

مدلسازی عددی سیستم لوله‌گذاری سقفی جهت پیش‌تحکیم تونل (مطالعه موردی تونل طالقان)

سید امین موسوی^{۱*}؛ بهنام کشاورز^۲؛ میررئوف هادئی^۲

۱- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه ولی‌عصر (عج) رفسنجان، رفسنجان، ایران.
۲- گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه بین‌المللی امام خمینی (ع)، قزوین، ایران.

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۱۶؛ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۳/۲۴

(*نویسنده مسئول: aminmoosavi@vru.ac.ir)

چکیده

حفاری تونل باعث تولید بازتوزیع تنش در سنگ‌های پیرامون تونل می‌شود. این عمل سبب میل به همگرایی در جداره تونل می‌شود. بسته به ویژگی‌های زمین، همگرایی ممکن است باعث کاهش سطح مقطع حفاری و یا فروپاشی تاج و سینه کار تونل گردد. برای جلوگیری از ریزش لازم است توده سنگ و خاک سینه کار تقویت شود. قوس چتری یکی از سیستم‌های پیش‌تحکیمی است که قبل از حفاری در بالای تونل به شکل قوسی اجرا می‌گردد. درک صحیح از نحوه عملکرد قوس چتری نیازمند محاسبات پیچیده‌ای است که این محاسبات با روش‌های مدلسازی عددی امکان پذیر می‌شود. در این مطالعه به بررسی چگونگی عملکرد روش چتری و تاثیر آن در تونل راه طالقان-هشتگرد پرداخته شده است. قسمتی از مقطع این تونل به دلیل قرار گرفتن در مصالح سست و ریزشی (شیل) دارای پتانسیل ریزش بالایی است. بدین منظور تونل با پیش‌نگهداری چتری به روش عددی توسط نرم افزار FLAC 3D مدلسازی شده است. در این مطالعه علاوه بر بررسی ضرورت استفاده از قوس چتری، اثر پارامترهای هندسی و فیزیکی از قبیل فاصله بین لوله‌ها و قطر لوله‌ها بر پایداری تونل مورد بررسی قرار گرفته است. معیار بررسی، جابجایی عمودی در تاج تونل، روابط ساکورایی و بررسی پایداری لوله‌ها است. نتایج نشان می‌دهد که افزایش قطر و کاهش فاصله اثر مثبت بر پایداری تونل می‌گذارد. همچنین روش چتری منجر به کاهش جابجایی تاج تونل به میزان ۳۶٪ شده است.

واژگان کلیدی

مدلسازی عددی، لوله‌گذاری سقفی، پیش‌تحکیم تونل

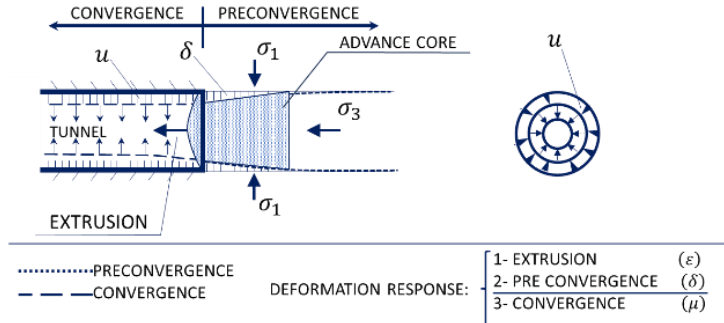
۱- مقدمه

یکی از چالش‌های مطرح در تونل‌سازی شهری جابجایی و نشست در سطح زمین است. این جابجایی به جنس زمین، عمق، قطر و روش حفاری تونل بستگی دارد. لوراندی و بیندی (۲۰۰۴) [۱] دلایل نشست

زمین در اثر حفر تونل را این‌گونه بیان کردند:
۱- در جلوی جبهه کار تونل، بیرون‌زدگی محوری یا پیش‌همگرایی محوری.
۲- در پشت جبهه کار تونل، همگرایی محوری (شکل ۱).
در جدول ۱ نحوه کمینه‌سازی^۱ نشست و همگرایی در انواع

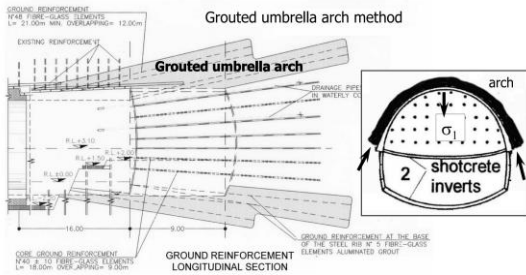
^۱ Minimisation

روش تونل‌سازی بیان شده است.



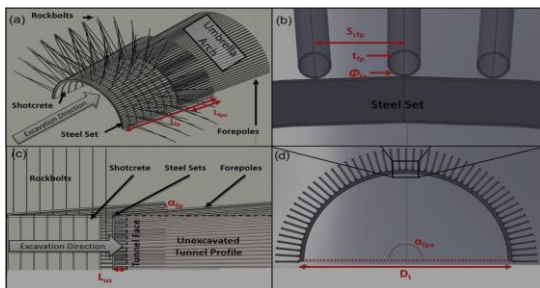
شکل ۱- عوامل موثر در نشست سطح زمین [۱].

ب- ایجاد یک قوس بهبود یافته در بالای تاج تونل: برای این منظور از قوس چتری دوغابی استفاده می‌شود که جنس دوغاب بتن است. این قوس چتری باعث کاهش تنش σ_1 می‌شود (شکل ۳). همچنین استفاده از این قوس چتری باعث عدم تمرکز تنش در بالای جبهه کار می‌گردد.

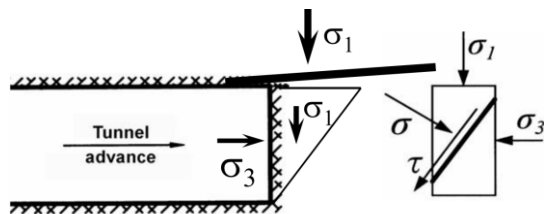


شکل ۳- نمایی از قوس چتری بالای تونل (دید از بالا) [۱].

به منظور طراحی مناسب سیستم قوس چتری اوک و همکاران [۲] بیان داشتند که پارامترهای فاصله داری مرکز به مرکز، قطر خارجی لوله‌ها، ضخامت لوله‌ها، طول لوله‌ها در این طراحی تاثیر گذار هستند. این پارامترها در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴- نمایی از سیستم لوله‌گذاری سقفی (قوس چتری) و پارامترهای موثر [۲].



شکل ۲- نحوه و محل تنش های اعمالی به جبهه کار تونل زمین [۱].

جدول ۱- روش‌های کمینه‌سازی همگرایی در اثر حفر تونل.

روش تونل‌سازی	کمینه‌سازی پیش‌همگرایی	کمینه‌سازی همگرایی	کنترل ضخامت و نگهداری دوغاب‌زده شده
TBM	نگهداری متناسب جبهه کار	کنترل ضخامت و نگهداری و فضای کار	استفاده از نگهداری سخت قبل از بسته شدن رینگ تونل
SCL NATM (روش اصلاح شده)	حفاری چند مرحله‌ای پیش‌تحکیمی جبهه کار	حفاری چند مرحله‌ای	استفاده از نگهداری سخت قبل از بسته شدن رینگ تونل

برای کنترل پیش‌همگرایی به وسیله پیش‌تحکیمی جبهه کار تونل، با کاهش میزان σ_1 جلوی جبهه کار می‌توان پیش‌همگرایی را کنترل کرد. برای این منظور به طور مرسوم از روش‌های زیر استفاده می‌شود:

الف- روش لوله‌گذاری سقفی: در این روش، هر لوله به صورت مستقل در امتداد طولی عمل می‌کند (در خم شدن). حفاری در تونل σ_3 را به صفر کاهش می‌دهد که این وضعیت تنش باعث عدم تعادل و ایجاد ناپایداری در جبهه کار می‌شود. در واقع فورپولینگ در نقش یک شمع مقاوم و سخت برای کاهش تنش عمده عمودی σ_1 بالای جبهه کار عمل می‌کند (شکل ۲).

