نشریه علمی مهندسی عمران و فناوری های نوین

سال اول، شماره ۱، بهار ۱۴۰۲: صص ۹-۱

علمی

تحلیل پارامتریک سه بعدی و آنالیز حساسیت پارامترهای موثر بر تنش‌های سیستم نگهدارنده و تغییرشکل‌های تونل

محمد صافی [۱]، محمد فیاض [۲*]، حسن معتمدی‌نیا [۳]. علی اکبر جعفری [۴]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۱/۹/۱۵

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۲/۱

چکیده

شناسایی رفتار تونل‌ها از مباحث مهم ژئوتکنیک محسوب می‌شود. رفتار تونل به معنی اثرات متقابل و تنش‌ها و تغییرشکل‌های ایجاد شده در تونل و محیط اطراف می‌باشد. امروزه با پیشرفت نرم‌افزارهای مدل‌سازی عددی می‌توان پیش‌بینی مناسبی از رفتار تونل در حین و پس از ساخت تونل داشت. در این پژوهش با مدل‌سازی المان محدود سه بعدی به بررسی پارامترهای موثر بر تنش‌های سیستم نگهدارنده و تغییرشکل‌های تونل پرداخته شده است. ابتدا بر اساس داده‌های واقعی پایش تونل امامزاده هاشم، روش مدل‌سازی عددی صحت‌سنجی شده است. تونل امامزاده هاشم تونلی نعل اسبی شکل است که در فاصله حدود ۵۰ کیلومتری شمال شرق تهران، ایران در بخش جنوبی رشته کوه البرز مرکزی واقع گردیده است. پس از صحت‌سنجی، تأثیر پارامترهای تونل و محیط اطراف شامل ضخامت شاتکریت، مدول الاستیسیته محیط، تنش‌های برجا، ضریب پواسون و زاویه اتساع سنگ بر نشست و خمش تاج بررسی شده است. سپس با آنالیز حساسیت بر اساس روش تاگوچی تاثیر هر کدام از پارامترها بر نتایج مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که تعیین میزان دقیق K_0 بیشترین تاثیر را بر نتایج تغییرشکل تونل و خمش سیستم نگهدارنده دارد. بعد از آن ضخامت شاتکریت و مدول الاستیسیته خاک تاثیر زیادی بر نتایج خواهند داشت. اما تاثیر ضریب پواسون و زاویه اتساع سنگ به اندازه سایر پارامترها نیست.

کلید واژه‌ها: تحلیل پارامتریک، تحلیل المان محدود سه بعدی، آنالیز حساسیت، روش تاگوچی، سیستم نگهدارنده تونل

[۱] دانشیار، دانشگاه شهید بهشتی ، تهران، ایران

[۲] استادیار، دانشگاه جامع امام حسین(ع)، تهران، ایران - نویسنده مسئول (m.fayyaz@modares.ac.ir)

[۳] پژوهشگر، دانشگاه جامع امام حسین، تهران، ایران

[۴] دانشجو کارشناسی ارشد، دانشگاه خواجه نصیر، تهران، ایران

۱- مقدمه

پیش‌بینی نشست تاج تونل و تنش وارده بر سیستم نگهدارنده به منظور طراحی سیستم نگهدارنده مناسب بسیار مهم است. رفتار تونل‌ها به محیط احداث تونل، مشخصات تونل و نحوه حفاری آن وابسته است. در این زمینه تحقیقات بسیاری انجام شده که وابستگی تنش‌ها و تغییرشکل‌ها را به پارامترهای تونل و محیط اطراف نشان می‌دهند. از جمله حاجی حسنی و همکاران برای ارائه یک مدل مبتنی بر شبکه عصبی برای پیش بینی همگرایی تونل، پارامترهای عمق تونل، چسبندگی، زاویه اصطکاک، وزن مخصوص، نسبت پواسون، و مدول الاستیسیته را به عنوان ورودی مدل استفاده نمودند [۱]. کارادمیر با استفاده از تحلیل پارامتریک، اثر حفاری یک تونل جدید را بر تونل قبلی پیش‌بینی نمود [۲]. کاراکوس و فوول اثر الگوهای مختلف حفاری را بر نشست بررسی نمودند [۳]. چلاجور اثر مدل‌های رفتاری مختلف را بر روی رفتار تونل مورد بررسی قرار داد [۴]. علاقه و چپمن با بهره‌گیری از تحلیل پارامتریک اجزای محدود، فشار گسیختگی جبهه حفاری تونل را در هنگام حفاری در خاک‌های همگن لایه لایه بررسی نمودند [۵]. چو و سونگ با تحلیل اجزای محدود، تاثیر نوع خاک، ضخامت شاتکریت، ناصافی سطوح و ضربه را بر لرزش تونل مطالعه کردند [۶]. آنلو و گرچک اثر ضریب پواسون را بر تغییرشکل شعاعی تونل بررسی کردند. آنها در مطالعه‌شان از روش تفاضل محدود بهره برده و رابطه‌ای را برای بیان این تغییرشکل‌ها ارائه دادند [۷]. در این تحقیقات پارامترهای تونل، محیط اطراف و نحوه حفاری بررسی شده‌اند. اما اینکه هر کدام از این پارامترها به چه میزان می‌تواند موثر باشد و اهمیت کدام پارامتر بیشتر است مورد بررسی قرار نگرفته است.

