

## انتخاب روش حفاری تونل مترو تهران بر اساس روشهای تصمیم گیری چند معیاره و تحلیل عددی روش انتخاب شده

امیر حسین رستمی<sup>۱</sup>، هادی مختاری<sup>۲</sup>، حسن بخشنده امنیه<sup>۳</sup>، احمد ادیب<sup>۴</sup>

۱- دانش آموخته دکتری مهندسی معدن دانشگاه کاشان، arostami80@gmail.com

۲- استاد یار گروه صنایع دانشگاه کاشان

۳- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه کاشان

۴- دانشیار گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

تاریخ دریافت مقاله: ۹۲/۶/۲۵ تاریخ تصویب: ۹۳/۱/۱۸

### چکیده

با عبور تونل از میان توده خاک های ضعیف، خاک بین تونل و سطح زمین جابجا می شود که توسعه و گسترش این جابجاییها باعث نشست در سطح زمین خواهد شد. بنابراین با توجه به ضرورت ایجاد سیستم نگهداری کارآمد در محل اجرای پروژه استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره برای انتخاب سیستم نگهداری مناسب در مرحله طراحی تونل ضروری به نظر می رسد. هدف از این تحقیق انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل متروی کرج است تا به عنوان یک الگوی مناسب در مقاطع بعدی استفاده شود. این الگو بر اساس عوامل فنی، اقتصادی، اجرایی و اجتماعی و فاکتورهای موثر در محل انجام پروژه انجام شد. که در هر دو روش AHP و TOPSIS گزینه D روش اطریشی به عنوان گزینه مناسب انتخاب شد. از طرف دیگر نتایج بدست آمده توسط روش عددی المان محدود با نرم افزار PLAXIS نشان داد که روش اطریشی با حداکثر جابجایی ۲۶ میلی متر و ۱۰ میلی متر نشست در سطح زمین گزینه مناسب است.

واژگان کلیدی: سیستم نگهداری، تصمیم گیری چند معیاره، نشست، همگرایی

### مقدمه

این روشها در معادن و مسائل مربوط به معدن نیز وارد شده است. در سال ۲۰۰۸ یاووز، طراحی و انتخاب سیستم نگهداری با روش AHP را برای راهرو اصلی معدن زغال سنگ زیرزمینی در کشور ترکیه انجام داد [9]. در سال ۱۳۸۸ قلی نژاد از روش تصمیم گیری چندمعیاره برای انتخاب گزینه مناسب بازسازی زمینهای استخراج شده در معادن روباز استفاده کرد [۴]. در سال ