور را بهم مرتبط می‌سازد (معادله ۲-۲).

$$(RMR)' = 44 + 9 \ln(Q) \quad (2-2)$$

مقایسه دو روش با برآورد نسبت (ضریب همبستگی R^2) بدین ترتیب صورت می‌گیرد که هرچه نسبت یاد شده به عدد یک نزدیکتر باشد، هماهنگی بیشتری بین نتایج رده بندی به دو روش فوق برقرار است. بنابراین برای هریک از قسمت‌های تونل، می‌توان (RMR) را محاسبه و نتایج بدست آمده به روش‌های مورد بحث را با هم مقایسه نمود. مقایسه اعداد بدست آمده از بکارگیری روش‌های رده بندی (RMR) و (Q) برای تونل‌های مورد مطالعه، نشان دهنده نزدیک بودن نتایج حاصل از کاربرد دو روش مذکور می‌باشد [۳].

جدول ۲۲-۳ مقایسه شاخص عددی (Q) و (RMR) برای توده سنگ‌های تونل دوقلوی یونه

T2	T1	بازه	مربوط به بخش بندی طول تونل
133	1190	طول قسمت (متر)	
226	226	راستای قسمت (درجه)	
0.17	0.28	شاخص عددی برآورد شده (Q)	مربوط به توده سنگ در بر گیرنده تونل
28	33	عدد برآورد شده (RMR)	
28	39	شاخص عددی برآورد شده (RMR)	
1	0.85	نسبت (RMR) / (RMR)	
35	45	مقدار (GSI)	
45	45	شیب ظاهری لایه‌ها (درجه)	
0	0	زمان پایداری بی نیاز از پوشش	

۲-۳- مطالعات ژئوتکنیکی توده

۲-۳-۱- حفاری گمانه ماشینی

حفاری گمانه‌های مورد نظر به روش دورانی^۸ با زاویه صفر درجه نسبت به قائم انجام شده است. از عمق ۱۰ متر بالای تونل تا عمق ۱۰ متر زیر تونل عملیات حفاری به منظور اخذ نمونه جهت تعیین پارامترهای سنگ به روش مغزه گیری ممتد^۹ با کوربارل انجام گرفته است [۴].

۲-۳-۲- آزمون‌های آزمایشگاهی

آزمایش دانه بندی و آزمایش هیدرومتری با استاندارد ASTM-D 422 بر روی نمونه‌های اخذ شده از گمانه انجام گردید. همچنین آزمایش تعیین حدود اتربرگ به منظور تعیین حدود روانی و خمیری خاک طبق استاندارد ASTM-D4318 انجام پذیرفته است. حد روانی (LL) بخش ریزدانه خاک برای گمانه BH: TU01 بین ۲۵ تا ۳۷ درصد متغیر بوده و دامنه خمیری خاک (PI) در اعماق مختلف با توجه به نوع مصالح ریزدانه موجود در حدود ۱۱ تا ۱۸ درصد متغیر می‌باشد. همچنین آزمایش نفوذ استاندارد در اعماق مختلف گمانه‌ها بر اساس استاندارد ASTM-D-1586- 67 انجام گردید. انجام آزمایش بار نقطه‌ای سنگ تعیین شاخص مقاومت سنگ می‌باشد. مقاومت در برابر بار نقطه‌ای I_s از معادله (۲-۲) محاسبه می‌شود:

$$I_s = \frac{P}{(D_e)^{.2}} \quad (2-2)$$

P = مقدار بار لازم برای شکستن نمونه بر حسب N

D_e = قطر مغزه معادل (بر حسب mm)