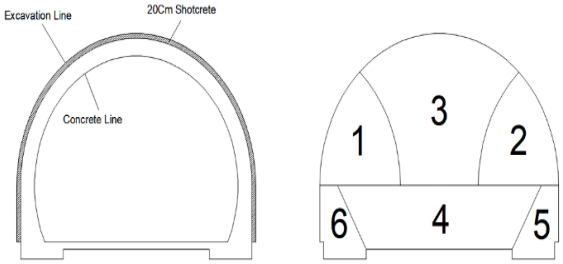
در این پژوهش با استفاده از مدل‌سازی سه بعدی المان محدود و صحت‌سنجی روش مدل‌سازی عددی با داده‌های اندازه‌گیری میدانی، پارامترهای مختلف سیستم نگهدارنده و محیط اطراف تونل مورد بررسی جامعی قرار گرفته و تاثیر ضخامت شاتکریت، مدول الاستیسیته، تنش‌های برجا، ضریب پواسون و زاویه اتساع سنگ بر نشست تاج تونل و تنش‌های سیستم نگدارنده بررسی شده است. سپس با استفاده از روش طراحی آزمایش تاگوچی (Taguchi design of experiment) به بررسی میزان اهمیت و موثر بودن هر پارامتر پرداخته شده است. روش تاگوچی روشی سریع و ساده است که در آن نیازی به انجام همه آزمایش‌ها نبوده و با استفاده از آرایه‌ای از آزمایش‌ها به تخمین پارامتر هدف می‌پردازد. این موضوع می‌تواند راهگشای مهندسان در انتخاب دقیق‌تر پارامترهای طراحی باشد.

۲- صحت‌سنجی مدل‌سازی عددی

۲-۱- مشخصات تونل امامزاده هاشم

تونل امامزاده هاشم به طول ۳۱۸۹ متر بخشی از پروژه واریانت تغییرمسیر امامزاده هاشم است. این پروژه در حدود ۵۰ کیلومتری شمال شرق تهران، ایران در بخش جنوبی رشته کوه البرز مرکزی واقع گردیده است. تونل در سنگ‌هایی با ویژگی‌های زمین‌شناسی مختلف حفر شده است [۸]. مقطع و توالی حفاری تونل در شکل (۱) نشان داده شده است. در این پژوهش به منظور صحت‌سنجی مدل عددی، از مقطع ۲۹۰۰ این تونل استفاده گردیده است.

پارامترهای طراحی تونل بر اساس گمانه BH1 و یا آنالیز برگشتی به دست آمده و در جدول (۱) آورده شده است [۹]. از آنجا که سنگ این محدوده تونل هوازده است از مدل رفتاری موهر کلمب برای مدل سازی استفاده گردیده است.



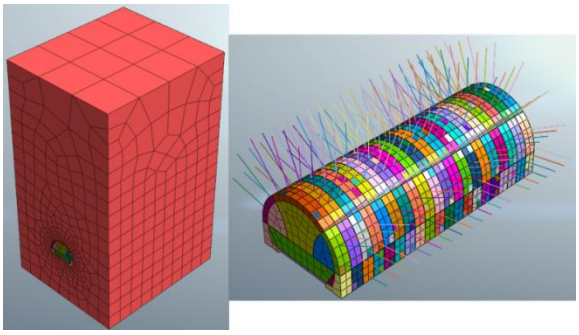
شکل (۱): مقطع و توالی حفاری تونل امامزاده هاشم

جدول (۱): زمین شناسی، مقطع تونل و سیستم نگهدارنده تونل امامزاده هاشم

کلیات	نوع تونل	نعل اسبی
	طول کل تونل	۳۱۸۹ متر
	ارتفاع سربار	۲۸۰ متر
	شعاع نهایی تونل	۵/۲۵ متر در سقف ۵/۱۷ در پاشنه ها
سیستم نگهدارنده	ضخامت لاینینگ	در سقف ۶۰ سانتیمتر در پاشنه ها ۱۱۸ سانتیمتر
	نگهداری اولیه	۲۰ سانتیمتر شاتکریت راک بولت ۶ متری قاب با IPE160
مشخصات خاک	وزن مخصوص	۲۷۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
	زاویه اصطکاک داخلی	۶۰ درجه
	چسبندگی	۲۰۰ کیلوپاسکال
	مدول الاستیسیته	۸۰۰ مگاپاسکال
	ضریب پواسون	۰/۳۶

۲-۲- مدل‌سازی عددی

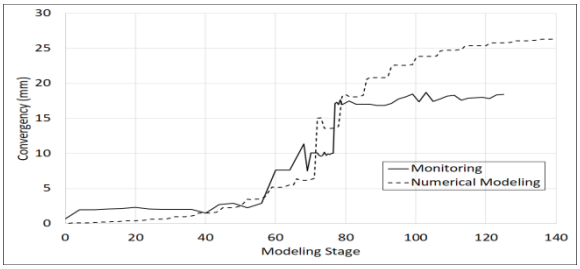
مدل‌سازی المان محدود به صورت سه بعدی صورت گرفت. به منظور در نظر گرفتن ابعاد مدل‌سازی در راستای طولی تونل جهت مقایسه با نتایج ابزار دقیق از رابطه پنت استفاده شده است [۱۰]. طبق این رابطه، ۹۸ درصد از کل جابجایی تونل در فاصله تا دو برابر قطر تونل از سینه کار تحت تاثیر اثر پیشروی جبهه کار تونل بوده و رفتار خزشی و تحت زمان سنگ تا این فاصله تاثیرقابل توجهی نخواهد داشت [۱۱]. بنابراین طول تونل ۶۰ متر در نظر گرفته شد که ۳۰ متر آن حفاری می‌شود. قرائت نتایج در فاصله ۱۵ متری از جبهه کار صورت گرفته است. قاب فولادی به صورت ضخامت معادل شاتکریت مدل‌سازی شد. مراحل مدل‌سازی طی ۱۴۰ مرحله، به صورت حفاری هر قسمت مطابق شکل (۱) و اعمال شاتکریت به صورت هم‌زمان می‌باشد. پس از حفاری، سگمنت گذاری هر بخش انجام می‌پذیرد. شکل ۲ مدل ساخته شده را نشان می‌دهد.



شکل (۲): تونل مدلسازی شده

۲-۳- مقایسه نتایج با داده‌های رفتارنگاری

شکل (۳)، نتایج همگرایی دیواره و تاج تونل را نسبت به هم، برای مقطع ۲۹۰۰ با استفاده از داده‌های جدول (۱) نشان می‌دهد که با نتایج حاصل از تحلیل عددی المان محدود مقایسه شده است. همانطور که مشاهده می‌گردد اختلاف بسیار کمی در نتایج مدل‌سازی و ابزار دقیق وجود دارد که بیان کننده صحت مدل‌سازی می‌باشد. از این رو می‌توان از این روش برای بررسی پارامتریک تونل استفاده نمود.

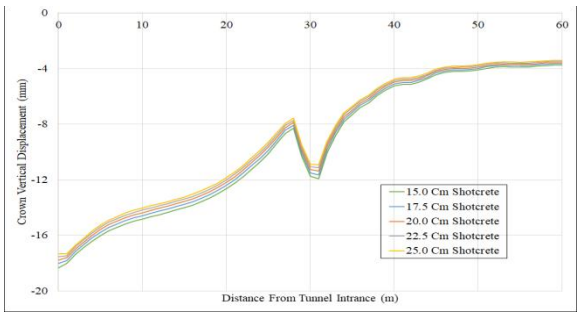


شکل ۳: مقایسه نتایج رفتارنگاری و مدلسازی عددی برای همگرایی تونل امامزاده هاشم

۳- تحلیل پارامتریک

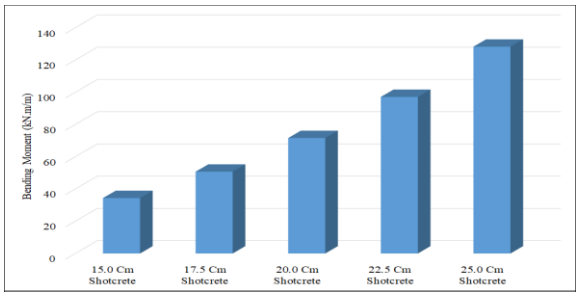
۳-۱- ضخامت شاتکریت

ضخامت شاتکریت می‌تواند یکی از پارامترهای موثر در طراحی سیستم نگهدارنده تونل باشد. افزایش ضخامت شاتکریت می‌تواند سبب کاهش نشست‌های تونل گردد، اما از طرفی می‌تواند سبب افزایش هزینه و ترک خوردگی شاتکریت گردد. ضخامت شاتکریت تونل امامزاده هاشم ۲۰ سانتیمتر بوده است. در این پژوهش ضخامت‌های ۱۵، ۱۷/۵، ۲۰، ۲۲/۵، و ۲۵ سانتیمتر شاتکریت مورد بررسی قرار گرفت. شکل (۴) نتایج بررسی پارامتریک بر روی ضخامت شاتکریت را نشان می‌دهد. همانطور که در تصویر مشخص است، با افزایش ضخامت شاتکریت میزان نشست تاج تونل از مقدار ۱۴/۰۱ میلیمتر برای ضخامت ۱۵ سانتیمتر به ۱۳/۲۳ میلیمتر برای ضخامت ۲۵ میلیمتر کاهش پیدا کرده است.



شکل ۴: نشست قائم تاج تونل - ضخامت‌های مختلف شاتکریت

شکل (۵) خمش تاج تونل را در ضخامت‌های متفاوت شاتکریت نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است با افزایش ضخامت شاتکریت، سیستم نگهدارنده خمش بیشتری را تحمل کرده و خمش از ۳۴/۴کیلونیوتن متر به ۱۲۸/۳کیلونیوتن متر به ترتیب برای ضخامت های ۱۵ و ۲۵ سانتیمتر رسیده است. این امر باعث کاهش نشست تاج تونل شده است.

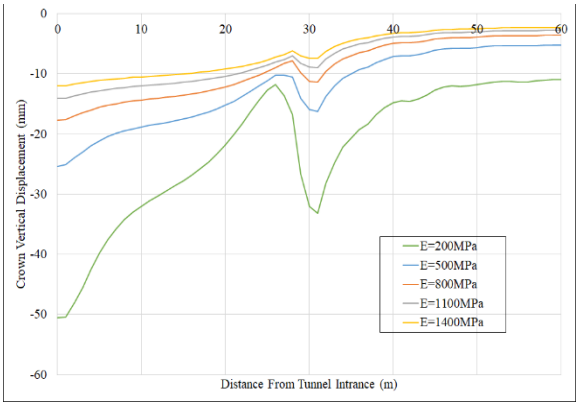


شکل (۵): خمش تاج تونل - ضخامت‌های مختلف شاتکریت

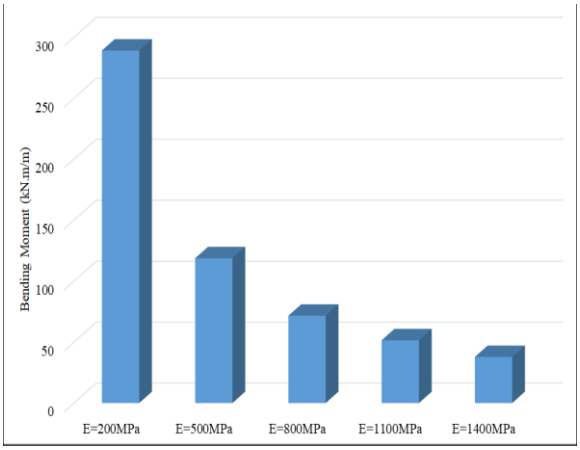
۳-۲- مدول الاستیسیته

مدول الاستیسیته ارتباط بین تنش و تغییرشکل را بر اساس قانون هوک بیان می‌کند. از این رو، مدول الاستیسیته می‌تواند

تاثیر بسزایی در تغییرشکل تونل داشته باشد. در این پژوهش محدوده مدول الاستیسیته خاک از ۲۰۰ تا ۱۴۰۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. تصاویر ۶ و ۷، نشست تاج و خمش تاج تونل را با توجه به مدول الاستیسیته های متفاوت محیط نشان می‌دهد. همانطور که انتظار می‌رود، با افزایش مدول الاستیسیته، تغییرشکل‌های محیط کمتر شده و تنش‌ها و تغییرشکل‌های تاج تونل کاهش پیدا کرده‌اند. مقدار نشست تاج تونل در فاصله ۱۵ متری از دهانه ورودی به اندازه ۲۷/۷۷ و ۱۰/۰۱ میلیمتر و مقدار خمش ۲۸۹/۲ و ۳۷/۸ کیلونیوتن متر به ترتیب برای مدول الاستیسیته ۲۰۰ و ۱۴۰۰ مگاپاسکال اندازه گیری شده است.



شکل (۶): نشست قائم تاج تونل – مدول الاستیسیته‌های مختلف خاک



شکل (۷): خمش تاج تونل - مدول الاستیسیته‌های مختلف خاک

۳-۳- تنش‌های برجا

مقطع ۲۹۰۰ تونل امامزاده هاشم در سنگی هوازده حفاری شده است. برخلاف خاک‌ها، در سنگ‌ها به دلیل تنش‌های تکتونیکی و فرایند سرد شدن غیریکنواخت سنگ‌های پوسته زمین، تنش‌های افقی می‌توانند حتی بالاتر از تنش‌های قائم باشند. مطالعات بسیاری بر اساس داده‌های آماری برای پیدا کردن ارتباط بین تنش افقی و قائم در سنگ‌ها انجام شده است که می‌توان به تحقیقات هوک و براون [۱۲]، مک کوتچین [۱۳]، استفانسون [۱۴]و سنگوپتا [۱] ,[۱۱] اشاره کرد. همچنین سینگ و گوئل بر اهمیت تست‌های شکست هیدرولیکی برای یافتن تنش‌های افقی تاکید دارند [۱۶].

در این پژوهش با در نظرگیری عمق ۲۸۰ متری تونل و وزن مخصوص ۰/۰۲۷ مگانیوتن بر مترمکعب، بر اساس رابطه ارائه شده توسط سنگوپتا (رابطه (۲)) مقدار تنش افقی حداقل و حداکثر به ترتیب برابر ۴/۷۸ و ۱/۳۹۸ به دست می‌آید [۱۵]:

$$\sigma_V = \gamma z \qquad (۱)$$

که در این رابطه σ_V تنش قائم، γ وزن مخصوص توده سنگ، و z عمق می‌باشد.

$$\begin{cases} \sigma_h = 1.0 + 0.5\sigma_V = 4.78MPa \rightarrow \\ K_0 = \dfrac{\sigma_h}{\sigma_V} = 0.632 \\ \sigma_H = 1.5 + 1.2\sigma_V = 10.57MPa \rightarrow \\ K_0 = \dfrac{\sigma_H}{\sigma_V} = 1.398 \end{cases} \qquad (۲)$$

که در این رابطه σ_h تنش افقی حداقل، σ_H تنش افقی حداکثر، و K_0 نسبت تنش افقی به قائم است.

همچنین با استفاده از رابطه استفانسون (رابطه (۳)) مقادیر ۱/۱۸۱ و ۱/۸۵۰ برای تنش افقی حداقل و حداکثر به دست می‌آید [۱۴]:

$$\begin{cases} \sigma_h = 2.2 + 0.89\sigma_V = 8.93MPa \rightarrow \\ K_0 = \dfrac{\sigma_h}{\sigma_V} = 1.181 \\ \sigma_H = 2.8 + 1.48\sigma_V = 12.22MPa \rightarrow \\ K_0 = \dfrac{\sigma_H}{\sigma_V} = 1.850 \end{cases} \qquad (۳)$$

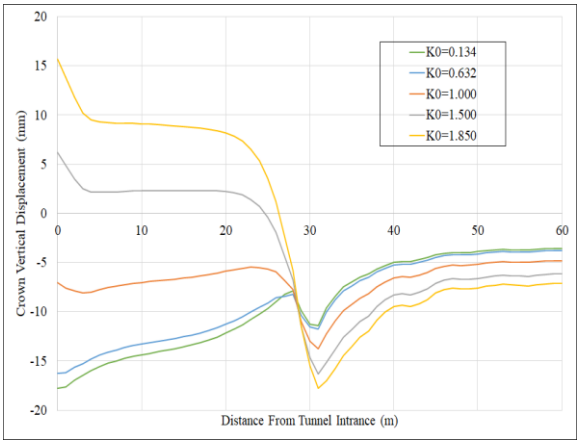
از طرفی در خاک‌ها یکی از مرسوم ترین روش‌های محاسبه مقدار ضریب فشار جانبی خاک، استفاده از رابطه (۴) است [۱۷].

$$K_0 = 1 - \sin\emptyset = 1 - \sin 60 = 0.134 \qquad (۴)$$

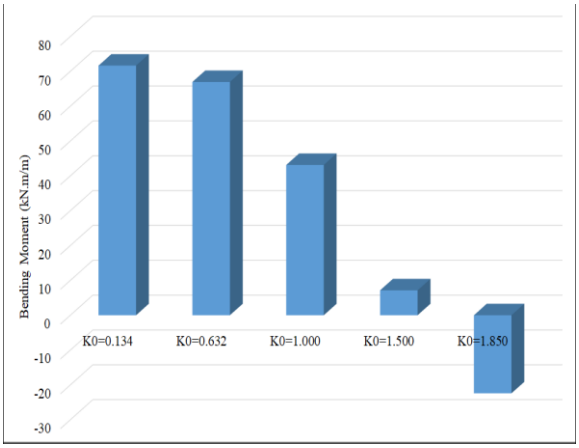
بنابراین در این پژوهش مقادیر ۰/۱۳۴، ۰/۶۳۲، ۱/۰۰، ۱/۵۰ و ۱/۸۵ به عنوان مقادیری برای بررسی تاثیر تنش‌های برجا در نظر گرفته شدند.

