

## طراحی نرم افزار METSUP جهت تحلیل نگهداری بتنی درجا در تونل های دایروی (مطالعه موردی: تونل آب بر سد جیرفت)

میثم رجیبی<sup>۱</sup>; رضا رحمان نژاد<sup>۲</sup>

۲۰۱- گروه مهندسی معدن دانشگاه شهید باهنر کرمان; ۰۹۱۲۵۷۵۹۶۶۴; mais\_engineer @ yahoo.com

### چکیده

تئوری طراحی و محاسبه سیستم نگهداری ابنیه زیرزمینی در طول سالیان دراز تکامل یافته و روشهای فراوانی برای نگهداری تونل ها ارائه شده است که قسمت عمده ای از آنها در صنعت کاربرد پیدا کرده اند و هم اکنون نیز با موفقیت به کار می روند. البته گسترش رایانه نیز تاثیر بسزایی بر احیاء یا زوال روشهای محاسبه سیستم نگهداری گذاشته و باعث شده است تا روشهایی که نیاز به حجم عملیات محاسبه ای بالایی دارند، بیشتر و روشهای ساده و تقریبی، کمتر استفاده شود. در این مقاله به معرفی روش متروگیپروتانس که با وجود گذشت بیش از ۷ دهه از ابداع آن هنوز هم به عنوان روشی کارآمد در میان روش های تحلیل سازه مطرح است، پرداخته و سپس در ادامه قسمت های مختلف نرم افزار METSUP که براساس روش متروگیپروتانس طراحی گردیده، معرفی می شود. این نرم افزار که در محیط برنامه نویسی ویژوال MATLAB ایجاد شده، قادر است تا وضعیت تنش را در نگهداری تونل به صورت عددی و گرافیکی مدل نماید. در انتها نیز نتایج حاصل از نرم افزار با دیگر روش های معمول تحلیل پایداری (مطالعه موردی بر روی تونل آب بر سد جیرفت) مقایسه می گردد.

کلمات کلیدی: تونل دایروی شکل، نگهداری بتنی درجا، روش متروگیپروتانس، نرم افزار METSUP، تونل آب بر سد جیرفت.

## Designing METSUP For Analysis Of In Situ Concrete Support For Circular Tunnels (Case Study On Water Tunnel Of Jiroft Dam)

M. Rajabi And R. Rahman Nejad

### Abstract

Computation and design theory of support system for underground structures has been completed during long years. A lot of methods have been presented for tunnel support which main part of them has been applicable in industry and nowadays are also used successfully. Of course computer development has also put well-deserved effect on renovation or decline of computation methods for support system and has caused the methods which need high volume of computation is used more. In this paper, "Metrogioprotrans" method, which after 7 decade of its invention is still method as effective method among the methods of support analysis, has been presented. After that, all different parts of "METSUP" software which has been designed according to this method are presented. This software which has been formed in MATLAB visual programming is able to model the stress condition in tunnel support digitally and graphically. At the end, the conclusions of this software are compared with other current methods of stability analysis (case study on water tunnel of Jiroft dam).

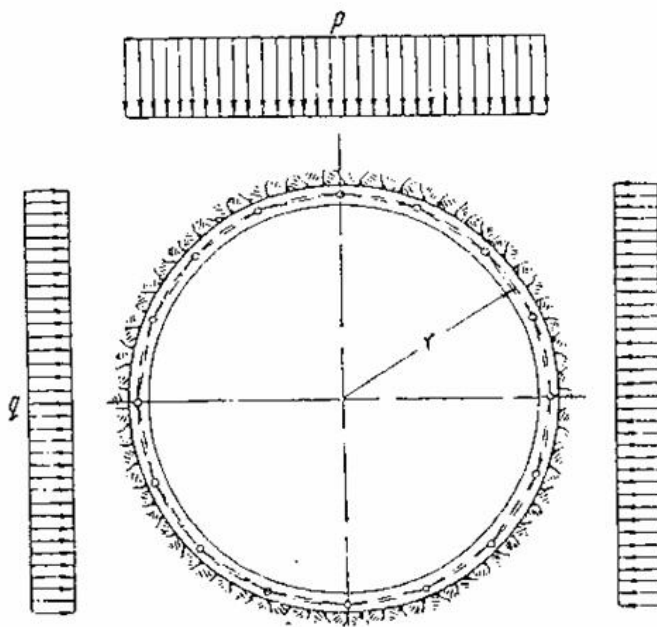
**Keywords:** Circular Tunnels, In situ Concrete Support, Metrogioprotrans method, METSUP software, Water Tunnel of Jiroft Dam.

