**بررسی عملکرد تونل های سگمنتی در سنگ های متورم شونده**

**بابک سهرابیان1 ، سیما فرجی مرجانلو2**

1.استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه

2.کارشناس ارشد مهندسی ژئوتکنیک، دانشگاه غیر انتفاعی سراج

**چکیده :**

با توجه به افزایش چشم گیر راههای ارتباطاتی و کاهش روز افزون فضاهای سطحی برای عملیات راه سازی ، استفاده از فضاهای زیر زمینی همانند تونل ها مورد توجه قرار گرفته است. در برخی از موارد به دلیل اهمیت مسیرها، تونل بالاجبار بایستی در مناطق ژئوتکنیکی نامناسب با سنگ های متورم شونده احداث شود. خصوصیات سنگ های متورم شونده قبل از حفاری ، حین حفاری و بعد از حفاری باید مورد بررسی قرار گرفته و تمهیدات لازم جهت جلوگیری از خطرات احتمالی در نظر گرفته شود. رفتار آنی و وابسته به زمان در سنگ های متورم شونده از جمله مهمترین تفاوت این توده سنگ ها نسبت به انواع دیگر است. مشخصاً پدیده خزش در این نوع سنگ ها بیشتر نمایان می گردد. لذا بعد زمان در رویارویی با این توده سنگ ها اهمیت بیشتری به خود می گیرد. با توجه به اینکه رفتار وابسته به زمان سبب می شود به سیستم نگهداری تونل در طول زمان نیروی مضاعفی وارد شود بنابراین انتخاب سیستم مناسب نگهداری بسیار حائز اهمیت می باشد. در این مطالعه مدلسازی تونل با نرم افزار FLAC3D انجام شده است و عملکرد تونل با پوشش سگمنتی در مواجهه با سنگ های متورم شونده پرداخته شده است. علاوه بر آن، تاثیر ضخامت سگمنت و سیستم نگهداری، تاثیر عمق تونل و سایر جزئیات مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج بررسی‌ها نشان می‌دهد که میزان عمق حفاری تونل و میزان سربار و تنش های موجود در پیرامون و سطح زمین بر میزان جابجایی تونل به شدت تاثیرگذار است. میزان جابجایی در تاج تونل بیشترین و در قسمت کف تونل کمترین مقدار است.

**کلمات کلیدی:** تونل، سنگهای متورم شونده ، پوشش سگمنتی، نرم افزار FLAC3D

**مقدمه:**

تونل ها یکی از فضاهای زیر زمینی هستند که بدون تغییر شکل و بر هم زدن ساختار سطح زمین به منظور ارتباط مستقیم بین دو نقطه احداث می شود.در مهندسی تونل انتخاب مسیر مناسب از لحاظ وجود شرایط ژئوتکنیکی محل، برای مهندسان اهمیت زیادی دارد ولی در برخی از موارد به دلیل اهمیت مسیر ، کاهش روز افزون فضاهای سطحی برای عملیات راه سازی و غیره تونل بالاجبار بایستی در مناطق ژئوتکنیکی نامناسبی ساخته شود.ساخت تونل های امروزی بویژه تونل های شهری اغلب به صورت حفاری مکانیزه (TBM) بوده که تواماً با اجرای سیستم نگهداری سگمنتی ( صفحات پیش ساخته بتنی ) انجام می گیرد که دارای مزایای استاتیکی زیادی است. سگمنت ها به مانند تکه های پازل در کنار یکدیگر قرار گرفته و یک رینگ یا حلقه را تشکیل می دهند.این رینگ به رینگ های مجاور متصل می شود و قطعه ای یکپارچه را تشکیل می دهد و موجب تحکیم تونل می گردد. طراحی سگمنت ها بر اساس میزان بارهای استاتیکی و دینامیکی وارد بر آنها در طول دوره بهره برداری صورت می گیرد. بارهای استاتیکی که شامل سربار وارد بر تونل است به عمق تونل و به نوع زمین بستگی دارد. به این مفهوم که خاک و سنگهای مختلف بارهای متفاوتی بر سگمنت وارد می کنند.در اغلب سنگ های با شرایط ژئوتکنیکی متفاوت در خاک های دانه ای ، بار وارد بر پوشش تونل در طول زمان تغییر چندانی نمی کند لیکن در خاک های رسی و برخی از سنگ که منشا رسی دارند خاصیت تورم پذیری وجود دارد در این نوع زمین ها تغییر شکل توده سنگ متورم شونده چه در کوتاه مدت و چه در دارز مدت باعث تغییر در توزیع تنش های پیرامون تونل می شود.این امر موجب اعمال فشار مضاعف بر پوشش سگمنتی خواهد شد که بایستی در طراحی ها مد نظر قرار گیرد.در این مقاله عبور تونل با حفاری مکانیزه و سیستم نگهداری سگمنتی از سنگ های متورم شونده که پدیده خزش در آنها تاثیر زیادی دارد به روش عددی با استفاده از نرم افزار FLAC3D مورد بررسی قرار گرفته است.پارامترهای زیادی نظیر خصوصیات رفتاری محیط،تاثیر آنی و طولانی مدت سربار بر سیستم نگهداری، بعد زمان، نحوه اتصال سیستم نگهداری به هم دیگر در تمامی ابعاد مورد مطالعه گرفته است. در رابطه با پدیده تورم در تونل ، ویسمن [1] تحقیقات خود را در یک تونل در سوئیس که به روش های غیر مکانیزه حفاری می شد انجام داد .تحقیقات ابتدایی ویسمن شروع گسترش تحقیقات در مورد سنگ های متورم شونده بود.اینستین [2] ، گروب[3] و کووفری [4] مقالات و متدهای ساده تری را از سنگ های متورم شونده در تونل ارائه دادند که هدف اصلی در این مقالات صرفاً اثبات پیشبینی های ارائه شده توسط محققان بود که با آزمایشات و مدلسازی ها بر روی سنگ های متورم شونده به دست آورده بودند.

جی اناگنوستو [5] تونل سازی در سنگ ها متورم شونده را مورد تحقیق و بررسی قرارداد. وی وجود خاک رس یا کانی های هم رفتار با رس و ترکیب آن با آب را لازمه شروع پدیده تورم در سنگ ها بیان نمود و سنگ های متورم شونده را به صورت یک ماده الاستو پلاستیک در نظر گرفت و تمامی تحقیقات خود را برپایه رفتار الاستو پلاست بودن سنگ های اطراف تونل پیش برد .جی اناگنوستو با توجه به نظریات ترزاقی در مورد رفتار تونل و با توجه به نظریات خود مدل سازی خویش را انجام داد .نتایج بدست آمده چنین بود که تورم سنگ تا محیطی از سنگ پیرامون تونل که خاصیت پلاستیک دارد ادامه می یابد و در ناحیه الاستیک این خاصیت خیلی ضعیفتر می شود و حتی در مرز این دو ناحیه سنگ رفتار متفاوتی از خود نشان میدهد.

مطالعه و بررسی رفتار سنگها و اثرات زمان روی خواص و رفتار آن ها که عمدتاً تحت عنوان کلی خزش شناخته می شود اهمیت خاصی در مکانیک سنگ و فعالیتهای معدنی دارد. با گذشت زمان و تغییر تدریجی بارها با فشارهای وارده بر سنگ، مثلاً به واسطه جریان آب تنش یا جابجایی تغییر می کند وضعیت هندسی منطقه بارگذاری با سازه حفاری شده به خاطر پیشرفت حفاری دچار تحول می گردد.خواص تغییر شکل پذیری سنگ براثر هوازدگی یا نفوذ آب تغییر می کند و یا آنکه سنگ به آرامی نسبت به تغییرات تنش ، عکس العمل نشان می دهد .نوع سنگ ، ساختار سنگ ،میزان یکپارچگی سنگ، عمر سنگ، نوع حفاری تونل و زاویه حفاری تونل و سازه های زیر زمینی در پایداری سنگ در بعد زمان تاثیر گذار هستند[6]