در نتیجه با توجه به جدول ۲، از میان پارامترهای بیان شده، پارامترهای فاصله‌داری مرکز به مرکز، قطر خارجی لوله و طول همپوشانی امکان ارزیابی با روش عددی را دارند.

همچنین اوک و همکاران امکان محاسبه و اندازه‌گیری پارامترها را نیز بررسی کردند. این بررسی به صورت جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲- فرایند بررسی پارامترهای طراحی [۲].

پارامترهای طراحی	فرایند انتخاب
فاصله داری مرکز به مرکز (SCFP)	ارزیابی با روش عددی
طول المان فورپول (l_{FP})	انتخاب تجهیزات و شرایط زمین
اندازه کلی سیستم	تجهیزات و اندازه‌های معمول
زاویه نصب (α_{FP})	تجهیزات و محدوده سیستم‌های نگهدارنده
زاویه پوششی (α_{Fpa})	ارزیابی تجربی
طول همپوشانی (l_{fpo})	ارزیابی با روش عددی
قطر خارجی المان فورپول (ϕ_{FP})	ارزیابی با روش عددی

۴- پایپ جکینگ^۷

۳- روش‌های مدلسازی عددی قوس چتری

محققان زیادی بر روی چگونگی مدلسازی عددی روش چتری بحث و بررسی کرده‌اند. جونجا و همکاران [۴] تأثیر استفاده از فورپولینگ بر پایداری جبهه کار تونل و طول قسمت بدون مهاربندی را در حفاری تونل درون خاک‌های رسی، را با استفاده از مدلسازی فیزیکی در محیط سانتریفیوژ مورد مطالعه قرار داده‌اند. کاواداس و همکاران [۵] تأثیر استفاده از میله‌های فایبرگلاس و چترهای فورپولینگ را بر پایداری جبهه کار تونل در حفاری تونل، با انجام مجموعه بزرگی از تحلیل‌های پارامتری سه‌بعدی به روش المان محدود توسط نرم‌افزار آباکوس، مورد بررسی قرار داده‌اند. یو و همکاران [۶] با استفاده از روش المان محدود سه‌بعدی، رفتار تونل NATM (روش اتریشی حفاری تونل) را شبیه‌سازی کرده و تأثیر تحلیل‌های سه‌بعدی را در مقایسه با تحلیل‌های دوبعدی برای روشن کردن مکانیزم‌های زمین در طول ساخت تونل بررسی کرده‌اند. آن‌ها نقش فورپولینگ در پل‌زدن بین جبهه کار تونل

۲- طبقه‌بندی روش چتری

پروکتور و وایت^۲ [۳] استفاده از اسپایل‌های^۳ چوبی را به عنوان روش پیش‌تحکیمی قوس چتری در زمین‌های ضعیف و سست مورد بررسی قرار دادند. این روش با پیشرفت تونل‌سازی و عنوان شدن مفاهیم مختلفی در زمینه کاربرد سیستم‌های نگهدارنده کمکی در اطراف طاق و همچنین در سینه‌کار تونل به منظور جلوگیری از وقوع ناپایداری‌های موضعی و کلی، تکامل یافته است. برخی از روش‌های پیش‌تحکیمی با استفاده از تعریف و توضیحات واضح و روشن از یکدیگر تفکیک نشده و یا برای یک سیستم اسامی متفاوتی مورد استفاده قرار می‌گیرد. در اینجا روش‌های پیش‌تحکیمی قوس چتری بر اساس مواد مورد استفاده یا روش‌های تحکیم به چهار دسته تقسیم شده‌اند:

۱- فورپولینگ^۴

۲- پایپ روفینگ^۵

۳- تزریق با جت^۶

⁵ Pipe Roofing

⁶ Jet Grouting

⁷ Pipe Jacking

² Proctor and White

³ Spiles

⁴ Forepoling

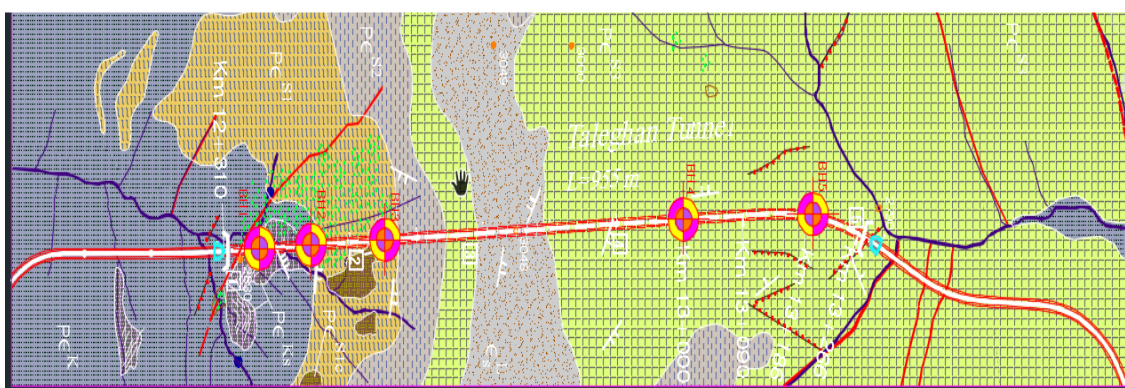
آن‌ها لوله‌ها را با المان پوسته^۸ در نرم‌افزار *FLAC3D* مدلسازی کردند. در این مقاله از روش اهوچا و استرلینگ به منظور مدلسازی سیستم لوله‌گذاری سقفی استفاده می‌شود.

۴- اطلاعات زمین‌شناسی تونل مورد مطالعه

تونل مورد مطالعه، تونل راه طالقان - هشتگرد به طول ۹۵۵ متر در حدفاصل کیلومترهای ۱۲+۳۱۰ و ۱۳+۲۶۶ مسیر است. حداکثر ارتفاع سربار در طول تونل ۲۴۵ متر مربوط به کیلومتر ۱۲+۷۰۰ و تونل دارای دهانه ۱۲/۵ متری و ارتفاع ۱۰ متر است. در شکل ۵ موقعیت تونل نمایش داده شده است. ورودی تونل با امتداد N157E آغاز می‌شود و تا حدود کیلومتر ۱۳+۰۰ به طور مستقیم ادامه می‌یابد. از حدود کیلومتر ۱۳+۰۰ تا دهانه خروجی انحرافی پیدا می‌کند و نهایتاً امتداد مسیر در دهانه خروجی در راستای N172E است.

و بخشی از تونل که شاکریت به اندازه کافی سخت شده است، قابل توجه بیان کرده‌اند.

کلوتونه و بورژوا [۷] تأثیر استفاده از فورپولینگ بر نشست‌های ناشی از حفاری تونل‌های کم‌عمق را با استفاده از شبیه‌سازیهای سه‌بعدی به روش المان محدود و با استفاده از نرم‌افزار *CESAR-LCPC* مورد بررسی قرار داده‌اند. آن‌ها نشان داده‌اند که تأثیر فورپولینگ بر کاهش نشست در محدوده پارامترهای مورد مطالعه نسبتاً متوسط بوده و نشان دادند که انجام تحلیل‌های عددی با هندسه ساده‌شده نیز وجود دارد. هفنی و همکاران [۸] به دو روش قوس چتری را مدلسازی کردند. در روش اول که این محققان آن را روش سنتی نامیدند، لوله‌ها و دوغاب به صورت مواد ترکیبی در مدلسازی استفاده شدند؛ در روش جدید لوله‌ها را به صورت مجزا مدلسازی کردند. اهوچا و استرلینگ [۹] برای مدل‌سازی از نرم‌افزار *FLAC3D* استفاده کردند. آن‌ها لوله‌ها، دوغاب و منطقه تحکیم را به صورت مجزا مدلسازی کردند. همچنین

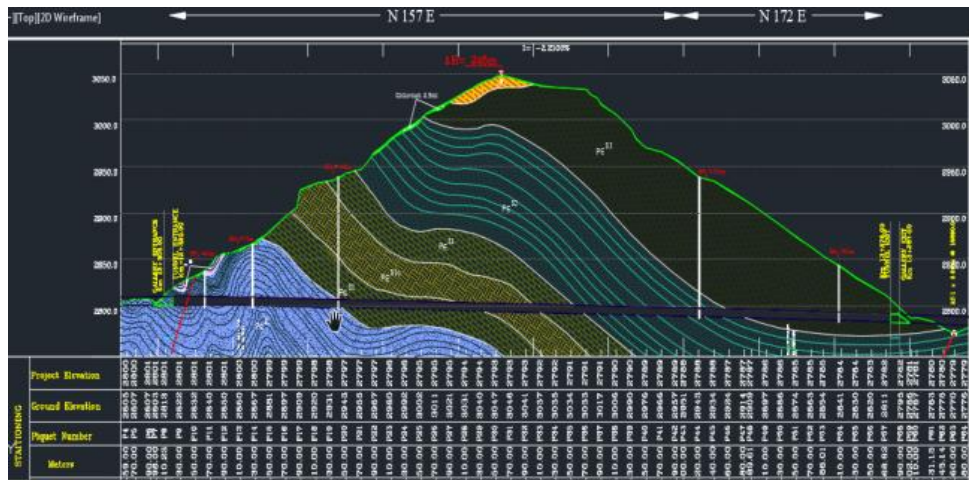


شکل ۵- موقعیت تونل راه طالقان-هشتگرد [۱۰].

با توجه به مقاومت کم خاک و سنگ، امکان حفر تونل بدون پیش‌تحکیمی مناسب وجود نخواهد داشت. لذا در این زون از روش قوس چتری با استفاده از سیستم لوله‌گذاری سقفی اقدام به پیش‌تحکیمی بالای جبهه کار می‌شود [۱۰].

در شکل ۶ پروفیل طولی به همراه جنس سنگ‌های در برگیرنده آن نمایش داده شده است. همان‌طور که در شکل پیداست، تونل از کیلومتر ۱۲+۳۰۸ (ورودی تونل) تا ۱۲+۵۵۸ (۲۵۰ متر) از میان رسوبات شیلی عبور می‌کند و مابقی طول تونل از میان رسوبات دولومیتی خواهد گذشت. در زون شیلی

⁸ Sell Element



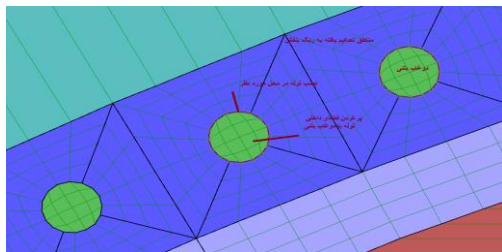
شکل ۶- پروفیل طولی تونل راه طالقان-هشتگرد [۱۰].

۵- روند مدل‌سازی

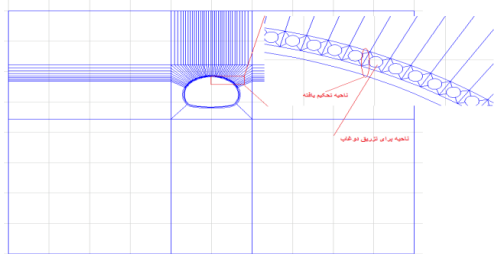
مدلسازی تونل مورد نظر به دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی توسط نرم افزار ITASCA/FLAC انجام شده است. در حالت دوبعدی مدل به طول ۱۰۰ متر و عرض ۸۰ متر ساخته شده است. تونل مفروض به شکل نعل اسبی با عرض ۱۲/۵ متر، ارتفاع ۱۰ متر و روبراه ۲۵ متر است. همچنین در حالت سه‌بعدی پهنای مدل ۱۰ متر فرض شده است. شکل ۷ نمایی از هندسه مدل را در دو حالت دوبعدی و سه‌بعدی نشان می‌دهد. در این مدل‌سازی اجزای تشکیل‌دهنده سیستم چتری به صورت مجزا مدل‌سازی شده‌اند. به منظور استفاده از سیستم لوله‌گذاری سقفی ابتدا باید از عدم پایداری تونل بدون استفاده از سیستم پیش‌تحکیمی اطمینان حاصل کرد، لذا در مدل دوبعدی اقدام به حفاری سقف تونل کرده و میزان جابجایی تاج طاق تونل با معیار خطر ساکورایی مقایسه شده است. جدول ۳ پارامترهای ژئومکانیکی سنگ و اجزای سیستم لوله‌گذاری سقفی را نشان می‌دهد.

جدول ۳- پارامترهای ژئومکانیکی سنگ و اجزای سیستم چتری.

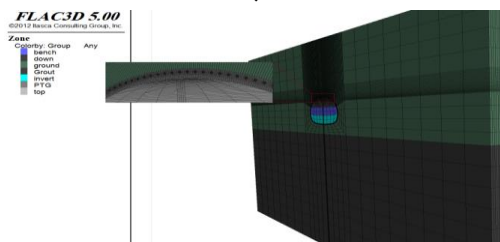
منطقه	دانسیته، ($\frac{kg}{m^3}$)	پارامترهای معیار موهر کولمب C (kPa)	ϕ ($^{\circ}$)	مدول الاستیک، پواسون، ν	ضریب
سنگ [۱۰]	۲۰۰۰	۲۲	۵۰	۰/۱۲	۰/۲۵
دوغاب بتنی [۸]	۱۹۰۰	۳۷	۵۰۰۰	۷	۰/۱۷
منطقه پیش‌تحکیم یافته [۸]	۲۰۵۰	۲۷/۵	۲۲۵	۱	۰/۲۵



(الف)



(ب)



(ج)

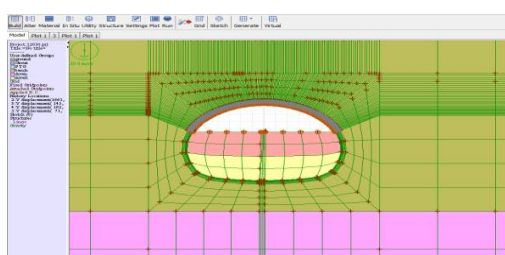
شکل ۷- نمایی از هندسه مدل در دو حالت دوبعدی (الف و ب) و سه‌بعدی (ج).

جامعه تونل‌سازی بریتانیا (۲۰۰۴) یک معیار عددی به کمک

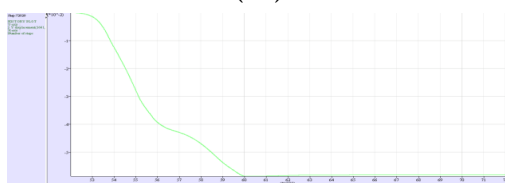
در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- جابجایی‌های بحرانی و سطوح تراز هشدار ساکورایی.