شکل (۸) و شکل (۹) به ترتیب نشست تاج تونل و خمش تاج تونل را با توجه به ضرایب فشارجانبی متفاوت خاک نشان می‌دهند. با افزایش ضریب فشار جانبی خاک از ۰/۱۳۴ تا ۱/۸۵ جای تنش‌های اصلی به تدریج عوض می‌شود. این موضوع سبب می‌شود که جهت تغییرشکل خاک اطراف تونل نیز تغییر کند، به طوری که در تنش‌های جانبی بسیار بزرگ، تونل در جهت جانبی فشرده شده و تاج آن به سمت بالا حرکت می‌کند و مقدار تغییرشکل از ۱۳/۵۶میلیمتر نشست در مقطع ۱۵ متری ورودی تونل به ۸/۸۴ میلیمتر بالازدگی تاج به ترتیب برای K_0 برابر

۰/۱۳۴و ۱/۸۵ تغییر کند. این موضوع سبب ایجاد خمش‌های منفی به مقدار ۲۲/۴ کیلونیوتن متر در تاج تونل می‌گردد.



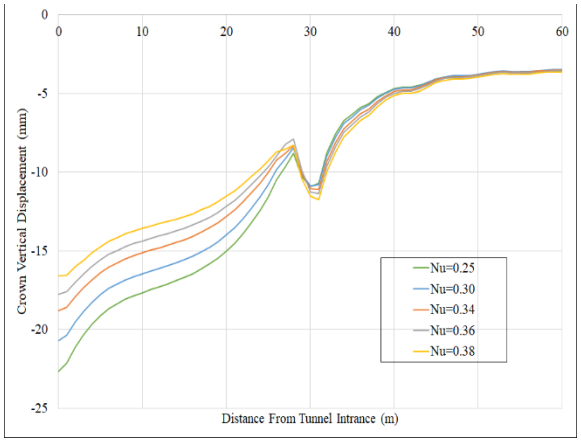
شکل (۸): نشست قائم تاج تونل – نسبت تنش افقی به قائم مختلف



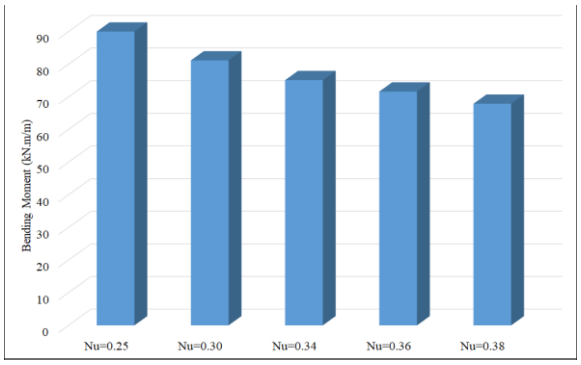
شکل (۹): خمش تاج تونل – نسبت تنش افقی به قائم مختلف

۳-۴- نسبت پواسون

نسبت پواسون انقباض و انبساط مصالح را در جهت عمود بر جهت بارگذاری نشان می‌دهد. المانی از تونل که تحت بار قائم قرار دارد به علت اثر پواسون تغییرشکل جانبی هم خواهد داشت و برعکس. این موضوع می‌تواند تغییرشکل‌های تونل و تنش‌های سیستم نگهدارنده را تحت تاثیر قرار دهد. در اینجا مقدار نسبت پواسون در محدوده معمول خاک‌ها از ۰/۲۵ تا ۰/۳۸ انتخاب شده است. شکل‌های (۱۰) و (۱۱) به ترتیب تاثیر نسبت پواسون را در تغییرشکل تاج و خمش تاج نشان می‌دهند. همانطور که دیده می‌شود، افزایش ضریب پواسون سبب کاهش نشست و خمش تاج به ترتیب از مقدار ۱۶/۶۹ میلیمتر و ۹۰ کیلونیوتن متر برای ضریب پواسون ۰/۲۵ خاک به ۱۲/۸۲میلیمتر و ۶۷/۹ کیلونیوتن متر برای ضریب پواسون ۰/۳۸ شده است.



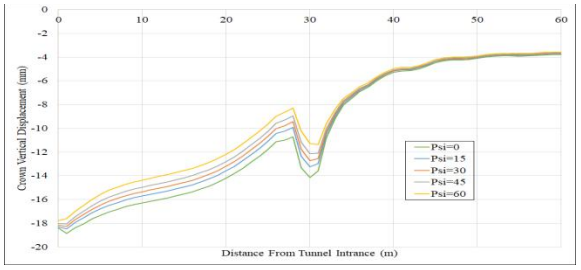
شکل (۱۰): نشست قائم تاج تونل – نسبت پواسون‌های مختلف



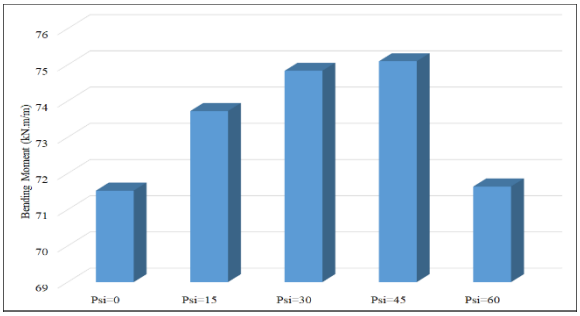
شکل (۱۱): خمش تاج تونل – نسبت پواسون‌های مختلف

۳-۵- زاویه اتساع

زاویه اتساع، کرنش حجمی پلاستیک را در حین برش پلاستیک تعریف کرده و معمولا ثابت فرض می‌شود [۱۸]. در این پژوهش مقدار زاویه اتساع برابر ۰، ۱۵، ۳۰، ۴۵ (قانون جریان غیرهمراه non-associated flow rule) و ۶۰ درجه (برابر زاویه اصطکاک داخلی خاک، قانون جریان همراه associated flow rule) در نظر گرفته شد. شکل های (۱۲) و (۱۳) به ترتیب تاثیر زاویه اتساع را بر نشست تاج تونل و خمش در تاج تونل نشان می‌دهند. با افزایش زاویه اتساع خاک، نشست تاج تونل کاهش می‌یابد و خمش تاج تونل بیشتر می‌شود.