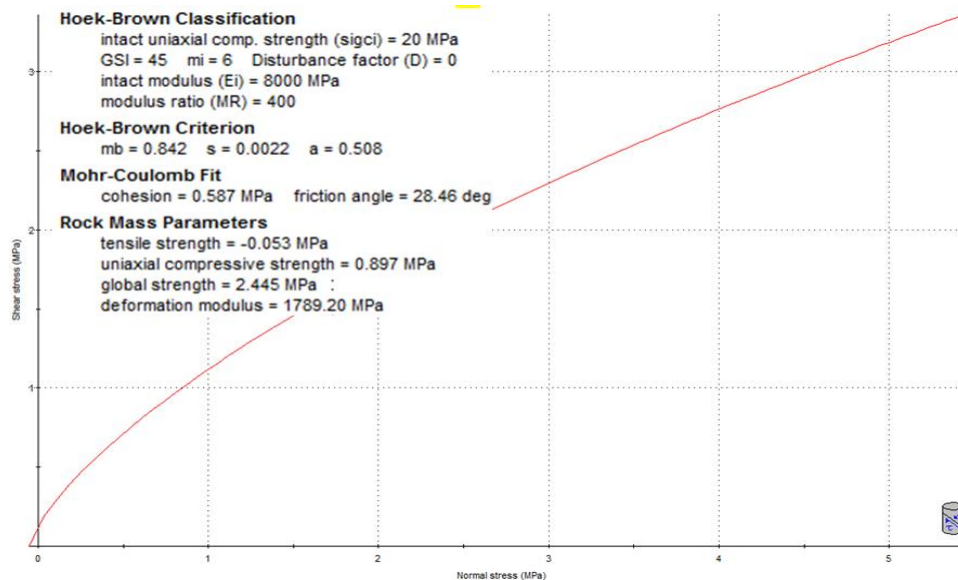
به طور متوسط مقاومت فشاری تک محوره ۲۰ تا ۲۲ برابر مقاومت بار نقطه‌ای محاسبه شده از رابطه بالا در نظر گرفته می‌شود. چگالی سنگ از روش اشباع و غوطه‌ور سازی بر اساس استاندارد ISMR معادل یعنی ۲/۶ مگاپاسکال می‌باشد [۴].

۲-۴- تحلیل پارامترهای ژئوتکنیکی با نرم افزار ROC LOB 1.0

این نرم افزار برای تعیین پارامترهای توده سنگ با استفاده از معیار شکست هوک -بروان، در سال 2002 طراحی شده است. با قابلیت که در این نرم افزار وجود دارد می‌توان پارامترهای مقاومتی معادل با معیار شکست موهر -کلمب را نیز برای توده سنگ بدست آورد (شکل ۲-۲). جهت تعیین اندیس مقاومت زمین شناسی با توجه به مشاهدت و نمونه برداری‌های انجام شده $GSI=45$ می‌باشد. برای تعیین مقدار عددی تعیین پارامتر ثابت توده سنگ (mi) توده سنگ با توجه به مشاهدت انجام شده مقدار متوسط ۶ برای این پارامتر در نظر گرفته شده است. مقدار ۰/۵ برای فاکتور اختلال در تونل تعیین شد [۱۱].

⁸ - Rotary Drilling

⁹ - Continuous Coring



شکل ۲-۲ نتایج تحلیل پارامترهای ژئوتکنیکی با نرم افزار ROC LOB 1.0

۲-۵- خلاصه تعاریف پدیده فشارندگی

ترزاقی^{۱۰} 1946: فشارندگی و تورم فقط در سنگ‌هایی که مقدار قابل ملاحظه‌ای رس دارند، اتفاق می‌افتد. گیودا^{۱۱} 1982: در مقاله‌ای، واژه فشارندگی جهت بیان تغییرات وابسته به زمان سنگ که به وسیله تمرکز تنش‌های برشی در اطراف تونل اتفاق می‌افتد، تعریف کرده است. رورک^{۱۲} 1984: زمینی که تحت تغییر مکان‌های قابل توجه وابسته به زمان، ناشی از افزایش بارگذاری بیش از مقاومت سنگ در مجاورت تونل قرار دارد، زمین فشارنده نامیده می‌شود. جتوا^{۱۳} 1986: توده‌سنگ ضعیف تحت تنش‌های القائی زیاد ناشی از حفاری منهدم شده و منجر به تشکیل یک ناحیه خرد شده در اطراف مقطع حفر شده می‌گردند که ممکن است ماه‌ها به تغییر شکل خود ادامه دهد. این وضعیت را فشارندگی در سنگ نامند. کواری^{۱۴} 1988: تغییر شکل‌های بزرگ که باعث تقلیل سطح مقطع حتی در کف تونل خواهد شد و تغییر شکل‌هایی که در یک دوره طولانی ادامه خواهند داشت. سینگ^{۱۵} 1988: به پدیده‌ای که در اثر آن توده‌سنگ بعلت افزایش تنش‌ها خرد می‌شود و در نتیجه سنگ دچار افزایش حجم شده و به داخل فضای حفر شده حرکت می‌کند، فشارندگی اطلاق می‌گردد. آیدان و همکاران^{۱۶} 1993: این پدیده بعنوان یک رفتار الاستو-ویسکو-پلاستیک عمل می‌کند و زمانی اتفاق می‌افتد که تنش‌های اطراف تونل باعث شکست توده سنگ شود. این پدیده فیزیکی انبساطی قابل بازبینی نیست. کانتینی و آناگنوستو^{۱۷} 2009: فشارندگی با تغییر شکل زیاد، در طول ساخت تونل پیشرفت تغییر شکل در سنگ‌های ضعیف زیاد می‌شود.