سطح تراز هشدار	جابجایی بحرانی (cm)
I	۸/۸
II	۳/۸۵
III	۱/۶۳



(الف)



(ب)

شکل ۸- جابجایی تاج تونل بعد از حفاری قسمت طاق (الف)، نمودار جابجایی عمودی تاج تونل (ب).

در شکل ۸ (الف) جابجایی تاج تونل بعد از حفاری قسمت طاق در حالت دوبعدی نشان داده شده است. میزان جابجایی تاج تونل ۵/۹ سانتی‌متر است و همچنین مقدار جابجایی مجاز در تراز دوم خطر ساکورایی با توجه به جدول ۴، ۳/۸۵ سانتی‌متر است. در نتیجه، استفاده از سیستم لوله‌گذاری سقفی برای این تونل الزامی است. برای مدلسازی سیستم چتری از حالت سه‌بعدی استفاده می‌شود. زاویه لوله‌ها از افق صفر درجه در نظر گرفته شده است. اجزای تشکیل دهنده لوله سقفی در حالت سه‌بعدی در شکل ۹ نشان داده شده است.

مراحل حفاری در تونل طالقان در حالت سه‌بعدی مطابق

جدول ۵ می‌باشد. در این تونل به منظور نگهداری اولیه از سیستم شاتکریت استفاده شده است.

در این مدلسازی برای شبیه‌سازی شاتکریت از المان پوسته استفاده شده است. در

همچنین در این مدلسازی به منظور مدلسازی لوله‌ها از المان

کرنش بحرانی برای طراحی نگهداری پایدار تونل ارائه نمود. این تکنیک بر پایه تست تک‌محوری فشاری سنگ به وسیله ساکورایی^۹ [۱۱] توسعه یافت.

ساکورایی با ارتباط دادن داده‌های صحرایی و نتایج آزمایشگاهی، رابطه بین کرنش بحرانی و مقاومت فشاری و مدول الاستیسیته را به دست آورد [۱۱].

ساکورایی پیشنهاد کرد که می‌توان پایداری تونل‌ها را بر اساس کرنش به وقوع پیوسته در توده سنگ اطراف آن‌ها ارزیابی کرد. با توجه به اینکه کرنش بحرانی همواره از کرنش گسیختگی کمتر است. ساکورایی روابط زیر را برای محاسبه کرنش بحرانی ارائه نمود.

$$\varepsilon_c = \frac{\sigma_c}{E} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 0.85 & \text{I} \\ \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.22 & \text{II} \\ \log \varepsilon_c = -0.25 \log E - 1.59 & \text{III} \end{cases} \quad (2)$$

روابط I و II و III به ترتیب ترازهای هشدار خطر هستند. در روابط فوق E مدول الاستیک برحسب کیلوگرم نیرو بر سانتی‌متر مربع و ε_c کرنش بحرانی بر حسب درصد می‌باشند. ترازهای هشدار خطر به صورت زیر بیان و تعریف شده‌اند: تراز هشدار خطر I: پایداری بلند مدت تونل را نشان می‌دهد. تراز هشدار خطر II: به عنوان مبنای طراحی سیستم نگهداری تونل‌های مهندسی پیشنهاد شده است.

تراز هشدار خطر III: پایداری کوتاه مدت تونل را بیان می‌کند. همچنین جابجایی مجاز توسط رابطه‌ی زیر مشخص می‌شود. در این رابطه U_c جابجایی مجاز در سقف تونل و a شعاع تونل هم‌واحد با جابجایی مجاز است.

$$U_c = \varepsilon_c \times a \quad (3)$$

که در این روابط، ε_c کرنش بحرانی، U_c جابجایی بحرانی و a شعاع تونل است. مقدار شعاع تونل با توجه به مساحت آن به صورت معادل ۳/۶ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به روابط بالا مقادیر کرنش برشی بحرانی و جابجایی مجاز تونل

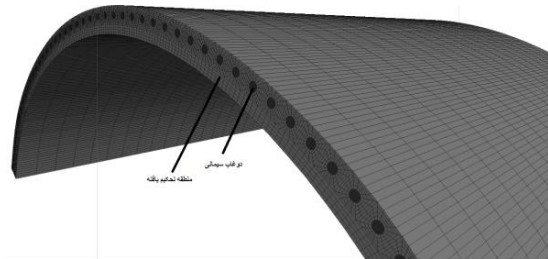
جدول ۵ می‌باشد. در این تونل به منظور نگهداری اولیه از سیستم شاتکریت استفاده شده است. در این مدلسازی برای شبیه‌سازی شاتکریت از المان پوسته استفاده شده است. در جدول ۶ مشخصات مکانیکی شاتکریت نشان داده شده است.

⁹ Sakurai

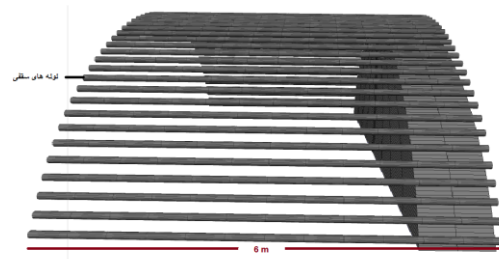
سازه‌ای لاینر استفاده شده است. در

این خصوصیات و مقادیر پارامتری آن‌ها در جدول ۸ گنجانده شده است. قطر خارجی لوله‌ها ۷۶، ۱۰۱ و ۱۲۰ میلی‌متر و فاصله‌داری مرکز به مرکز ۳۰، ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر در نظر گرفته شده است. برای این مدل‌سازی ۵ مدل مجزا ساخته شده است.

جدول ۷ پارامترهای مکانیکی و مقاومتی لوله‌ها ارائه شده است. همچنین المان سازه‌ای لاینر در دو طرف خود با زون‌های ساخته شده در مدل اندرکنش دارد. برای مدلسازی لوله‌ها باید خصوصیات این فصل مشترک در مدل لحاظ شود.



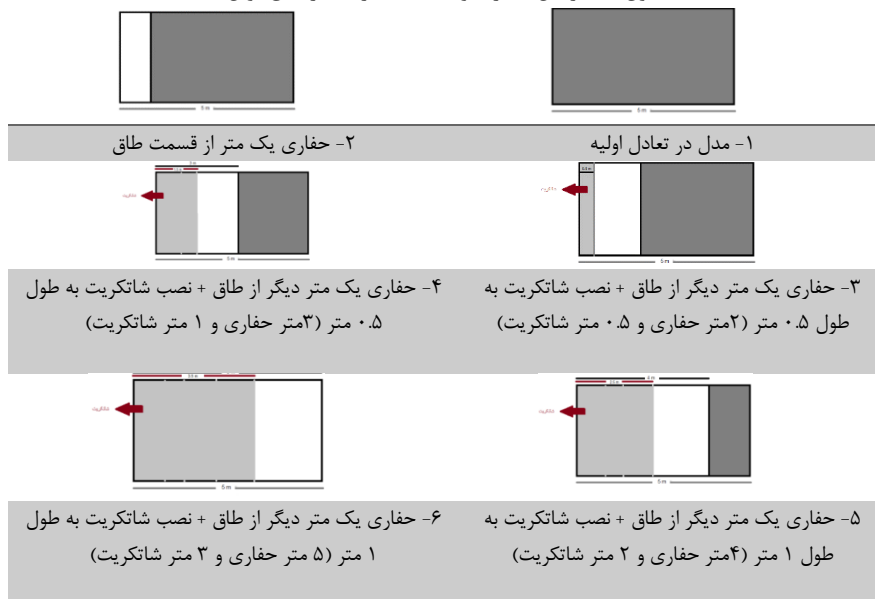
(ب)



(الف)

شکل ۹- نمایی از اجزای تشکیل‌دهنده سیستم لوله‌گذاری سقفی لوله‌ها (الف)، دوغاب و منطقه تحکیم (ب).

جدول ۵- مراحل حفاری و نصب شاتکریت در طاق تونل.



جدول ۶- مشخصات مکانیکی اجزا سیستم نگهداری [۱۲].

سیستم نگهداری	γ	t	E_m	ν
شاتکریت	۲۵۰۰	۰.۳	۲۰	۰.۲۵

جدول ۷- مشخصات مقاومتی لوله‌ها (علامت ستاره لوله‌های مورد استفاده در این مدل‌سازی هستند [۱۳].)

سیستم	E_m	γ	D_o	t	γ	L
*AT-76			۱/۷۶			
*AT-89			۱۰/۱۲	۶		
AT-114	۲۱۰	۳۵۵	۱۱۱		۷۸۶۰۰	۳
*AT-139			۱۲۰/۳	۸		
AT-168			۱۶۸/۰	۱۲/۵		۲

جدول ۸- مقادیر عددی اختصاص یافته به فصل مشترک لوله با زون دوغاب و منطقه تحکیم [۲].

فصل مشترک	Φ_{fp}	c_s	Φ_s	k_s	c_n	k_n
لوله دوغاب	۷۶	۲۳۸۶/۴			۲۳۸۶/۴	
	۱۰۱	۳۱۷۱/۴	۳۷		۳۱۷۱/۴	
	۱۲۰	۳۷۶۸		۱۰۱۱	۳۷۶۸	۱۰۱۲
لوله منطقه تحکیم	۷۶	۱۰۷/۳۸۸	۲۷/۵		۱۰۷/۳۸۸	
	۱۰۱	۱۴۲/۷۱۳			۱۴۲/۷۱۳	
	۱۲۰	۱۶۹/۵۶			۱۶۹/۵۶	

۶- نتایج حاصل از مدل‌سازی در حالت

سه بعدی

به منظور بررسی پایداری تاج تونل از مدل‌سازی سه بعدی نیز استفاده شده است. قسمت طاق تونل مطابق مقایسه‌ای بین میزان جابجایی عمودی تاج تونل بعد از ۵ متر حفاری را نشان می‌دهد (فاصله لوله‌ها از هم ۳۰ سانتی‌متر است). با تغییر قطر لوله‌ها از ۷۶ میلی‌متر به ۱۲۰ میلی‌متر، میزان جابجایی در تاج تونل در سینه کار ۱۲/۳۴٪ کاهش داشته است.

در این نمودار نشان داده شده است که با افزایش قطر جابجایی کاهش یافته است. کمینه جابجایی در تاج تونل مربوط به لوله با قطر ۱۲۰ میلی‌متر نشان داده شده است. این قطر لوله به صورت مفروض برای بقیه قسمت‌های بعدی لحاظ گردیده است.

۶-۲- مقایسه تاثیر عملکرد فاصله‌داری مرکز به مرکز لوله‌ها بر جابجایی عمودی تاج تونل

فاصله‌داری لوله‌ها ۳۰ و ۴۰ و ۵۰ سانتی‌متر فرض شده است. با توجه به شکل ۱۳ مشخص می‌شود که با افزایش فاصله‌داری مرکز به مرکز لوله‌ها از ۳۰ سانتی‌متر به ۵۰ سانتی‌متر، میزان جابجایی قائم تاج تونل در سینه کار ۱۴٪ افزایش می‌یابد. در نتیجه کمینه جابجایی در تاج

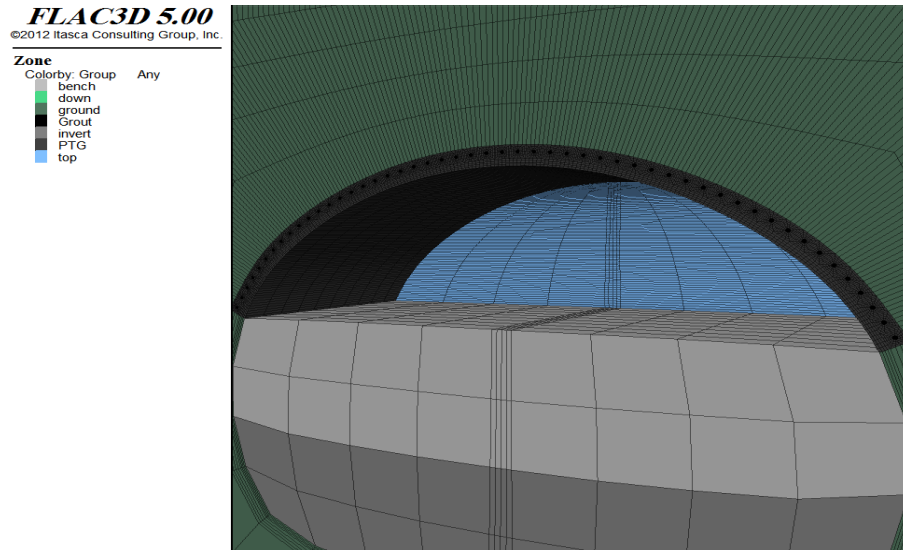
جدول ۵، پنج متر حفاری شده است. در این مدل قطر لوله ۷۶ میلی‌متر و فاصله مرکز به مرکز ۳۰ سانتی‌متر است. در شکل ۱۰(الف) این پنج متر حفاری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۰(ب) کانتور جابجایی عمودی تاج تونل نشان داده شده است که با توجه به جدول سطوح تراز خطر ساکورایی تونل در حالت پایدار قرار دارد.

به منظور مقایسه جابجایی رخ داده در تاج تونل و عملکرد سیستم لوله‌گذاری سقفی در شکل ۱۱ مقایسه‌ای بین جابجایی تاج تونل بعد از نصب سیستم پیش‌نگهداری و بدون استفاده از این سیستم نشان داده شده است. می‌توان مشاهده کرد که جابجایی تاج تونل در سینه کار تونل بعد از ۵ متر حفاری در طاق به میزان ۴۲٪ کاهش یافته است.

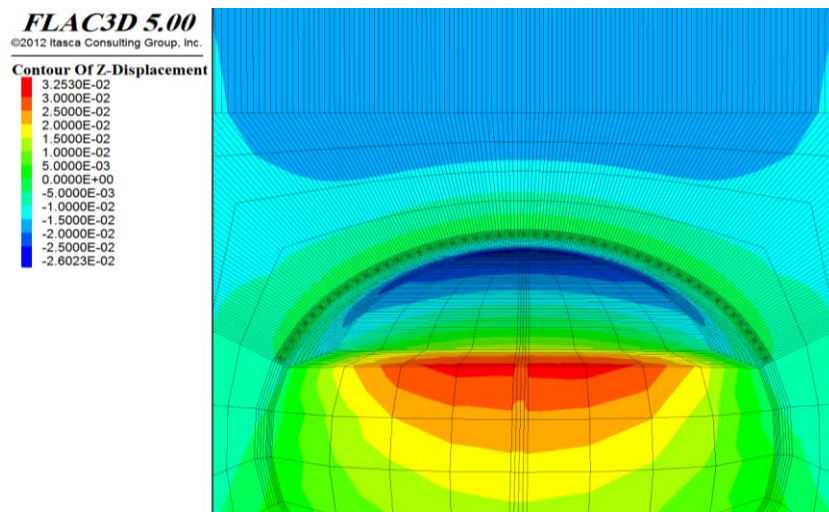
۶-۱- مقایسه تاثیر عملکرد تغییر قطر خارجی لوله‌ها بر جابجایی عمودی تاج تونل

مدل‌سازی تونل با استفاده از لوله‌ها با قطرهای ۷۶، ۱۰۱ و ۱۲۰ میلی‌متر در حالت سه بعدی انجام شده است. شکل ۱۲

تونل مربوط به فاصله‌داری مرکز به مرکز ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد. لوله مفروض و مطلوب در این تحقیق لوله با قطر خارجی ۱۲۰ میلی‌متر بوده و فاصله‌داری مطلوب لوله‌ها از هم ۳۰ سانتی‌متر می‌باشد.



(الف)



(ب)

شکل ۱۰- جابجایی عمودی در تونل بعد از حفر قسمت طاق (الف)، کانتور جابجایی قائم بعد از حفر طاق (ب).

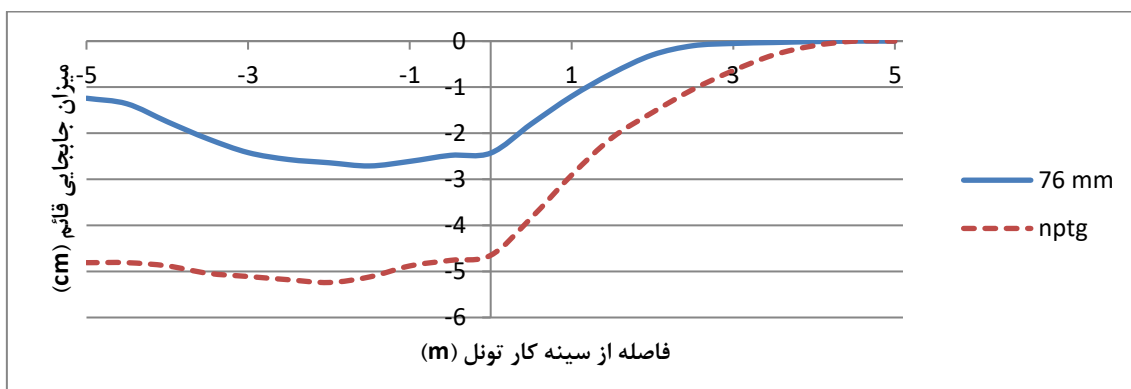
نزدیکی سینه کار و ماکزیمم لنگر خمشی در نزدیکی جبهه کار رخ می‌دهد.

در شکل ۱۴ توزیع ماکزیمم لنگر خمشی لوله‌ها بعد از ۵ متر حفاری در قسمت طاق تونل نمایش داده شده است.

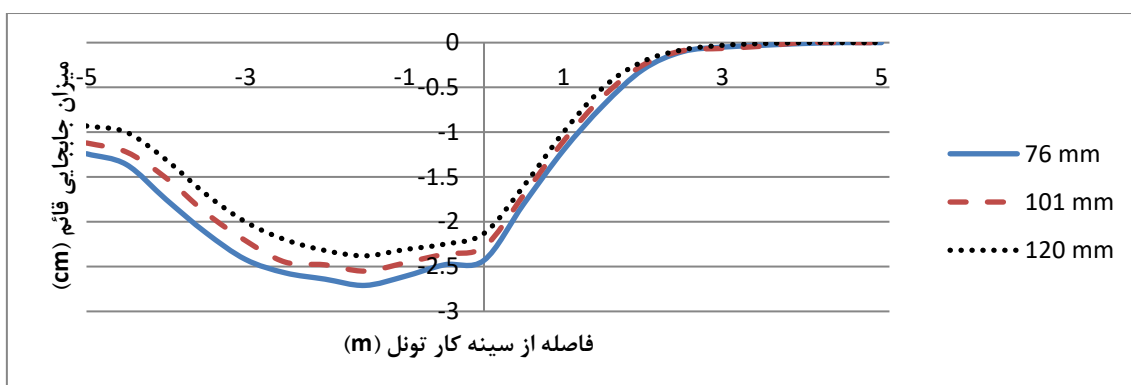
۳-۶- بررسی اجزا تشکیل‌دهنده سیستم لوله‌گذاری سقفی

۱-۳-۶- بررسی پایداری لوله‌های تشکیل‌دهنده سیستم لوله‌گذاری سقفی

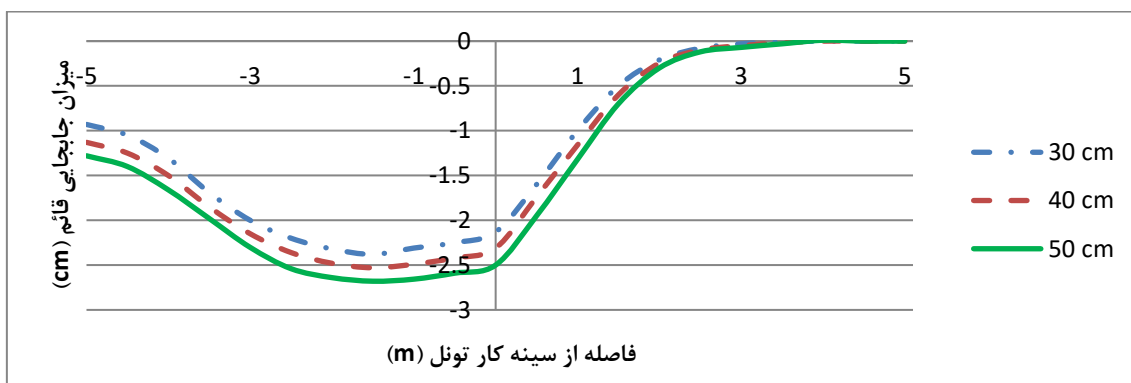
با تداوم حفاری، تغییر شکل‌ها و نیروهای وارده بر لوله‌ها تغییر می‌کند، معمولاً ماکزیمم مقدار جابجایی در



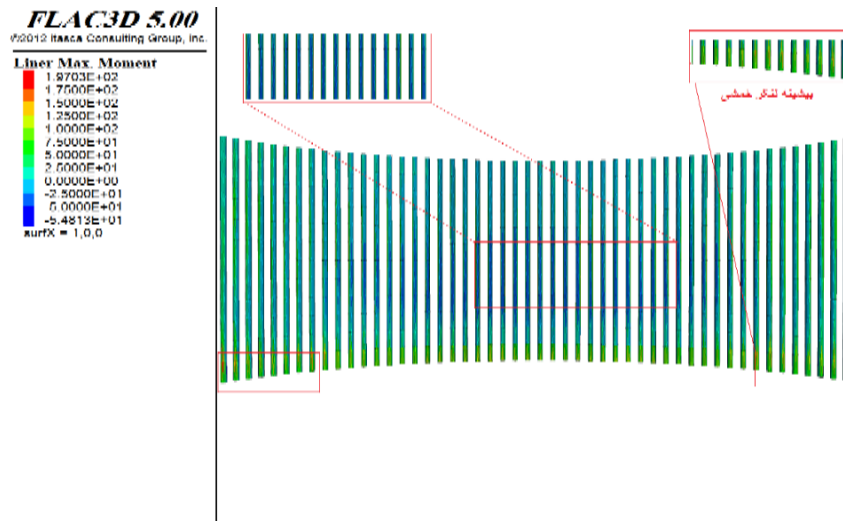
شکل ۱۱- پروفیل طولی جابجایی عمودی تاج تونل بعد از ۵ متر حفاری (nptg تونل بدون استفاده از سیستم تحکیمی است).



شکل ۱۲- مقایسه جابجایی قائم تاج تونل در صورت استفاده از لوله‌های با قطر متغیر.



شکل ۱۳- مقایسه جابجایی قائم تاج تونل در صورت استفاده از لوله‌ها با فاصله داری مرکز به مرکز متغیر.



شکل ۱۴- توزیع ماکزیمم لنگر خمشی در لوله‌ها.

سطح مقطع لوله است. مقدار ممان (M) بیشینه برابر $197N.m$ است. در نتیجه مقدار σ_m برابر $3/37 MPa$ خواهد بود. با مقایسه این مقدار با تنش تسلیم فولاد (۷)، لوله‌ها در حالت پایدار و بدون تسلیم‌پذیری هستند. این مقدار در مقایسه با مقاومت تسلیم فولاد

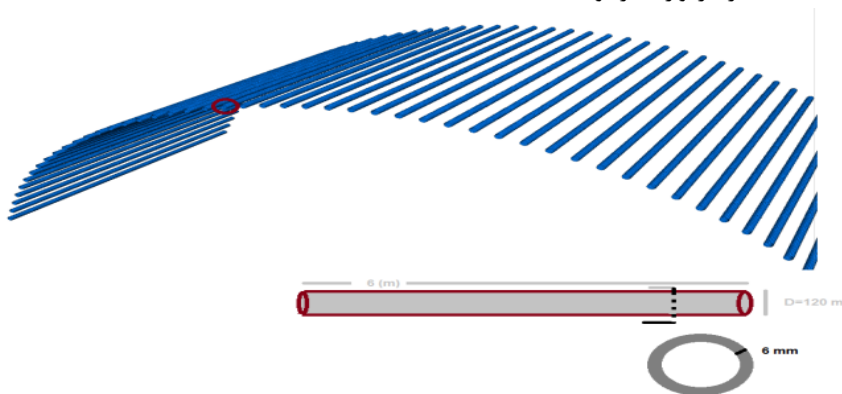
دو‌غاب بتنی منتقل شده است.

رابطه ۴ تنش ماکزیمم در لوله‌ها را نشان می‌دهد. بیشینه لنگر خمشی در بالاترین لوله که در تاج تونل واقع شده اعمال می‌شود (شکل ۱۵).

$$\sigma_m = \frac{Mc}{I} \quad (4)$$

در این رابطه M معرف ممان، c شعاع لوله و I ممان اینرسی

جدول (۷)، بسیار ناچیز است. این مقدار کم لنگر خمشی در لوله به دلیل آن است که بیشتر بار وارده بر لوله به قسمت

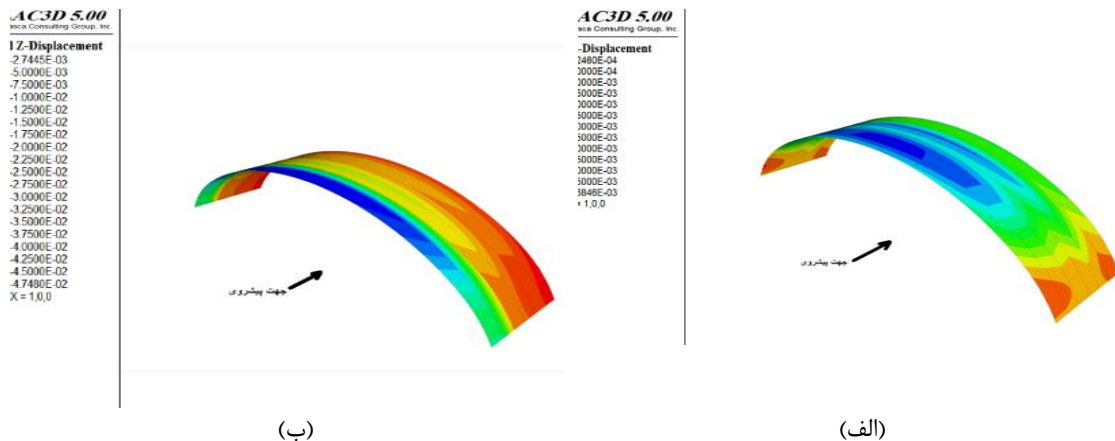


شکل ۱۵- بزرگ‌نمایی لوله قرار گرفته شده بالای تاج تونل.

عمودی شاتکریت، بعد از ۵ متر حفاری در قسمت طاق تونل با استفاده از قوس چتری نشان داده شده است.

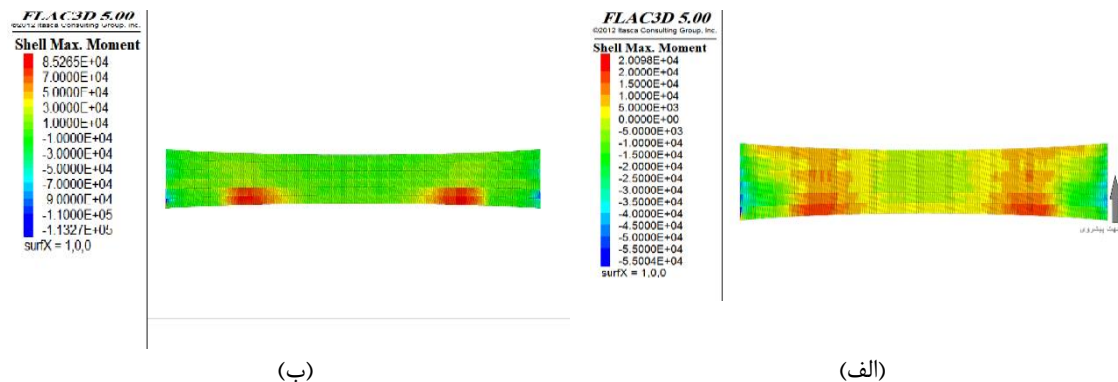
۲-۳-۶- بررسی سیستم نگهداری اولیه

در شکل ۱۶(الف)، جابجایی عمودی شاتکریت بعد از ۵ متر حفاری در قسمت طاق تونل بدون استفاده از قوس چتری نشان داده شده است. همچنین در شکل ۱۶(ب) نیز جابجایی



شکل ۱۶- جابجایی عمودی شاتکریت بعد از پنج متر حفاری قسمت طاق تونل. (الف) با استفاده از سیستم قوس چتری. (ب) بدون استفاده از سیستم قوس چتری.

بیشینه لنگر خمشی در سیستم نگهداری اولیه تونل برای دو حالت استفاده از سیستم قوس چتری و عدم استفاده از این روش پیش‌تحکیمی در شکل ۱۷ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۱۶، جابجایی عمودی سیستم نگهداری اولیه



شکل ۱۷- بیشینه لنگر خمشی وارده بر سیستم نگهداری اولیه برای تونل با قوس چتری (الف) و تونل بدون قوس چتری (ب).

جابجایی تاج تونل و سطح زمین و سطوح خطر ساکورایی، استفاده از روش قوس چتری در تامین پایداری تونل کارآمد ارزیابی شده است.

۲- در تونل راه طالقان استفاده از سیستم قوس چتری به میزان ۳۶٪ از جابجایی تاج تونل نسبت به حالتی که تنها از شاتکریت استفاده شده، می‌کاهد.