همگرایی و فشار محیط پیرامون در سیستم نگهداری تونل در طول زمان افزایش می یابد. این پدیده ها به علت پیشرفت جبهه حفاری و عکس العمل های وابسته به زمان در محیط اطراف تونل می باشند.این خصوصیت وابسته به زمان تونل در مقالات متعددی با عنوان پدیده خزش ( با در نظر گیری یکی از جنبه های خزش مثل هوازدگی ، هیدراتاسیون وارفتگی و غیره ) مورد تحقیق و بررسی قرار گرفته اند کونتوگانی و همکارنش [7] دو تونل جاده ای را در یونان مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و اذعان کردند که بیش از 50 درصد از کل تغییرات شکل تونل ها به دلیل خصوصیت وابسته به زمان بودن محیط اطراف تونل دارد به منظور توصیف تغییر شکل یا خزش یا خصوصیت وابسته به زمان در تونل ها ابزار های تحلیل متعددی توسعه یافته است که می تواند به سه دسته تقسیم شود :

* راه حل های بسته یا نظری

مانند مطالعات گنریک و جانسون [8] ، مطالعات لادانی و گیل[9] ، مطالعات بردی و براون [10] و در نهایت مطالعات گودمن [11].

* رویکردهای تجربی

مانند مطالعات ساکورا [12] ، مطالعات سولم [13] ، مطالعات لادانی[14] و مطالعات پنت [15] بر اساس تحقیقات تجربی ، شکل کلی منحنی خزش برای سنگ ها از سه ناحیه مختلف تشکیل شده است.

* روش های عددی

مانند مطالعات قابوسی و قیودا [16] ، مطالعات قیودا[17] ، مطالعات سیودینی [18] و مطالعات پیلا[19] خزش در سنگ ها توسط افراد مختلفی مورد تحقیق قرار گرفته است که از جمله آن ها می توان به تحقیقات کریستسکو [20] مطالعات لادانی[21] ،و مطالعات کریستسکو و هانسکو [22] اشاره کرد.

سولم و همکاران[23] یک راه حل بسته به منظور جابجایی دیوارهای تونل و فشارهای پیرامونی روی سیستم نگهداری تونل ارائه دادند و به منظور توصیف رفتار وابسته به زمان سنگ در اطراف تونل ، آنها از یک تابع تجربی براساس مدل کلوین استفاده کرده اند با توجه به اینکه مدل کلوین قادر به توصیف منطقه ثانویه منحنی خزش نیست به همین دلیل برگر مدل رفتاری ارائه داد که قادر به مدلسازی تمامی جنبه ای خزشی ( خزش اولیه و ثانویه ) می باشد .

در این زمینه مشخص ترین مدلسازی مربوظ به فهیمی فر و همکارانش[24] هست که در تحقیقات خود پدیده خزش را مورد مدلسازی قرار داده و میزان تغییر شکل تونل در مدت زمانهای مختلف و اندرکنش قسمت های مختلف تونل در بازه زمانی مختلف بدست آورده و با همدیگر مقایسه کرده اند در تحقیقات فهیمی فر به وضوح دیده می شود که بعد زمانی اثراتی بر محیط پیرامون تونل و سیستم نگهداری آن می گذارد که همان خصوصیات وابسته به زمان سنگ را نمایان می کند.

روش آنالیز عددی و اجزای محدود در مورد مدلسازی تونل می توان به مدل سازی هایی مثل مدل سازی نگرو و کیروز[25] و مدل سازی مونیز[26] اشاره کرد که آنها در مجموع 63 مقاله علمی در مورد تونل ها به روش عددی ارائه دادند که اکثر آنها به صورت دو بعدی مورد بررسی قرار گرفته بود . در همین راستا و در مسیر کامل تر شدن این مدلسازی ها ، مدل سازی سه بعدی انجام پذیرفت که مکانیزه بودن نوع حفاری را نیز مورد ملاحظه قرار می دادند که از جمله آنها می توان به تحقیقات فرانزیوس و پات [27] اشاره کرد.

در این تحقیقات هدف اصلی از مدلسازی عددی تونل های مکانیزه ،توجه به تعداد زیادی از فرآیند هایی بود که در حین حفاری تونل اتفاق می افتد، مانند فشارهای جبهه کار ، سیستم نگهداری ، تغییر شکل سیستم نگهداری ، محافظت از سیستم نگهداری، میزان خمش و سقوط سیستم نگهداری، فضای موجود پشت سیستم نگهداری، تزریق دوغاب بتن در فضای خالی پشت سیستم نگهداری و فرآیند آن است و با دقت و حساسیت کمتر به بررسی سیستم نگهداری سگمنتی ، توزیع وزن تی بی ام و سایر تجهیزات، برای انجام تحلیل دقیق در حالت عددی سه بعدی پرداخته شده است.