۲-۶- پیش بینی پدیده فشارندگی در تونل

براساس روابط و نمودارهای زیر سعی شد دید مناسبی نسبت به رخداد پدیده فشارندگی در تونل پونه بوجود آید. این امر می‌تواند در زمان حفاری کمک بسیاری به حفاری تونل کند. لذا سعی شد براساس رابطه سینگ^{۱۹۹۲}، گوئل^{۱۹۹۴}، باسین^{۱۹۹۶} و گریمستاد^{۱۹۹۸} به بررسی و تحلیل زون فشارنده پرداخته شده است. نتایج به قرار زیر است:

- ۱- براساس رابطه سینگ^{۱۹۹۲}: تونل در محدوده زون فشارنده واقع شده است.
- ۲- براساس رابطه گوئل^{۱۹۹۴}: تونل در محدوده کم و متوسط زون فشارنده واقع شده است.
- ۳- براساس رابطه باسین^{۱۹۹۶}: تونل در محدوده زون فشارنده واقع شده است.
- ۴- براساس رابطه گریمستاد^{۱۹۹۸}: تونل در محدوده متوسط و سنگین زون فشارنده واقع شده است.

¹⁰Terzaghi

¹¹ Gioda

¹² O'Rourke

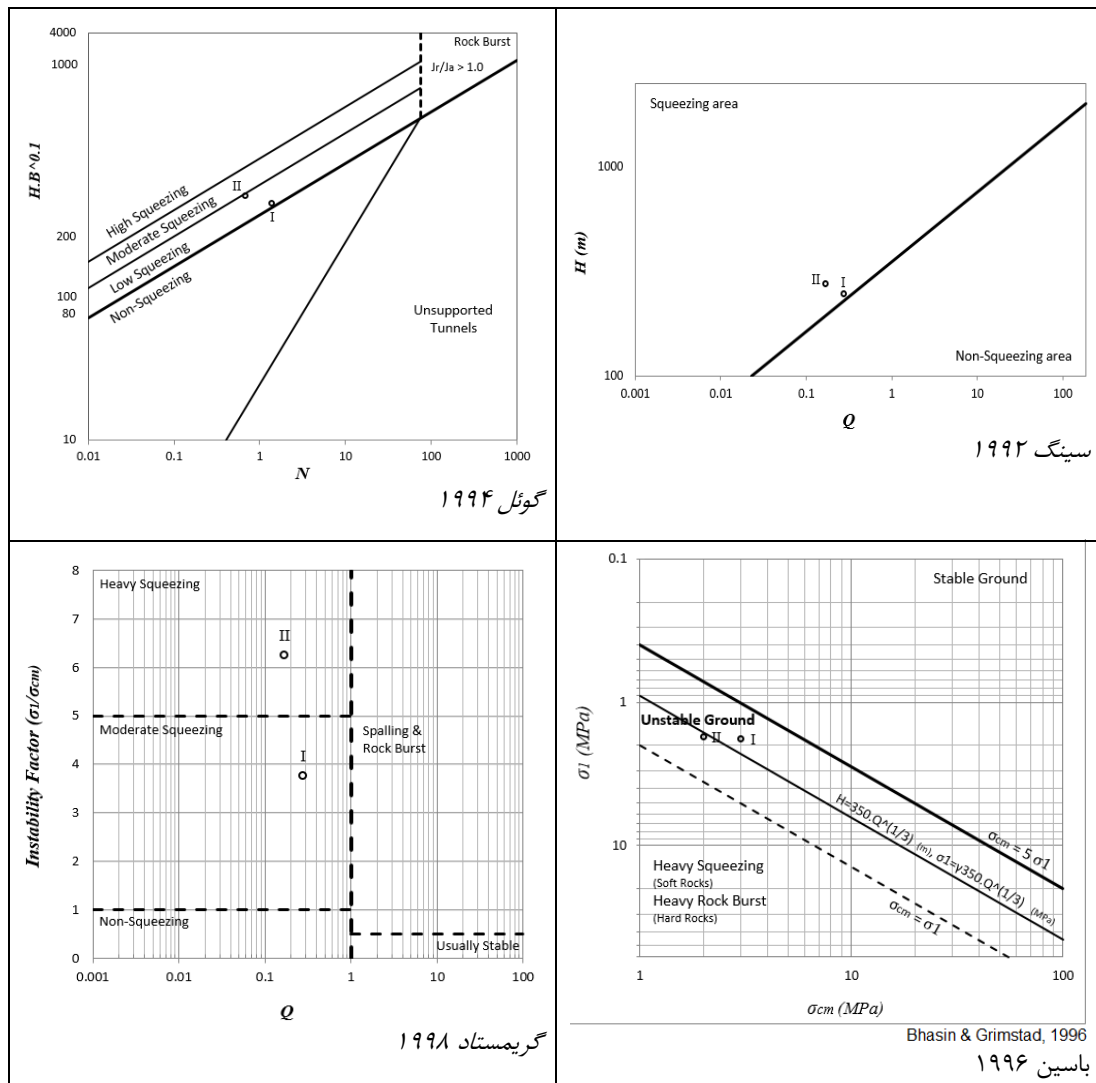
¹³ Jethwa

¹⁴ Kovari

¹⁵ Singh

¹⁶ Aydan et al

¹⁷ Cantieni and Anagnostou



شکل ۲-۳- پیش بینی پدیده فشارندگی در تونل

۳- انواع سیستم های نگهداری تونل

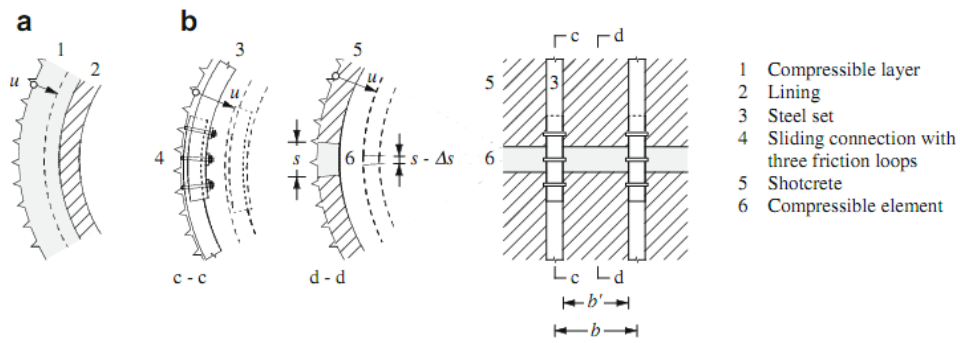