## ۱- مقدمه

پایه تمام روشهای محاسبه ابنیه زیرزمینی اصول یا مفاهیم علم تحلیل سازه می باشد. از آنجایی که به کارگیری روش های تحلیلی نیاز به دقت و حجم عملیات محاسبه ای بالایی دارد، طراحی و استفاده از نرم افزارها می تواند در این زمینه مفید واقع شود. در همین راستا و بر اساس یکی از روشهای تحلیل سازه به نام روش متروگیپروتانس، نرم افزاری به نام METSUP طراحی گردید. این نرم افزار قادر است تا وضعیت تنش را در نگهداری تونل به صورت عددی و گرافیکی مدل نماید. در این مقاله ابتدا اصول روش متروگیپروتانس عنوان گردیده و سپس با معرفی نرم افزار طراحی شده، قابلیت های آن در انجام محاسبه نگهداری تونل آب بر سد جیرفت بیان می شود.

## ۲- معرفی روش متروگیپروتانس

روش فوق در سال ۱۹۳۶ میلادی توسط دو مهندس به نامهای متوری و بدرو در انستیتو طراحی متروی مسکو برای محاسبه نگهداری پیش ساخته تونلهایی با مقطع دایروی، طی مقاله ای به نام حلقه نگهداری در محیط الاستیک، معرفی گردید. این روش را می توان برای محاسبه نگهداری تونلهای که به روش مکانیزه یا سنتی حفر شده به کار برد، به شرط آن که بین سیستم نگهداری و توده سنگ تماس خوبی برقرار باشد. این روش در طول سالیان متمادی تکامل یافته و برای محاسبه سیستمهای نگهداری مختلف با مقطع دلخواه و برای شرایط مختلف زمین شناسی تصحیح شده است. فرضیات اساسی این روش به قرار زیر است [۱]:  
- نگهداری واقعی تونل (شکل ۱) که سختی آن بصورت یکنواخت و پیوسته تغییر می کند با یک چند ضلعی که سختی اضلاع آن بصورت پله ای است جایگزین می شود.

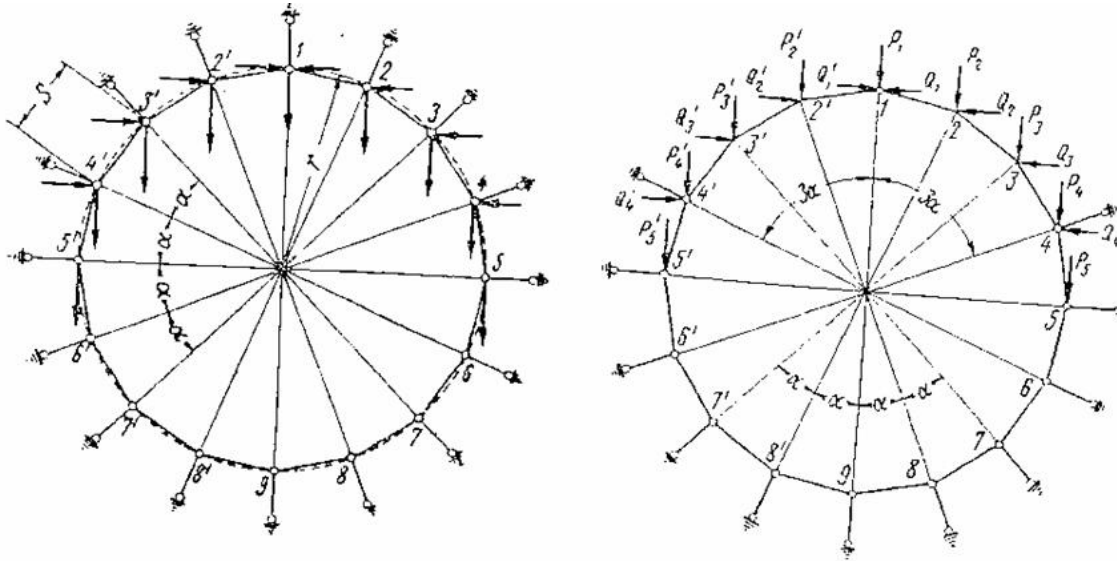


[ ۱ ]