ارنوا و مولینز [28] تأثیر اندرکنش بین حلقه های مجاور از نظر سازه ای در تونل با سیستم نگهداری سگمنتی برای بارگذاری طولی یکنواخت را آنالیز کردند.در این راستا یک مدل سازی سه بعدی به روش المان محدود بر روی یک نمونه ی واقعی مورد بررسی قرار گرفت.خط جدید شماره 9 متروی بارسلونا در نرم افزار مورد مدلسازی قرار گرفت . اعمال تکنیک های مدلسازی اجازه مطالعه عملکرد اندرکنش گره ها و رفتار مصالح شبیه سازی فراهم می کرد .حساسیت این آنالیز ها ،بستگی به تأثیر برخی از پارامترها و یا اهمیت برخی از پارامتره مثل سختی زمین و بار واقعی و نیروی طولی باقی مانده در اندرکنش سه بعدی سازه ای تغییر می کنند . با این حال اندرکنش و عملکرد زمین و ساختار آن همانند یک المان فنری در جهت شعاعی و مماسی و طولی در نظر گرفته شود و مورد مدلسازی قرار گرفت.علاوه بر این تأثیر جنبه های دیگردر ساخت تونل مانند ماشین سپر و حفر و بار های سازه ای ( به عنوان مثال فشار جبهه حفاری و فشار اتصال ) ذکر نشده است.مفاصل در یک پوشش تونل ، تأثیر زیادی بر رفتار تونل دارد.با این حال به این تأثیرات اشاره نشد و مورد شفاف سازی قرار نگرفته اند. تاکنون هیچ مدلسازی سه بعدی انجام نشده است که بر این مطالب تمرکز کرده و مورد آنالیز قرار دهد.دیاس و همکارانش [29] حفاری مکانیزه را تحت شرایط پیرامون متنوع بررسی کردند.مدلسازی سه بعدی حفاری ( TBM ) در تونل مدلسازی رفتار تونل با حفاری مکانیزه در انواع سنگ های نرم از دیگر تحقیقات دیاس و همکارانش [30] بود.

 امروزه با پیشرفت سریع فناوری رایانه، دسترسی آسان و مقرون به صرفه بودن آن ، استفاده از روشهای عددی رواج یافته است. اساس این روشها ، شبیه سازی یک محیط با بی نهایت درجه آزادی ( مانند توده سنگ) توسط محیطی با درجه آزادی محدود در تعداد معینی از نقاط می باشد. هدف این پروژه، بررسی عملکرد تونل های سگمنتی در سنگ های متورم شونده با استفاده از روش عددی می باشد. یکی از ویژگی های مهم سنگ های متورم شونده رفتار آنی و وابسته به زمان در آن ها است که محیطی پر خطر برای احداث سازه ایجاد می‌کند. در این مطالعه از طریق مدلسازی تونل با نرم افزار FLAC3D و مشاهده رفتار آن در طول زمان، پیش بینی خطرات احتمالی و اتخاذ تمهیدات لازم با صرف کمترین هزینه در کوتاهترین زمان، امکان پذیر است.

این مقاله به صورت زیر سازماندهی شده است: در بخش دوم مشخصات مدلسازی عددی شامل ابعاد مدل ، نحوه مدلسازی، مدل رفتاری، مختصات نقاط مورد آنالیز و مشخصات مصالح آورده شده است. بخش سوم دربرگیرنده­ی بحث و نتایج بوده و در آخر جمع­بندی ارایه می­گردد.