شکل (۱۲): نشست قائم تاج تونل – زوایای اتساع مختلف



شکل (۱۳): خمش تاج تونل – زوایای اتساع مختلف

۴- بررسی اهمیت پارامترها

۴-۱- روش طراحی آزمایش‌ها

به منظور بررسی دقیق‌تر اهمیت هر یک از پارامترها در افزایش و کاهش نشست‌ها و تنش‌های وارده به سیستم نگهدارنده نیاز است که اثر همزمانی این پارامترها دیده شود. در این صورت باید تعداد زیادی تحلیل عددی صورت پذیرد که هزینه زمانی زیادی دارد. بنابراین روش آماری طراحی آزمایش‌ها برای کاهش تعداد آزمایش‌ها در یک سیستم چندپارامتره به کار برده شده است. برای رسیدن به چنین هدفی، روش تاگوچی استفاده شده است. روش تاگوچی با معیار قرار دادن نسبت سیگنال به نویز در ماتریس‌های قطری، به دنبال شرایط بهینه می‌گردد [۱۹].

از آنجا که ۵ پارامتر مختلف مورد بررسی قرار گرفته است که هر کدام از پارامترها ۵ مقدار مختلف می‌تواند داشته باشد، برای بررسی همه حالت‌های ممکن باید ۳۱۲۵ تحلیل عددی صورت پذیرد. اما با استفاده از روش تاگوچی می‌توان با ۲۵ تحلیل که در جدول (۲) آورده شده‌اند به صورت آماری اثر هر یک از پارامترها را بررسی نمود.

۴-۲- نتایج

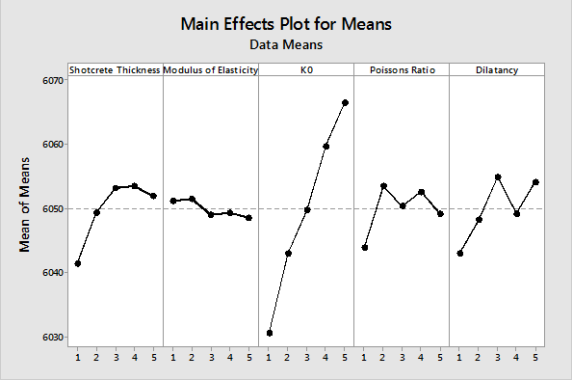
پس از انجام تحلیل‌های عددی مطابق جدول (۲)، خروجی سیگنال به نویز روش تاگوچی با استفاده از نرم افزار آماری minitab 17 به دست آمد. نسبت سیگنال به نویز چگونگی پاسخ سیستم به نویزهای مختلف را با توجه به مقدار هدف یا اسمی پارامتر نشان می‌دهد. در آزمایش‌های طراحی شده به روش تاگوچی، اعداد بالاتر نسبت سیگنال به نویز (S/N) شرایطی را نشان می‌دهد که اثر فاکتورهای ایجادکننده نویز حداقل است [۲۰].

در شکل (۱۴) تحلیل میزان نشست تاج تونل به روش تاگوچی نشان داده شده است. محور قائم قطر تونل در تاج بعد از حفاری تونل است که در فاصله ۱۵ متری از دهانه ورودی محاسبه شده است، و محور افقی درجه‌های(Levels) هر پارامتر بر اساس جدول (۲) می‌باشد.

جدول (۲): آرایه‌های روش تاگوچی

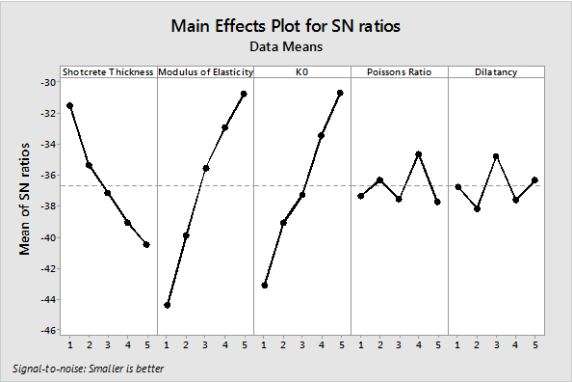
ردیف	پارامتر۱	پارامتر۲	پارامتر۳	پارامتر۴	پارامتر۵	ضخامت شاتکریت (سانتیمتر)	مدول الاستیسیته (مگاپاسکال)	K۰	نسبت پواسون
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱۵	۲۰۰	۰.۱۳	۰.۲۵
۲	۱	۲	۲	۲	۲	۱۵	۵۰۰	۰.۶۳	۰.۳
۳	۱	۳	۳	۳	۳	۱۵	۸۰۰	۱	۰.۳۴
۴	۱	۴	۴	۴	۴	۱۵	۱۱۰۰	۱.۵	۰.۳۶
۵	۱	۵	۵	۵	۵	۱۵	۱۴۰۰	۱.۸۵	۰.۳۸
۶	۲	۱	۲	۳	۴	۱۷.۵	۲۰۰	۰.۶۳	۰.۳۴
۷	۲	۲	۳	۴	۵	۱۷.۵	۵۰۰	۱	۰.۳۶
۸	۲	۳	۴	۵	۱	۱۷.۵	۸۰۰	۱.۵	۰.۳۸
۹	۲	۴	۵	۱	۲	۱۷.۵	۱۱۰۰	۱.۸۵	۰.۲۵
۱۰	۲	۵	۱	۲	۳	۱۷.۵	۱۴۰۰	۰.۱۳	۰.۳
۱۱	۳	۱	۳	۵	۲	۲۰	۲۰۰	۱	۰.۳۸
۱۲	۳	۲	۴	۱	۳	۲۰	۵۰۰	۱.۵	۰.۲۵
۱۳	۳	۳	۵	۲	۴	۲۰	۸۰۰	۱.۸۵	۰.۳
۱۴	۳	۴	۱	۳	۵	۲۰	۱۱۰۰	۰.۱۳	۰.۳۴
۱۵	۳	۵	۲	۴	۱	۲۰	۱۴۰۰	۰.۶۳	۰.۳۶
۱۶	۴	۱	۴	۲	۵	۲۲.۵	۲۰۰	۱.۵	۰.۳
۱۷	۴	۲	۵	۳	۱	۲۲.۵	۵۰۰	۱.۸۵	۰.۳۴
۱۸	۴	۳	۱	۴	۲	۲۲.۵	۸۰۰	۰.۱۳	۰.۳۶
۱۹	۴	۴	۲	۵	۳	۲۲.۵	۱۱۰۰	۰.۶۳	۰.۳۸
۲۰	۴	۵	۳	۱	۴	۲۲.۵	۱۴۰۰	۱	۰.۲۵
۲۱	۵	۱	۵	۴	۳	۲۵	۲۰۰	۱.۸۵	۰.۳۶
۲۲	۵	۲	۱	۵	۴	۲۵	۵۰۰	۰.۱۳	۰.۳۸
۲۳	۵	۳	۲	۱	۵	۲۵	۸۰۰	۰.۶۳	۰.۲۵
۲۴	۵	۴	۳	۲	۱	۲۵	۱۱۰۰	۱	۰.۳
۲۵	۵	۵	۴	۳	۲	۲۵	۱۴۰۰	۱.۵	۰.۳۴

همانطور که مشخص است، مقدار K_0 بیشترین تاثیر را در تغییرشکل تاج تونل دارد. به طوری که با افزایش K_0، تغییرشکل تاج تونل از نشست به تورم تغییر می‌کند و میانگین پاسخ شعاع تونل در محل تاج از ۶۰۳۱ میلیمتر به ۶۰۶۷ میلیمتر می‌رسد. بنابراین تعیین دقیق K_0 برای طراحی دقیق بسیار مهم است. پس از K_0، ضخامت شاتکریت و زاویه اتساع مهم‌ترین پارامترها هستند که با افزایش مقدار، سبب تغییر محسوس در قطر تونل به ترتیب در دامنه ۶۰۴۲ تا ۶۰۵۴ میلیمتر و ۶۰۴۳ تا ۶۰۵۵ میلیمتر گردیده‌اند.



شکل (۱۴): تحلیل آماری قطر تونل در تاج بعد از حفاری تونل (mm)

شکل (۱۵) مقدار سیگنال به نویز را برای خمش سیستم نگدارنده بر اساس تحلیل تاگوچی نشان می‌دهد. هرچه مقدار نسبت سیگنال به نویز کمتر منفی باشد مقدار خمش موجود در سیستم نگهدارنده تونل کمتر است. بیشترین تاثیر بر روی خمش در اثر تغییر پارامترهای مدول الاستیسیته و K_0 خاک ایجاد شده است که به ترتیب مقدار سیگنال به نویز در دامنه ۴۴- تا ۳۱- و ۴۳- تا ۳۱- قرار می‌گیرد. پس از آن ضخامت شاتکریت با دامنه سیگنال به نویز ۴۱- تا ۳۲- تاثیر بسزایی در مقدار خمش خواهد داشت. بنابراین در اندازه‌گیری و برآورد این پارامترها باید بیشترین دقت ممکن صورت گیرد تا نتایج قابل قبولی به دست آید.



شکل (۱۵): تحلیل آماری خمش سیستم نگدارنده

۵- نتیجه گیری

در این مقاله، در ابتدا روش مدل‌سازی عددی بر اساس داده‌های واقعی تونل امامزاده هاشم صحت سنجی شد. سپس تحلیل پارامتریک بر روی پارامترهای ضخامت شاتکریت، مدول الاستیسیته، ضریب فشار جانبی خاک، نسبت پواسون، و زاویه اتساع صورت پذیرفت. بعد از آن بر اساس روش تاگوچی به بهینه سازی مقدار تاثیر هر کدام از پارامترها پرداخته شد. از این روش به عنوان روشی نسبتا سریع و ساده برای پیشبینی اثر پارامترهای مختلف در طراحی تونل ها می‌توان استفاده نمود. در محدوده داده‌های استفاده شده نتایج زیر به دست آمده است:

- با افزایش ضخامت شاتکریت میزان نشست تاج تونل کاهش پیدا کرده (۵ درصد در دامنه بررسی شده) و سیستم نگهدارنده خمش بیشتری را تحمل می‌کند (۷۳ درصد در دامنه بررسی شده). این پارامتر پس از تنش‌های برجای خاک بیشترین تاثیر را در تغییرشکل و خمش‌ها دارد و تعیین دقیق آن اهمیت زیادی دارد.
- با افزایش مدول الاستیسیته، تنش‌های وارده از محیط به تونل کمتر شده و تنش‌ها و تغییرشکل‌های تاج تونل کاهش پیدا می‌کنند. در دامنه بررسی شده نشست تاج تونل در فاصله ۱۵ متری دهانه ورودی تونل به میزان ۶۴ درصد و خمش تاج تونل به میزان ۸۷ درصد کاهش پیدا کرده‌اند. در بین پارامترهای بررسی شده مدول الاستیسیته تاثیر بسزایی در خمش های سیستم نگهدارنده دارد.
- با افزایش ضریب فشار جانبی خاک از مقادیر کمتر از ۱ تا بیشتر از ۱، جای تنش‌های اصلی به تدریج عوض می‌شود. بنابراین نشست تاج تونل در ضرایب فشار جانبی خاک بالا تبدیل به بالازدگی خاک می‌گردد. این موضوع سبب ایجاد خمش‌های منفی در سیستم نگهدارنده تاج تونل در ضرایب فشار جانبی بالا می‌گردد. این پارامتر در بین پارامترهای بررسی شده بیشترین تاثیر را در تغییرشکل تونل دارد و باید با دقت زیادی تخمین زده یا اندازه گیری شود.
- افزایش ضریب پواسون سبب کاهش نشست و خمش تاج می‌شود (به ترتیب به میزان ۲۳ و ۲۵ درصد برای نشست و خمش تاج تونل در محدوده بررسی شده).
- با افزایش زاویه اتساع خاک، نشست تاج تونل به میزان ۱۳ درصد در محدوده بررسی شده کاهش می‌یابد و خمش تاج تونل نیز ۵ درصد بیشتر می‌شود.