- بار گسترده فعال ناشی از فشار توده سنگ و ... بر روی نگهداری، با بار متمرکز که به رئوس چند ضلعی اعمال می گردد، جایگزین می شود.

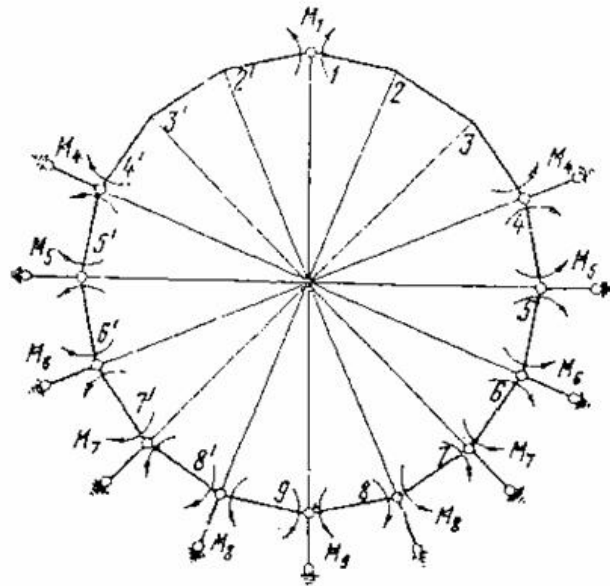
- توده سنگ اطراف تونل با تعدادی تکیه گاه ارتجاعی (فنر) که به رئوس چند ضلعی متصل می شوند، جایگزین می گردد.

شکل (۲) مدل محاسبه‌ای تونل را با احتساب فرضیات فوق نشان می‌دهد مطابق این شکل، نگهداری شامل دو بخش است: الف- بخش فوقانی که تنها تحت اثر بار فعال توده سنگ قرار دارد. زاویه مرکزی مقابل به آن، به خصوصیات توده سنگ و نگهداری وابسته بوده و بین ۷۰-۱۵۰ درجه متغیر است. زاویه مزبور در ابتدا مجهول بوده، بنابراین فرض شده و سپس در پایان محاسبه صحت آن امتحان می‌گردد. بخش فوق به نام چند ضلعی شناخته می‌شود.



( ) ( )

ب- قسمت تحتانی که فشار پاسیو (عکس العمل توده سنگ) به آن وارد شده و به عنوان زنجیر شناخته میشود. برای حل مدل محاسبه‌ای نگهداری تونل در محل رئوس چند ضلعی، مفصل اعمال نموده و جهت تعادل آن یک کوپل ممان نیز وارد می‌شود.



( ) ( )

## ۳- بیان ریاضی مسئله

مجهولات سیستم استاتیکی نامعین (شکل ۳)، ممان‌های اعمال شده بر مفاصل می‌باشد، که مقادیر آن را می‌توان با نوشتن سیستم معادلات کانونیک تعیین نمود.

$$\sum_{i=1}^n M_k \cdot \delta_{ik} + \Delta_{ip} = 0 \quad (1)$$

که در این رابطه

$\delta_{ik}$  و  $\Delta_{ip}$  به ترتیب، جابجایی گره  $i$  ام سیستم اصلی در جهت ممان‌های مجهول از اثر جفت ممان واحد  $M_k = 1$  در گره  $K$  و از اثر بار خارجی  $P$ .

$n$ : تعداد ممان مجهول (درجه نامعین بودن سیستم)

مقادیر جابه جایی را می‌توان توسط انتگرال مور (رابطه ۲) محاسبه کرد:

$$\delta_{ik} = \int \frac{\overline{M}_i \overline{M}_k}{EI_m} d_s + \sum \frac{\overline{N}_i \overline{N}_k a_m}{EF_m} + \frac{\overline{R}_i \overline{R}_k}{D_m} \quad (2)$$

که در این رابطه  $\overline{M}_i$  و  $\overline{N}_i$  به ترتیب، ممان خمشی و نیروی محوری در سیستم اصلی از اثر کوپل ممان واحد، اعمال شده در گره  $i$  ام است.