**مشخصات مدلسازی عددی**

در این مطالعه برای هندسه سازی تونل از شکل ابتدایی radcyl استفاده شده است. برای مدلسازی سیستم نگهداری سگمنتی نیز از دستور liner و شکل هندسی cylinder با محاسبه دقیق مختصات آن استفاده شده است. به منظور انتخاب ابعاد مناسب برای مدلسازی آنالیز ابعادی بر روی مدل مورد نظر صورت گرفته است. ابعاد مناسب برای تونل از 5 تا 10 برابر شعاع تونل می باشد که شعاع تونل در این پروژه 4 متر بوده و ابعاد 160\*80\*160 برای آن انتخاب شده است. مدل رفتاری استفاده شده در این مطالعه ویسکو الاستیک برگر است که تلفیقی از مدل کلوین و مدل ماکسول می باشد. به منظور کنترل دقیق نتایج ، دوازده نقطه از مدل انتخاب شد که در برخی از موارد صرفاً از دو نقطه مهم برای دستیابی سریع تر به نتایج استفاده می کنیم. از دوازده نقطه که مختصات آنها همراه با موقعیت دقیق نقاط مهم که به ترتیب در جدول شماره 1 و 2 و شکل 1 نشان داده شده است. نقطه شماره چهارم ( تاج تونل ) در صفحه Y=40 و نقطه متناظر آن در سطح زمین ( کف تونل ) نقطه شماره دهم به عنوان دو نقطه مهم برای آنالیز انتخاب شدند.

**جدول 1: مختصات نقاط مورد آنالیز حول سیستم نگهداری**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **نقطه 1** | **نقطه 2** | **نقطه 3** | **نقطه 4** | **نقطه 5** | **نقطه 6** | **نقطه** |
| **(4,40,0)** | **(3.46,40,2)** | **(2,40,3.46)** | **(0,40,4)** | **(-2,40,3.46)** | **(-3.46,40,2)** | **مختصات** |

**جدول 2: مختصات نقاط مورد آنالیز حول سیستم نگهداری**

|  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **نقطه 7** | **نقطه 8** | **نقطه 9** | **نقطه 10** | **نقطه 11** | **نقطه 12** | **نقطه** |
| **(-4,40,0)** | **(-3.46,40,-2)** | **(-2,40,-3.46)** | **(0,40,-4)** | **(2,40,-3.46)** | **(3.46,40,-2)** | **مختصات** |



**شکل1: موقعیت نقاط مهم مورد آنالیز سیستم نگهداری**

**شکل1: موقعیت نقاط مهم مورد آنالیز سیستم نگهداری**

**شکل 1: نمای پرسپکتیو از مدل**



**شکل2: موقعیت نقاط مهم مورد آنالیز سیستم نگهداری**

مدلسازی سگمنت ها به صورت دورانی بوده به این صورت که هر حلقه نسبت به حلقه قبلی خود30 درجه دوران دارد. هر رینگ متشکل از 6 قطعه سگمنت می باشد. با توجه به اینکه شعاع تونل 4 متر می باشد پس بنابراین سیستم نگهداری نیز با شعاع 4 متر به دیواره داخلی تونل مدل شده است. مدل رفتاری انتخاب شده در این مطالعه ویسکوالاستیک برگر می باشد معیار خزش در مدل برگر از در هم آمیزش مدل رفتاری ماکسول و کلوین هست و رفتار تنش- کرنش آن الاستیک کامل است که با توجه به خصوصیات مد نظر این تحقیق مناسب ترین مدل رفتاری می باشد.مشخصات سنگ پیرامون تونل و مشخصات سیستم نگهداری به ترتیب در جدول های 3 و 4 آورده شده است.

**[24]جدول 3: مشخصات سنگ پیرامون تونل**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **مدول برشی کلوین (Mpa)** | **مدول برشی ماکسول (Mpa)** | **ویسکوزیته کلوین (Mpa day)** | **ویسکوزیته ماکسول (Mpa day)** | **مدول حجمی الاستیک (Mpa)** | **جرم واحد حجم (Kg/m3)** |
| **344.86** | **3448.6** | **239486.1** | **47897222.2** | **1694** | **2600** |

**[24], [29]جدول4: مشخصات سیستم نگهداری**

|  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| **مقاومت فشاری بتن (Mpa)** | **مدول الاستیسیته****(Mpa)** | **جرم واحد حجم بتن****(Kg/m3)** | **ضخامت****(m)** | **شعاع****(m)** | **ضریب پواسون****-** |
| **40** | **16553.28** | **2600** | **0.6** | **4** | **0.2** |

**بحث و نتایج**

با توجه به اهمیت جابجایی، ابتدا جابجایی های اولیه و بعد در بازه زمانی روز اول، هفته اول ، ماه اول، 50 روز ،200 روز،400 روز ، 1000 روز و نهایتاً 4000 روز به صورت مجزا مورد بررسی قرار گرفته است.

**جدول5: میزان جابجایی سیستم نگهداری اولیه**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **4.63** | **5** | **4.12** |

تاج تونل به علت وجود فشار سربار مضاعف،جابجایی بیشتری نسبت به سایر نقاط دارد اما تقریباً جابجایی در کل دیواره سیستم نگهداری به جز تاج تونل به یک اندازه می باشد.

**جدول6: میزان جابجایی سیستم نگهداری روز اول**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **4.47** | **5.2** | **4.17** |

**جدول7: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از یک هفته**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **6.49** | **7.22** | **5.23** |

**جدول8: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از یک ماه**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **6.78** | **7.72** | **6.51** |

نتایج نشان می دهد که جابجایی و تغییر شکل پس از گذشت یک روز نسبت به تغییر شکل و جابجایی اولیه تغییر چندانی نداشته است و میزان جابجایی ها پس از گذشت یک هفته با آهنگ کندی ادامه پیدا می کند. حتی با گذشت یک ماه همچنان میزان جابجایی نسبت به روزهای گذشته با آهنگ کند و حتی ثابتی پیش می رود.

**جدول9: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از گذشت 50 روز**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **6.92** | **7.91** | **6.73** |

**جدول10: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از گذشت 200 روز**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **8.09** | **10.2** | **6.18** |

پس از 50 روز که میزان جابجایی با ریتم ثابتی ادامه پیدا می کرد. در نیم سال اول جابجایی ریتم تندی به خود گرفته و میزان جابجایی نسبتاً افزایش پیدا می کند.

با بررسی میزان جابجایی در جدول شماره 11 پس از گذشت 400 روز مشاهده می شود که روند افزایشی جابجایی با شیب تند پس از گذشت حدود یکسال اکنون باز به یک روند افزایشی به ریتم خیلی کم و ناچیزی رسیده است .

**جدول11: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از گذشت 400 روز**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **9.85** | **11.06** | **8.02** |

بررسی انجام شده طبق جدول شماره 12 نشان می دهد که تونل پس از گذشت 400 روز به یک حالت تعادل رسیده و اکنون پس از گذشت 1000 روز پس از افزایش جابجایی بسیار اندکی ،اکنون در حالت تعادل قرار گرفته است.

**جدول12: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از گذشت 1000 روز**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **10.88** | **11.2** | **8.25** |

پس از گذشت 4000 روز تغییرات جابجایی تونل عملاً به صفر میل کرده و شاهد تغییرات محسوسی در جابجایی سیستم نگهداری نمی باشیم. میزان جابجایی اولیه به کل جابجایی پس از گذشت 4000 روز 7 میلی متر می باشد.

 **جدول13: میزان جابجایی سیستم نگهداری پس از گذشت 4000 روز**

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| **میانگین جابجایی ها mm** | **جابجایی تاج mm** | **جابجایی در کف mm** |
| **11.09** | **11.39** | **8.66** |

تاثیر عمق حفاری تونل نیز بر میزان جابجایی مورد مطالعه قرار گرفته است بدین ترتیب که تونل در شرایط یکسان ( با توجه به مشخصات ارائه شده) در عمق های 40، 80 ، 160 و 240 متر مدل گردیده است و نتایج حاکی از آن است که با افزایش عمق تونل میزان جابجایی و خصوصیات وابسته به زمان سنگ های متورم شونده افزایش می یابد. نتایج تحلیل ها در شکل 2 آورده شده است.

**شکل3: نمودار مقایسه جابجایی در اعماق مختلف حفاری**

تاثیر سگمنت و مشخصات سگمنت نیز بر جابجایی تونل مورد بررسی قرار گرفت. برای متمایز کردن تاثیر ضخامت سگمنت بر جابجایی تونل مدلسازی با سگمنت در ضخامت های 40، 60 ،80 سانتی متری مورد آنالیز قرار گرفت و نتایج حاکی از تاثیر مستقیم ضخامت سگمنت بر میزان جابجایی کلی تونل دارد که در شکل 3 آورده شده است . نتایج نشان می دهد که ضخامت سیستم نگهداری بر جابجایی کلی تونل و میزان جابجایی خود سیستم نگهداری تاثیر دارد.هرچه ضخامت لایه پوششی سیستم نگهداری بیشتر شود میزان جابجایی کاهش پیدا میکند.