۳- سیستم چتری پیشنهادی برای تونل راه طالقان، لوله‌هایی با قطر ۱۲۰ میلی‌متر و ضخامت ۶ میلی‌متر فاصله داری مرکز به مرکز ۳۰ سانتی‌متر به طول ۶ متر، و هم‌پوشانی ۱ تا ۲ متر است.

۷- نتیجه‌گیری

در این مقاله از تحلیل عددی ارائه‌شده به‌عنوان یک رویکرد برای بررسی پایداری تونل در مراحل اولیه طراحی و مطالعه اثر عوامل مختلف طراحی بر پایداری مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل از این بررسی در ادامه به صورت خلاصه ارائه شده است. با اینحال، لزوم مقایسه نتایج مدل‌سازی عددی با داده‌های میدانی یا آزمایشگاهی موضوعی است که در ادامه مطالعات می‌تواند نقش مکمل بر مطالعه حاضر داشته باشد.

۱- با توجه به مدل‌سازی‌های انجام شده، و بررسی مقادیر

۸- فهرست نمادها

نماد	واحد	شرح
ν		ضریب پواسون
mE	GPa	مدول الاستیسیته
ϕ	o	زاویه اصطکاک داخلی
γ	Kg/m^3	وزن مخصوص
c	kPa	چسبندگی
ϵ_c	%	کرنش بحرانی
U_c	cm	جابجایی بحرانی
a	cm	شعاع معادل
t	mm	ضخامت
D_o	mm	قطر خارجی لوله‌ها
L	m	طول
y	MPa	مقاومت تسلیم
Cs	KN/m	چسبندگی فنر برشی
ϕ_s	o	زاویه اصطکاک فنر برشی
ks	KN/m^2	سختی فنر برشی در واحد طول

۴- افزایش قطر و ضخامت دیواره لوله‌ها سبب کاهش جابجایی عمودی تاج تونل می‌شود. با افزایش قطر، به دلیل افزایش مقاومت خمشی لوله‌ها تاثیر باربری این سیستم افزایش می‌یابد.

۵- استفاده از سیستم لوله‌گذاری سقفی باعث جلوگیری از تمرکز تنش در ناحیه خاص می‌شود.

۶- لوله‌ها بار وارده بر خود را به دوغاب بتنی تزریق شده درون لوله منتقل می‌کنند. به همین دلیل لنگر خمشی لوله‌ها بسیار پایین هستند.

۹- منابع

- [1] Lunardi, P. and B. Renzo, The evolution of reinforcement of the advance core using fibre-glass elements, Glückauf Forschungshefte. 2004. p. 91–100.
- [2] Oke, J., N. Vlachopoulos, and M.S. Diederichs, *Numerical analyses in the design of umbrella arch systems*. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2014. 6(6): p. 546-564.
- [3] Proctor, R.V. and T.L. White, *Rock Tunneling with Steel Supports*. Youngstown. 1964: Youngstown Printing Co.
- [4] Juneja, A., A. Hegde, F.H. Lee and C. H. Yeo, *Centrifuge modelling of tunnel face reinforcement using forepoling*. Tunnelling and Underground Space Technology, 2010. 25(4): p. 377-381.
- [5] Kavvas, M., D. Georgiou, and A. Kalos, *Numerical Investigation of Tunnel Face Stability Using Forepoling or Fiberglass Nails*. Geotechnical and Geological Engineering, 2022. 40.
- [6] Yeo, C.H., F.H. Lee, O. Hasegawa, H. Suzuki and M. Shinji, *Three dimensional finite element modelling of a natm tunnel*. International Journal of the JCRM, 2009. 5: p. 33-38.
- [7] Hounyevou Klotoé, C. and E. Bourgeois, *Three dimensional finite element analysis of the influence of the umbrella arch on the settlements induced by shallow tunneling*. Computers and Geotechnics, 2019. 110: p. 114-121.
- [8] Hefny, A.M., J. Zhao, P. Ranjith and W.L. Tan, *Numerical Analysis for Umbrella Arc Method in Shallow Large Scale Excavation in Weak Rock*. The 30th ITA-AITES World Tunnel Congress. 2004: SINGAPORE.
- [9] Ahuja, V. and R.L. Sterling, *Numerical modelling approach for microtunnelling assisted pipe-roof support system*. 34th ITA-AITES World Tunnel Congress 2008 - Underground Facilities for Better Environment and Safety. 2008: Agra, India.
- [10] گزارش طراحی مطالعات تونل طالقان- هشتگرد. ۱۳۹۵، مهندسان مشاور پاسیلو.
- [11] Sakurai, S., I. Kawashima, and T. Otani. *A Criterion For Assessing the Stability of Tunnels*. The ISRM International Symposium - EUROCK 93, Lisboa, Portugal, June 1993.
- [12] FLAC 3D, Fast Lagrangian Analysis of Continua in 3Dimensions Users manual. Itasca Consulting Group, Inc, 2005.
- [13] DSI Underground Brochure: AT Pipe Umbrella System, Groundbreaking Forepoling Technology.



Numerical Modeling of the Pipe Roofing System for Tunnel Pre-Treatment (Case Study: Taleghan Tunnel)

Seyed Amin Moosavi ^{1*}; Behnam Keshavarz ²; Mir Raouf Hadei ²

1- Faculty of Engineering, Vali-e-Asr University of Rafsanjan, Rafsanjan, Iran.

2- Faculty of Engineering, Imam Khomeini International University, Qazvin, Iran.

Received: 04. April. 2024 Accepted: 13. June. 2024

(*Corresponding author: aminmoosavi@vru.ac.ir)

Keywords

Numerical modeling
Pipe roofing
Tunnel pre-treatment

Final English Extended Abstract

Tunnel excavation causes a redistribution of stress in the surrounding rocks. This action causes a tendency for convergence in the tunnel walls. Depending on the geological characteristics, convergence may cause a reduction in the cross-sectional area of the excavation or collapse of the tunnel's crown and sidewalls. To prevent collapse, the rock and soil mass of the tunnel's face must be reinforced. A crown arch system is one of the pre-support systems that is implemented in an arched shape above the tunnel before excavation. A proper understanding of how the crown arch system works requires complex

calculations, which can be accomplished using numerical modeling methods. This study examines the performance of the crown arch method and its effect on the Taleghan-Hashtgerd road tunnel. Part of this tunnel, due to its location in loose and unstable materials (shale), has a high potential for collapse. For this purpose, the tunnel was numerically modeled with a crown arch pre-support using the FLAC 3D software.

In this section, a concise and comprehensive summary of the English extended abstract should be presented. It should concisely describe the content, subject, objectives, scientific logic or method(s), and the most important findings and conclusions of the research.

Introduction

In this study, in addition to examining the need for using the crown arch, the effect of geometric and physical parameters such as the spacing between pipes and the diameter of the pipes on the tunnel's stability has been investigated. The criteria for evaluation include vertical displacement in the tunnel crown, Sakurai relationships, and stability analysis of the pipes.

Summary

In this paper, the effect of using the umbrella system on the stability of the tunnel face was investigated by FLAC 3D software. Also, the effect of pipe diameters and spacing of pipes is expressed on the vertical deformation of the tunnel. Finally, the stability of the tubes and the effect of the umbrella system on the storage system are expressed.

Methodology and Approaches

In this study, a numerical modeling of the tunnel umbrella mechanism has been performed using FLAC 3D software. The pipes have been modeled separately from the surrounding environment. The Ahuja and Sterling method has been used to model the ceiling piping system.

Results and Conclusions

The results show that increasing the diameter and decreasing the spacing has a positive effect on tunnel stability. Also, the crown arch method led to a 36% reduction in tunnel crown displacement.