$\overline{M}_k$  و  $\overline{N}_k$  به ترتیب، ممان خمشی و نیروی محوری در سیستم اصلی از اثر کوپل ممان واحد، اعمال شده در گره  $K$  ام است.

$I_m$  و  $F_m$  و  $a_m$  به ترتیب ممان اینرسی، مساحت مقطع و طول ضلع (میله)  $m$  ام است.

$\overline{R}_i$  و  $\overline{R}_k$ : نیرو در تکیه گاه سیستم اصلی از اثر کوپل ممان واحد که در گره  $i, K$  وارد می‌شود.

$D_m$  مشخصه سختی تکیه گاه  $m$  ام است که از رابطه ۳ بدست می‌آید.

$$D_m = K \cdot b \cdot S_m \quad (3)$$

که در آن

$b$ : عرض تکیه گاه (متر)

$K$ : ضریب عکس العمل توده سنگ (مترمکعب / تن)

$S_m$ : طول تکیه گاه  $m$  ام (متر)

$E$ : مدول الاستیسیته نگهداری (مترمربع / تن)

جملات رابطه ۲ به ترتیب ناشی از خمش اضلاع (میله‌ها) سیستم چند ضلعی، جابه جایی ناشی از فشردگی اضلاع سیستم

نگهداری از اثر نیروی محوری  $N$  و جابه جایی ناشی از فشردگی تکیه گاه (فنر) نگهداری از اثر نیروی  $R$  می‌باشد.

برای تعیین جابه جایی از اثر نیروهای خارجی  $P$  که بر رئوس چند ضلعی اعمال شده ( $\Delta_{ip}$ ) می‌توان از رابطه ۴ که مشابه رابطه

۲ می‌باشد، استفاده کرد.

$$\Delta_{ip} = \int \frac{\overline{M}_i \overline{M}_p}{EI_m} d_s + \sum \frac{\overline{N}_i \overline{N}_p}{EF_m} + \frac{\overline{R}_i \overline{R}_p}{D_m} \quad (4)$$

که در این رابطه  $\overline{M}_p$  و  $\overline{N}_p$  به ترتیب، ممان خمشی و نیروی محوری در اضلاع سیستم نگهداری از اثر بار نقطه‌ای  $P$  و  $\overline{R}_p$

نیروی ایجاد شده در تکیه گاه از اثر نیروی خارجی است [۱]، [۴].

#### ۴- معرفی نرم افزار METSUP

این برنامه در محیط برنامه نویسی ویژوال MATLAB طراحی شده است. محیط ویژوال MATLAB، یک محیط کاملا ساخت یافته است، یعنی در این محیط هم می توان برنامه را نوشت و هم آن را تست و خطایابی کرد. این برنامه که براساس روش متروگیپروتانس ایجاد شده، برای طراحی نگهداری بتن درجا (به صورت عددی و گرافیکی) مورد استفاده قرار می گیرد. در این بخش ابتدا چگونگی وارد کردن اطلاعات به برنامه را نشان داده و در ادامه با حل یک مثال، مطالب عنوان شده تکمیل می گردد.

#### ۴-۱- چگونگی وارد کردن اطلاعات اولیه

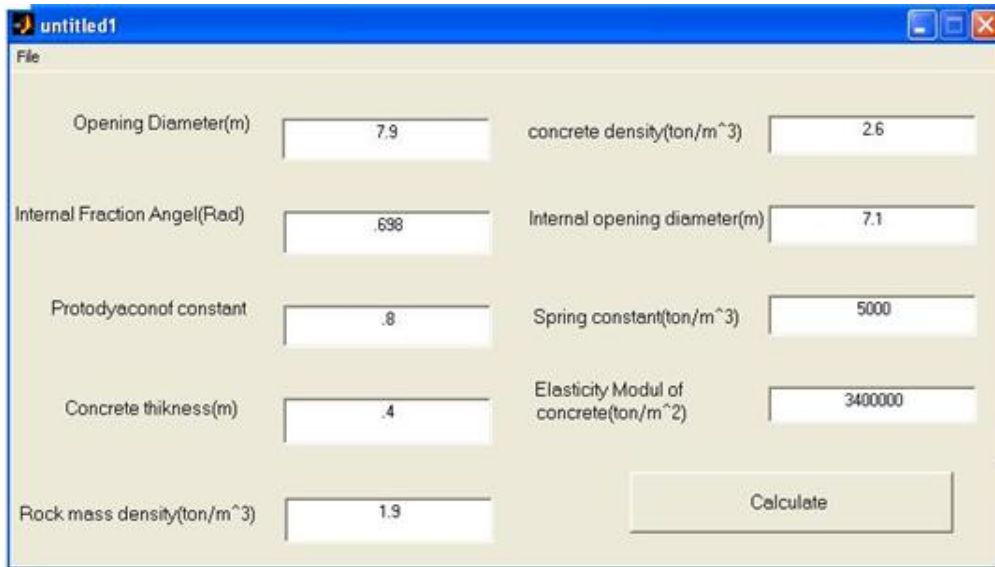
پس از باز شدن صفحه اصلی (همانگونه که در شکل ۴ مشاهده می شود)، قطر خارجی حفره (برحسب متر)، زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ برحسب (رادیان)، مقدار نیروی قائم (برحسب تن بر مترمربع)، ضخامت بتن (برحسب متر)، مقدار نیروی افقی (برحسب تن بر مترمربع)، مقدار قطر داخلی (برحسب متر)، میزان سختی فنر یا همان عکس العمل توده سنگ (برحسب تن بر مترمکعب) و میزان مدول الاستیسیته بتن (برحسب تن بر مترمربع) وارد می شود. در صورت عدم داشتن مقادیر بارهای افقی و قائم صفحه مربوط به شکل ۵ را باز نموده که در این صفحه، قطر خارجی حفره (برحسب متر)، زاویه اصطکاک داخلی توده سنگ برحسب (رادیان)، مقدار ثابت پرتودیاکنف، ضخامت بتن (برحسب متر)، دانسیته توده سنگ (برحسب تن بر مترمکعب)، دانسیته بتن (برحسب تن بر مترمکعب)، قطر داخلی حفره (برحسب متر)، سختی فنر یا عکس العمل توده سنگ (برحسب تن بر مترمکعب)، مدول الاستیسیته بتن (برحسب تن بر مترمربع) وارد می شود. سپس با کلیک بر روی کلید Calculate، محاسبات انجام گرفته و نتایج به صورت جدول و دیاگرام ارائه می شود. شایان ذکر است که برای ایجاد پروژه جدید نیز می توان با انتخاب گزینه New, file داده های مورد نیاز را وارد کرد [۳].

The screenshot shows a software window titled 'untitled1' with a 'File' menu. The main area contains several input fields for parameters:

- Opening Diameter(m)
- Internal Fraction Angel(Rad)
- Internal opening diameter(m)
- Vertical force(ton/m<sup>2</sup>)
- Spring constant(ton/m<sup>3</sup>)
- concrete thikness(m)
- Elasticity Modul of concrete(ton/m<sup>2</sup>)
- Horizontal force(ton/m<sup>2</sup>)

A 'Calculate' button is located at the bottom right of the input area.

[ ] :

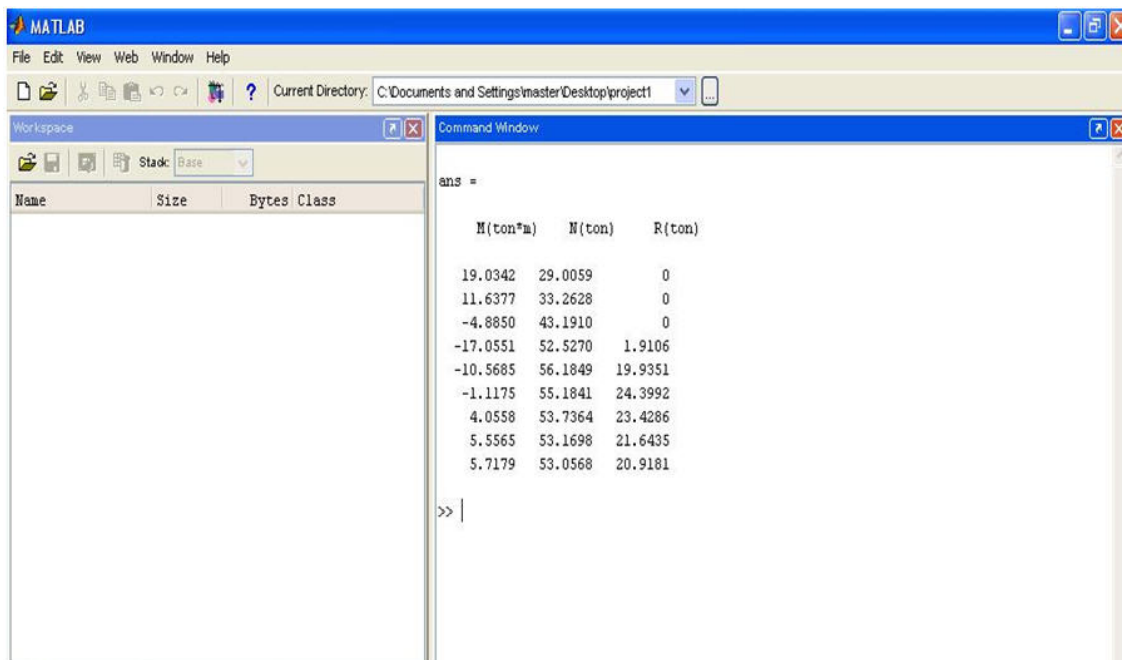


[ ] ( ) :