**شکل4: نمودار مقایسه جابجایی در ضخامت های مختلف سیستم نگهداری**

 **جمع بندی**:

تونل از جمله فضاهای مهم زیرزمینی بوده که در سالهای اخیر جهت توسعه پایدار شهرها و سهولت حمل و نقل مورد توجه قرارگرفته است. این نوع سازه، گاها ممکن است در مناطق ژئوتکنیکی نامناسب همانند محیطی با سنگ های متورم شونده احداث شود. بنابراین، به دلیل خصوصیات این نوع سنگها، سازه احداث شده در آن ممکن است با خطرات جدی روبرو گردد. لذا در این پروژه، رفتار تونل در سنگهای متورم شونده مورد توجه قرار گرفته تا با مدلسازی آن تمهیدات لازم جهت کاهش خطرات اتخاذ گردد. نتایج مدلسازی حاکی از آن است که میزان عمق حفاری تونل و میزان سربار و تنشهای موجود در پیرامون و سطح زمین بر میزان جابجایی آن به شدت تاثیر گذار است. میزان استحکام سیستم نگهداری که تابعی از ضخامت آن است، بر میزان جابجایی تونل با گذشت زمان موثر است. ویسکوزیته و مدول برشی محیط پیرامون تونل از جمله عوامل دیگر موثر بر میزان جابجایی و توزیع تنش در آن است. میزان جابجایی و تغییر شکل در قسمت‌های مختلف دیواره سیستم نگهداری متفاوت بوده، به‌طوریکه شاهد بیشترین میزان در تاج تونل و کمترین مقدار در کف تونل هستیم. با بررسی مجزای پارامترهای تاثیرگذار، نتایج کلی زیر حاصل شده است:

1. میزان جابجایی در گذر زمان به طور کلی با شیبهای مختلف روندی افزایشی دارد.
2. بررسی تاثیر عمق حفاری تونل بر میزان جابجایی نشان میدهد که در تمامی روزهای جابجایی هر چه میزان عمق تونل بیشتر شود میزان جابجایی تونل افزایش یافته و در اعماق زیاد این جابجایی به بیشینه مقدار خود می‌رسد.
3. بررسی سیستم نگهداری نشان می‌دهد که تغییر ضخامت آن بر جابجایی کلی تونل و میزان جابجایی خود سیستم نگهداری تاثیر داشته و هرچه ضخامت لایه پوششی سیستم نگهداری بیشتر شود میزان جابجایی کاهش پیدا می‌کند.

**منابع:**

[1]Wiseman,E:Uber die Stabilitat von Tunnelmauerwerk unter Berucksichtigung der Erfahrungen beim Bau des Hauenstein-Bbasistunnels.Schweizer.Bauzeitung 64,27-32(1914).

[2]Einstein,H.H,Bischof.N,,Hofmann ,E,: Verhalten von Stollensohlen in quellendem Mergel.In:Grob,H., Kovari , K(eds.)Int.Symposium on Undergroud Openings , Lucerne. Swiss Soc . for Soil Mech . and Found .Engng.,Zurich.296-319,( 1972).

[3]Grob ,.H.: Schwelldruck im Belchentunnel.In:Grob.H, Kovari , K(eds.)Int.Symposium on Undergroud Openings , Lucerne. Swiss Soc . for Soil Mech . and Found .Engng.,Zurich.99-119.(1972)

[4]Kovari,K.,Amstad,Ch.,Anagnostou,G. : Designe/construction methods Tunneling in swelling rocks.In: Cundall et al.(eds)Key questions in rock mechanics . Proc.,29th U.S. Symposium.Balkema,Rotterdam, (1988)

[5] Anagnostou, G.: Untersuchungen zur Statik des Tunnelbaus in quellfahigem Gebrirge .Dissertation 9553, Swiss Federal Institute of Technology ,Zurich,(1991)

[6] Anagnostou, G.: Importance of unsaturated flow in predicting the deformations around tunnels in swelling rock.In: /mermoud et al.(eds)Porous or fractured unsaturated media:Transports and behavior.Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne,University of Neuc hatel,(1992)

[7]Kontogianni,V.,Psimoulis,P., Stiros ,S.,2005.What is the contribution of timedependent deformation in tunnel convergence.