به طور کلی سیستم های نگهداری تونل ها به دو صورت صلب یا انعطاف پذیر طراحی و اجرا می شوند.

۳-۱- سیستم نگهداری فعال (صلب)

در این روش سیستم نگهداری صلب طراحی و اجرا می شود. با توجه به صلبیت سازه نگهدارنده نیروها به طور فزاینده ای در سیستم افزایش یافته که این روش، به سیستم سنگین نیز معروف می باشد. با این هدف که از هر گونه تغییر مکان سیستم جلوگیری کند طرح می شود. لذا سیستم مذکور غیر اقتصادی و سنگین خواهد شد زیرا از همان لحظه نصب، تحت بارگذاری قرار دارد بدین لحاظ سیستم، فعال نامیده می شود.

۳-۲- سیستم نگهداری غیر فعال (انعطاف پذیر)

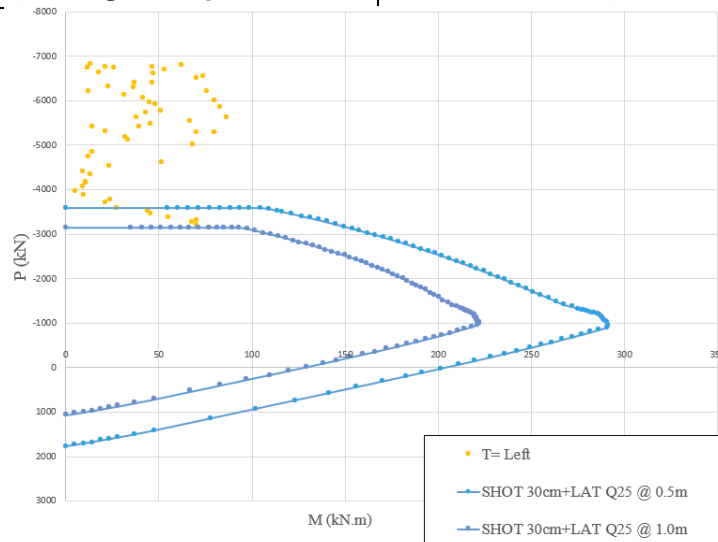
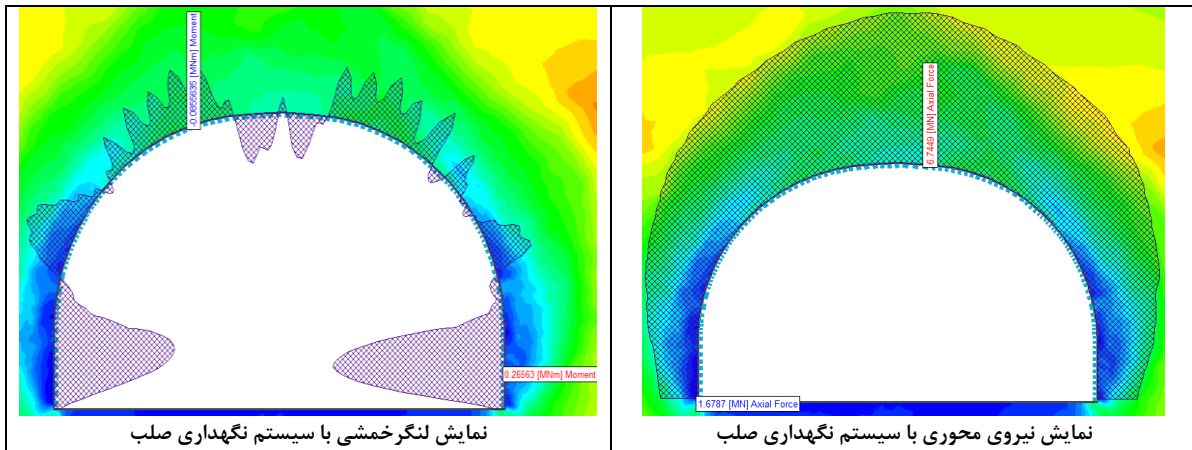
سیستم های نگهداری انعطاف پذیر در تونل، قادر به تغییر شکل هستند بدون اینکه دچار خرابی شوند. این تغییر شکل نیاز به یک اضافه حفاری مطمئن دارد. به سیستم نگهداری که بر اساس این ایده نصب می شود، سیستم نگهداری انعطاف پذیر گفته می شود. سیستم نگهداری صلب و انعطاف پذیر در شکل ۳-۱ نمایش داده شده اند [۷].