۶- مراجع

[1] M. Hajihassani, S. S. Abdullah, P. G. Asteris, and D. J. Armaghani, “A gene expression programming model for predicting tunnel convergence,” Applied Sciences, vol. 9, no. 21 , 4650,2019.

[2] S. M. Karademir, “A parametric study on three dimensional modeling of parallel tunnel interactions,” Middle East Technical University, 2010.

[3] M. Karakus and R. J. Fowell, “Effects of different tunnel face advance excavation on the settlement by FEM,” Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 18, no. 5, 513–523, 2003.

equation and Burger′ s model of Babolak water tunnel conveyance," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 68, 159–166, 2014.

[12] E. T. Brown and E. Hoek, Underground excavations in rock. CRC Press, 1980.

[13] W. R. McCutchin, "Some elements of a theory of in situ stresses," Int J Rock Mech Min Sci, vol. 19, no. 4, 201–203, 1982.

[14] O. Stephansson, "Rock stress in the Fennoscandian shield," in Rock Testing and Site Characterization, Elsevier, 445–459, 1993.

[15] S. Sengupta, "Influence of geological structures on in-situ stresses," Indian Istitute of Technology, 1998.

[16] B. Singh and R. K. Goel, Rock mass classification: a practical approach in civil engineering, vol. 46. Elsevier, 1999.

[17] B. M. Das, Advanced Soil Mechanics, 3rd Editio. Taylor & Francis, 2008.

[18] J. R. Maranha and E. M. das Neves, "The experimental determination of the angle of dilatancy in soils.," in Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering: The Academia and Practice of Geotechnical Engineering, Alexandria, Egypt, 5-9 October 2009, Volume 1, 147–150, 2009.

[19] A. Erfani, M. Muhammadi, S. Asgari Neshat, M. M. Shalchi, and F. Varaminian, "Investigation of aluminum primary batteries based on Taguchi method," Energy Technology & Policy, vol. 2, no. 1, 19–27, 2015.

[20] G. S. Peace, Taguchi methods: a hands-on approach. Addison Wesley Publishing Company, 1993.

[4] S. Chalajour, "Investigating the effects of constitutive models in predicting the performance of tunnels using continuum modeling," Shiraz University, 2019. (in Persian)

[5] A. S. N. Alagha and D. N. Chapman, "Numerical modelling of tunnel face stability in homogeneous and layered soft ground," Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 94, 103096, 2019.

[6] K.-I. Song and G.-C. Cho, "Numerical study on the evaluation of tunnel shotcrete using the Impact-Echo method coupled with Fourier transform and short-time Fourier transform," International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, vol. 47, no. 8, 1274–1288, 2010.

[7] T. Unlu and H. Gercek, "Effect of Poisson's ratio on the normalized radial displacements occurring around the face of a circular tunnel," Tunnelling and Underground Space Technology, vol. 18, no. 5, 547–553, 2003.

[8] A. Habibi, Crossing the Saturated Collapsible Zone of the First Part of Emamzadeh-Hashem Variant Project. Khatam‌ al Anbiya Construction Headquarters, 2010. (in Persian)

[9] M. Hasanloorad, "An Investigation of the Stress and Displacement of the Imamzadeh Hashem Tunnel (Comparison Between Numerical (3DEC) and Experimental Methods and Results)," Iran University of Science and Technology, 2002.

[10] J. Sulem, M. Panet, and A. Guenot, "Closure analysis in deep tunnels," in International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts, vol. 24, no. 3, 145–154, 1987.

[11] E. Asadollahpour, R. Rahmannejad, A. Asghari, and A. Abdollahipour, "Back analysis of closure parameters of Panet

Sensitivity Analysis and 3D Finite Element Parametric Study on Tunnel Displacements and Retaining System Stresses

Mohammad Safi, Mohammad Fayyaz*, Hasan Motamedi Nia, Aliakbar Jafari

*Associate Professor, Imam Hossein (AS) University, Tehran, Iran (m.fayyaz@modares.ac.ir)

Abstract

Prediction of tunnel behavior is one of the most popular subjects in geotechnics. Tunnel behavior means interaction, stresses and deformations created in the tunnel and surrounding environment. Nowadays, by advanced numerical modeling softwares, tunnel behavior is investigated well during and after tunnel construction. In this study, 3D finite element modeling has been employed to investigate the effective parameters on tunnel displacements and retaining system stresses. First, based on monitoring data of Emamzadeh Hashem tunnel, the numerical modeling method has been verified. The Emamzadeh Hashem Tunnel is a horseshoe-shaped tunnel, located about 50 km northeast of Tehran, Iran in the southern part of the central Alborz Mountains. After the verification, the effects of the tunnel and the medium parameters consist of shotcrete thickness, modulus of elasticity, in-situ stresses, Poisson's ratio, and rock dilatancy angle on the tunnel crown settlement and bending moment have been studied. Sensitivity analysis has been done through the Taguchi design of experiments method to compare the effect of each parameter on the results. The results show that the determination of K0 value has the greatest effect on the predictions of tunnel deformations and retaining system bending moment. The shotcrete thickness and modulus of elasticity have the next most significant impact on the results. Results show besides that the influence of the Poisson's ratio and dilatancy angle of the rock is not as important as other parameters.

Keywords: Parametric Study, 3D Finite Element Analysis, Sensitivity Analysis, Taguchi Design of Experiments, Tunnel Retaining Structure