[8]Gnirk,P.F, Johnson,RE.,1964.The deformational behavior of a circular mine shaft situated in a viscoelastic medium under hydrostatic stress .In:Proc.6th Symp .Rock Mech.,University of Missouri Rolla

[9]Ladanyi.B.,Gill,D.,1984.Tunnel lining design in creeping rocks .In symposium on Design and performance of Under ground Excavations.ISRM,Cambridge.

[10]Brady,B.Brown,E. 1985 .Rock mechanic for under ground mining,first ed.Georg Allen &Unwin.,London.

[11]Goodman,R.E,.1989. Introduction to Rock Mechanics ,second ed. Wiley,New York .Itasca, Code ,2002.

[12]Sakurai,S.,1978.Approxmate time –dependent analysis of tunnel supports structure considering progress of tunnel face .Inter national Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics

[13]Sulem,J.,Panet,M.,Guenot,A.,1987.An analytical solution for time dependent displacements in circular tunnel .Internatinal Journal of Rock Mechanics and Mining Sience &Geomechanics

[14] ] Ladanyi.B.,Gill,D.,1984.Tunnel lining design in creeping rocks .In symposium on Design and performance of Under ground Excavations.ISRM,Cambridge.

[15]Panet ,M.,1993 Understanding deformation in tunnels.In:Hudson,JComprehensive Rock Engineering.

[16]Ghaboussi,J.,Gioda,G.,1977.On the Time –dependent effectsin advancing Tunnels. .Inter national Journal for Numerical Analytical Methods in Geomechanics.

[17]Gioda ,G., 1981.A finite element solution of non linear creep problems in rock .Int .J .Rock Mech.Sci .&Geomesh.

[18]Cividini ,A.,Gioda,G.,Carini ,A finite element analysis of time dependent behavior of underground openings .In :Beer,Booker Carter .computer Method And Advances in Geomechanics.

[19]Peila,D.,Orest,P.,Rabajuli ,G., Trabucco,E., 1995 The pre –Tunnel method , a new Italian Technology for full-face tunnel excavation : a numerical approach to design. Tunneling and Underground Space Technology

[20] Cristescu,N.D., 1989 Rich Rheology ,first ed.Kluwer Academic publisher.

[21] Ladanyi.B.,Gill,D.,1984.Tunnel lining design in creeping rocks .In symposium on Design and performance of Under ground Excavations.ISRM,Cambridge.

[22]Cristescu,N.D.,Hunsche ,U., 1989Time Effect in Rock Mechanics.first ed.Wily New York.

[23] Sulem,J.,Panet,M.,Guenot,A.,1987.An analytical solution for time dependent displacements in circular tunnel .Internatinal Journal of Rock Mechanics and Mining Sience &Geomechanics.

[24] احمد فهیمی فر ، فرشاد منشی زاده تهرانی، احمد رضا هدایت ، آرش وکیل زاده

Analytical solution for the excavation of circular tunnels in a visco-elastic Burgers material under hydrostatic stress field-Department of civil and Environmental Engineering.Amirkabir University of Technology 2008.

[25]Negro A.Queiroz B( 1199 )Prediction and performanceof soft ground tunnels.Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground. Balkema,Tokyo, Japan

[26]Muniz de Farias M,Junior A,Pacheco de Assis A (2004)Displacement control in tunnels excavated by the NATM: 3Dnumerical simulations.Tunn Underger Space Technol

[27]Franzius J,Potts D(2005) Influence of mesh geometryon 3D finite element analysis of tunnel excavation.ASCE Int J Geomech

[28]Arnau O,Molins C (2012)3D structural response of segmental tunnel linings .Eng Struct

[29]Ngoc-Anh Do ,Daniel Daias , Pierpaolo Oreste , Irini Djeran-Maigre: 2D Tunnel Numerical Investigation: The Influence Of the Simplified Excavation Method on Tunnel Behavior,2013

[30]Ngoc-Anh Do, Daniel Dias : A coparison of 2D and 3D numerical simulatins of tunneling in soft soils,2016