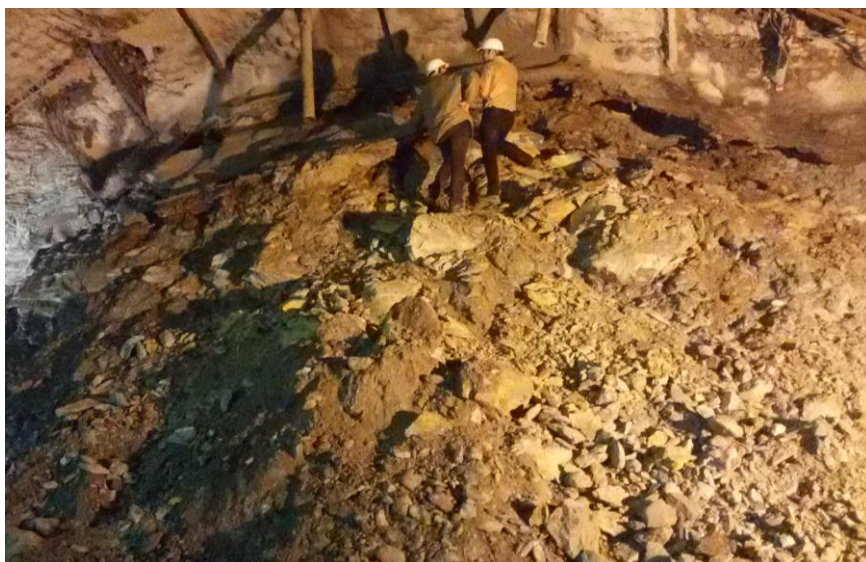
شکل ۳-۱ نمایش سیستم صلب نوع a و سیستم انعطاف پذیر نوع b

۳-۳- تحلیل و بررسی عددی تونل پونه در زون فشارنده (با سیستم نگهداری صلب)

برای تحلیل تونل از یک مدل دو مرحله‌ای، که نشانگر مراحل حفر تونل می‌باشد، استفاده شده است. برای ساخت این مدل، المان‌های مثلثی با اندازه متغیر استفاده شده است. المان‌های موجود در اطراف فضای حفاری نسبت به نقاط دورتر، از تراکم بالا و اندازه کوچکتری برخوردار هستند. لازم به ذکر است که تراکم مش در تمامی زون‌ها نسبتاً برابر می‌باشد. این امر کمک شایانی به افزایش دقت مدل عددی و نتایج حاصل از آن می‌کند. برای افزایش سرعت تحلیل و همچنین وجود تقارن در تونل‌های پونه، یکی از تونل‌ها مدل شده است. برای مدلسازی تونل سعی شده تا ابعاد مرزهای خارجی مدل به اندازه کافی بزرگ اختیار شود تا اثر تغییرات میدان تنش ناشی از حفاری تونل به مرزهای مدل نرسد. سیستم نگهداری تونل لیتیس‌های چهار وجهی که دو آرماتور آن به قطر ۲۵ میلی‌متر می‌باشد. فاصله سازنگهبان در طول این زون ۱ متر و در قسمت‌های ریزشی ۰/۵ متر می‌باشد. سیستم نگهداری تونل در این زون همانطور که از خروجی‌های نرم‌افزار مشخص است، متحمل نیروهای زیادی می‌باشد. این امر ناشی از رخداد پدیده‌ی فشارندگی در تونل می‌باشد. در ادامه براساس نیروهای شکل یافته، به تحلیل سازه نگهبان پرداخته خواهد شد. همانطور که در نتایج مشخص است سازه نگهبان نمی‌تواند از پایداری برخوردار باشد [۱۰].



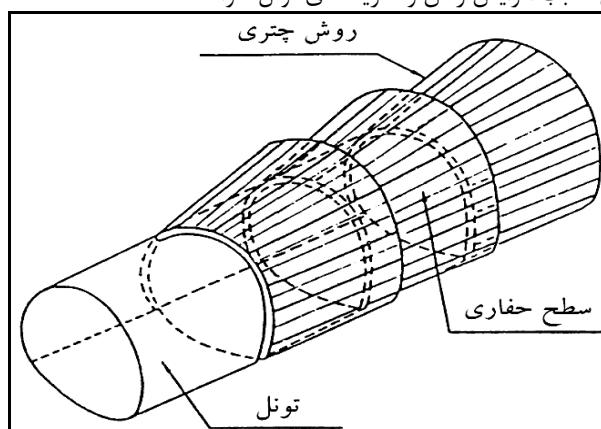
شکل ۳-۲ نمایش نیروهای تشکیل شده در خارج از پوش ظرفیت سازه نگهبان صلب تونل



شکل ۳-۳ نمایش ریزش رخ داده در تونل در اثر پدیده فشارندگی تونل

۴- فورپولینگ (روش چتری)

پس از رخداد ریزش در زون فشارنده، به منظور کنترل جابجایی‌های رخ داده و افزایش پارامترهای مقاومتی توده سنگ دربرگیرنده تونل، عملیات فورپولینگ (روش چتری) انجام پذیرفت. از عملیات فورپولینگ (روش چتری) نخستین بار در اوایل دهه شصت میلادی در بلژیک جهت احداث ایستگاه مترو انت ورپ استفاده شده است [۸ و ۹]. سپس این روش بصورت گسترده‌ای در امریکا جهت ساخت تونل‌هایی با قطر کوچک و در ژاپن جهت احداث ایستگاه‌های مترو و تونل‌های متفاوت به کار گرفته شد. رفته رفته این روش به طور گسترده‌ای در بین انواع تونل‌ها رواج یافت و به عنوان ابزاری کارا در دست طراحان قرار گرفت تا بوسیله آن فشار وارده بر پوشش را کاهش دهند. بنابراین عملیات فورپولینگ در این زون به صورت شبکه منسجم در امتداد تونل به طول ۸ متر و با زاویه ۵ درجه نسبت به افق اجرا شد. در پایان به این نکته مهم باید اشاره کرد که اجرای عملیات فورپولینگ به منظور پایداری تونل، سبب افزایش زمان و هزینه‌های تونل خواهد شد.