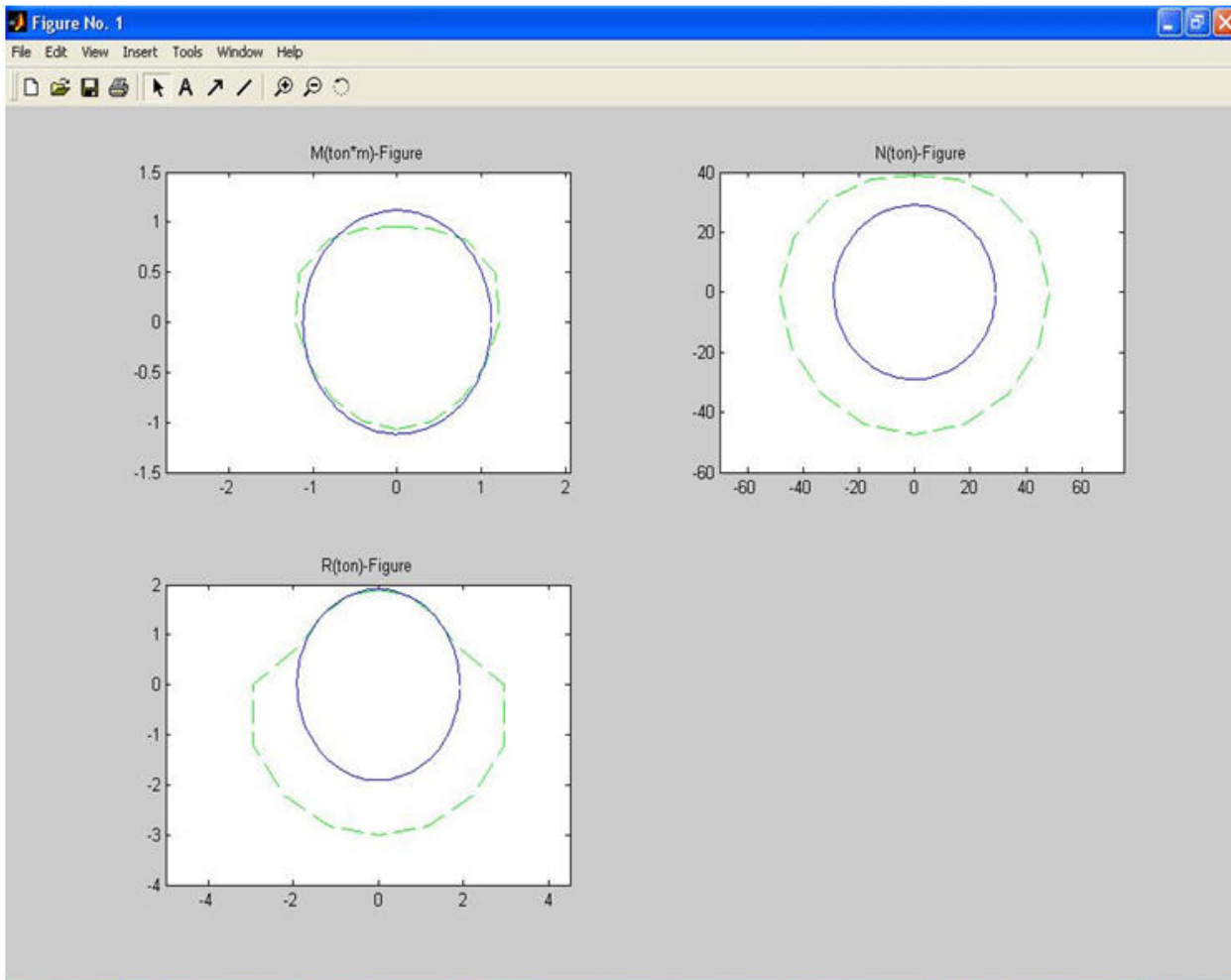
۴-۲- حل یک مثال

تونل دایروی شکلی با مشخصات زیر موجود است [۱]. با وارد کردن این مشخصات در نرم افزار می توان نتایج تحلیل برنامه را که در شکل‌های (۶) و (۷) آمده است، مشاهده نمود.

قطر داخلی تونل = ۷/۱ متر، مدول الاستیسیته بتن = ۳۴۰۰۰۰۰ تن بر مترمربع، زاویه اصطکاک داخلی = ۰/۶۹۸ رادیان، قطر خارجی تونل = ۷/۹ متر، دانسیته بتن = ۲/۶ تن بر مترمکعب، دانسیته سنگ = ۱/۹ تن بر مترمکعب، ضریب پروتودیاکنف = ۰/۸، سختی فنر = ۵۰۰۰ تن بر مترمکعب.



[ ] METSUP :



[ ] METSUP :

### ۵- انجام مطالعه موردی بر روی تونل آب بر سد جیرفت

#### ۵-۱- معرفی سد جیرفت

سد جیرفت در اولویت اول به منظور کنترل سیلاب ها و تامین آب کشاورزی و در اولویت دوم به منظور تولید انرژی الکتریکی طراحی شده است. این سد از کف پی ۱۳۴ متر ارتفاع دارد و از نوع بتنی دو قوسی بوده که طول تاج آن بیش از ۲۰۰ متر می باشد. حجم دریاچه سد نیز حدود ۴۰۰ میلیون مترمکعب است.

تونل انتقال آب از دریاچه سد به محل استقرار توربین ها، در ساحل سمت چپ رودخانه و در داخل سنگ آهک (در عمق حداقل ۸۰ و حداکثر ۱۳۰ متر) حفاری گردیده است. طول تونل ۲۴۴۰ متر و قطر آن ۴ متر بوده که بعد از پوشش به ۳/۴ متر کاهش پیدا کرده است. شیب کف تونل تقریباً دو در هزار و آزیموت آن ۲۰۶ درجه بوده که در شرایط نرمال ۲۵ مترمکعب آب در ثانیه تحت فشار کم از آن عبور می کند [۲].

#### ۵-۲- تحلیل سازه تونل آب بر سد جیرفت با استفاده از نرم افزار طراحی شده METSUP

با توجه به اطلاعات مکانیک سنگی منطقه (جدول ۱) می توان پارامترهای لازم جهت تحلیل را استخراج نمود.

جدول ۱: پارامترهای مکانیک سنگی مربوط به تونل آب بر سد جیرفت [۲]

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار
ضخامت بالاپوش (m)	۸۰	مقدار چسبندگی (K.Pa)	۱۰۰۰
وزن مخصوص سنگ ( $\text{Kg/m}^3$ )	۲۷۰۰	قطر تونل (m)	۴
مدول الاستیسیته سنگ (G.Pa)	۱	ضخامت بتن (m)	۰/۳
ضریب پواسون	۰/۳	مدول الاستیسیته بتن (G.Pa)	۲۰
زاویه اصطکاک داخلی (درجه)	۳۵	طبقه بندی بنیادیسکی (RMR)	۵۶/۴-۶۶/۴
اندیس کیفی سنگ (RQD)	۷۵-۸۵	طبقه بندی بارتن (Q)	۳/۶-۱۸

در اینجا، ابتدا براساس روشهای RMR, Q و ترزاقی، بارهای عمودی و افقی وارده بر تونل محاسبه شده و سپس به وسیله نرم افزار، نگهداری بتنی تونل آنالیز شده است. در جدول ۲، نتایج حاصل از نرم افزار با نتایج حاصله از روش های عددی (نرم افزار FLAC) و حلقه چند لایه مورد مقایسه قرار گرفته است. همانگونه که مشاهده می شود، نتایج در حد قابل قبولی با یکدیگر همخوانی دارند [۳].

جدول ۲: مقایسه نتایج حاصل از تحلیل نرم افزار با روشهای عددی و حلقه چند لایه [۳]

روش	مقدار M در تاج تونل (MPa.m)	مقدار N در تاج (MPa)	مقدار M در دیواره (MPa.m)
متد حلقه چند لایه	-۰/۰۰۸۸۱	۰/۰۶۸	+۰/۰۱۳۵
METSUP (محاسبه نیرو، ترزاقی)	-۰/۰۰۹۷۶	۰/۰۵	+۰/۰۰۹۲
METSUP (محاسبه نیرو، RMR)	-۰/۰۱۰۶	۰/۰۵۴	+۰/۰۱
METSUP (محاسبه نیرو، Q)	-۰/۰۱۴۲	۰/۰۷۲	+۰/۰۱۳۴
متد عددی (نرم افزار FLAC)	-۰/۰۰۸۸۳	۰/۰۶۹۹	-

(علامت مثبت فشاری و علامت منفی کششی است)

## ۶- نتایج

- ۱- روش متروگپیروترانس، روشی جامع و کارآمد برای محاسبه نگهداری در شرایط مختلف زمین شناسی و برای انواع نگهداری می باشد. در این روش، بار اکتیو فرض شده و بار پاسیو از حل اندرکنش سیستم توده سنگ - نگهداری بدست می آید.
- ۲- نرم افزار METSUP از جمله معدود نرم افزارهایی است که فقط به تحلیل نگهداری بتنی تونل های دایروی پرداخته و جهت انجام تحلیل به اطلاعات ورودی کمی نیاز دارد. همچنین قادر است سریع تر از روش های عددی، نگهداری تونل را محاسبه کرده و به بهینه سازی نگهداری از نظر فنی و اقتصادی بپردازد.
- ۳- با توجه به تحلیل انجام گرفته بر روی تونل آب بر سد جیرفت و تشابه نتایج حاصل از نرم افزار و دیگر روش های تحلیلی و عددی، می توان به عملکرد مفید نرم افزار بیش از پیش پی برد.

## ۷- مراجع

- [۱] ارخانگلکس م، م؛ ژینچاردزه د، ای؛ کورسکو آ، اس؛ (۱۹۶۰)؛ "محاسبه نگهداری تونل ها"؛ انتشارات وزارت راه؛ مسکو.
- [۲] جلالی فرو، حسین؛ (۱۳۷۵)؛ "علل شکست تونل تحت فشار سد جیرفت و ارائه پایداری بهینه"؛ پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک سنگ؛ دانشگاه تربیت مدرس؛ تهران.
- [۳] رجی، میثم؛ (۱۳۸۴)؛ "طراحی نرم افزار METSUP"؛ پروژه کارشناسی مهندسی معدن گرایش استخراج؛ دانشگاه شهید باهنر؛ کرمان.
- [۴] والکف و پ؛ (۱۹۶۰)؛ "تونل"؛ انتشارات ترانسپورت؛ مسکو.