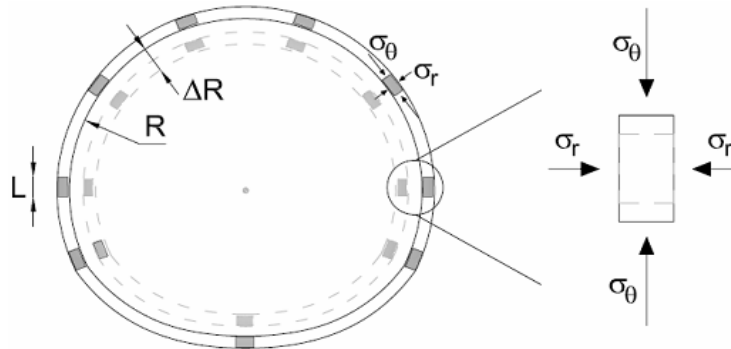
شکل ۱-۴۴ طرح کلی روش فورپولینگ



شکل ۴-۲ اجرای عملیات فورپولینگ به منظور افزایش پایداری توده

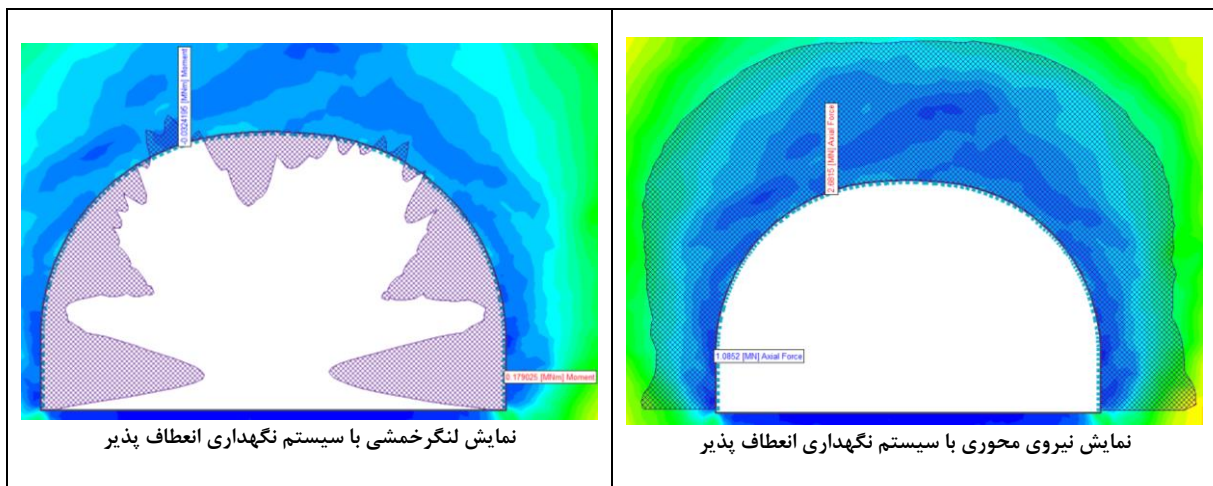
۵- تحلیل عددی تونل پونه در زون فشارنده (با سیستم نگهدارنده انعطاف پذیر)

پیشرفت‌های زیادی در ارتباط با به کارگیری المان‌های انعطاف‌پذیر در تونل‌ها به عنوان سازه نگهدارنده انجام پذیرفته است. این روش‌ها که با کنترل و ترخیص تنش همراه است. در ادامه براساس این متد به تحلیل و بررسی سازه نگهدارنده پرداخته شده است. همان‌طور که در شکل زیر مشخص است، می‌توان در نقاط نمایش داده شده المان انعطاف‌پذیر یا سازه نگهدارنده کنترل تنش استفاده کرد. انتخاب بسته به شرایط اجرا و تجربه پیمانکار دارد (شکل ۵-۱).



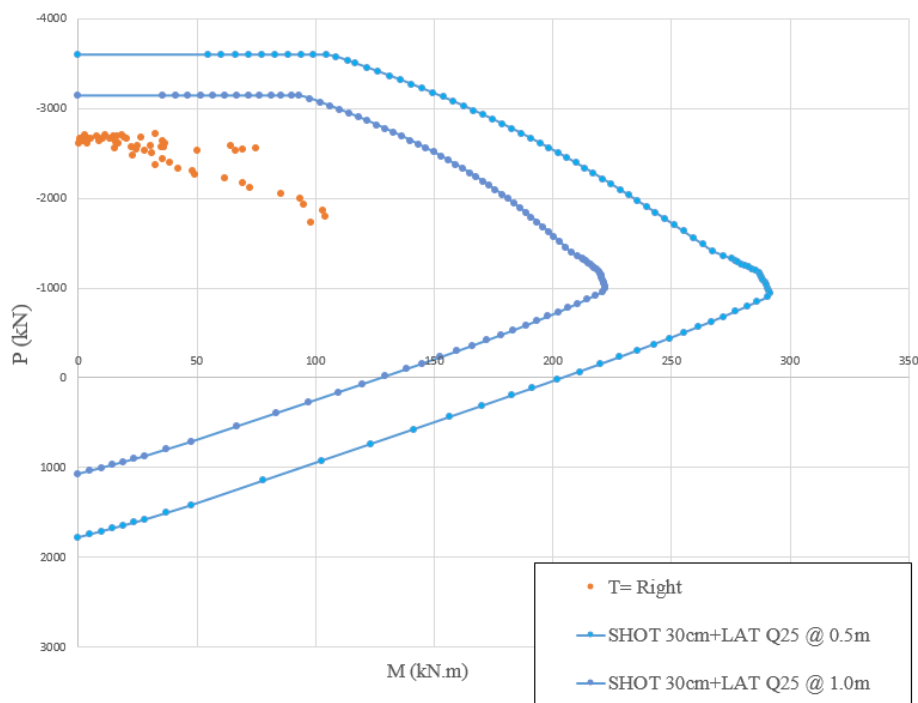
شکل ۵-۱ نمایش سیستم انعطاف پذیر در تونل

پس از اعمال سیستم نگهداری انعطاف پذیر، نگهداری تونل در این زون‌ها، متحمل نیروهای کمتری شده است. این امر به خاطر کنترل پدیده‌ی فشارندگی در تونل از طریق کنترل تنش می‌باشد. در واقع ترخیص تنش مناسب سبب باز توزیع و کاهش تنشها پیرامون تونل شده است. در ادامه براساس نیروهای شکل یافته در تحلیل سازه نگهدارنده، به طراحی سازه نگهدارنده آن پرداخته شده است. همان‌طور که در نتایج مشخص است سازه نگهدارنده می‌تواند با روش تنش کنترل از پایداری برخوردار باشد (شکل ۵-۲).



نمایش لنگر خمشی با سیستم نگهداری انعطاف پذیر

نمایش نیروی محوری با سیستم نگهداری انعطاف پذیر



شکل ۵-۲ نمایش نیروهای تشکیل شده در پوش ظرفیت سازه نگهداری انعطاف پذیر تونل

۶- نتیجه گیری

محدوده های T1 و T2 تونل پونه براساس رابطه سینگ (۱۹۹۲) در محدوده فشارنده واقع شده، براساس رابطه گوئل (۱۹۹۴) در محدوده کم و متوسط زون فشارنده واقع شده، براساس رابطه باسین (۱۹۹۶) در محدوده زون فشارنده واقع شده و همچنین براساس رابطه گرمستاد (۱۹۹۸) در محدوده متوسط و سنگین زون فشارنده واقع شده است.

یکی از روش های مرسوم در کشور در مواجهه با مناطق فشارنده در تونل ها، استفاده از روش فورپولینگ به منظور کنترل جابجایی ها و افزایش پارامترهای مقاومتی توده سنگ می باشد. این امر سبب افزایش زمان پروژه و همچنین هزینه های اجرای تونل خواهد شد. در این مقاله به منظور بهینه سازی زمان و هزینه پروژه (مهندسی ارزش) روش سازه نگهداری انعطاف پذیر معرفی و تحلیل شده است. در این صورت:

الف: از سازه نگهداری سبک تر استفاده می شود و در نتیجه هزینه های نهایی سازه نگهداری تونل کاهش پیدا خواهد کرد.

ب: فاصله لیس ها افزایش پیدا کرده که در نهایت سرعت اجرای تونل زیاد خواهد شد.

ج: هزینه های عملیات فورپولینگ حذف خواهد شد.

د: این روش سبب ترخیص تنش اضافه در تونل خواهد شد که این امر موجب افزایش ایمنی در تونل خواهد شد.

۷- تشکر

نگارندگان این پژوهش بر خود لازم می دانند، از جناب پروفسور اورت هوک (Evert Hoek) به دلیل راهنمایی های مفید و صبوری بسیار جهت کنترل نتایج این پژوهش، تشکر نمایند.

۸- مراجع

- [۱] سازمان زمین شناسی کشور ، (۱۳۹۲-۱۳۹۱)، " نقشه های زمین شناسی محدوده اراک-خرم آباد "
- [۲] شرکت مهندسی مشاور طاهّا ، (۱۳۹۲)، گزارش مرحله دوم "گزارش زمین شناسی مهندسی تونل های دوقلو پونه "
- [۳] شرکت مهندسی مشاور طاهّا ، (۱۳۹۳-۱۳۹۲)، گزارش تکمیلی مرحله دوم " گزارش تحلیل پایداری تونل های دوقلو پونه "
- [۴] شرکت مهندسی مشاور طاهّا ، (۱۳۹۱)، "گزارش عملیات ژئوتکنیکی صحرایی و آزمایشگاهی تونل های دوقلو پونه "

[۵]Amberg, F., "Gotthard base tunnel, TBM heading equipment Progress in Tunneling After 2000", AITESITA, World Tunnel Congress, Milano, June 10-13, 2001.

[۶] FHWA/RD-82/047. , "Technical Manual for Design and Construction of Road Tunnels Civil Elements", 2010.

[۷] Hoek, E and Guevara, R. "Overcoming squeezing in the Yacambú-Quibor tunnel, Venezuela". Rock Mechanics and Rock Engineering, Vol. 42, No. 2, 389 – 418, 2009.

[۸] Hoek, E, "BIG TUNNELS IN BAD ROCK 2000 TERZAGHI LECTURE" ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering Vol. 127, No. 9, pages 726-740, September 2001.

[۹] Leca, E., and New, B. "Settlements induced by tunneling in soft ground" Tunnelling and Underground Space Technology, 22(2),pp. 119-149, 2007

[۱۰] Phase.2D, "User's Guide Rockscience", www. Rocscience. Com, 2012.

[۱۱] ROCLAB, "User's Guide Rockscience", www. Rocscience.Com, 2005.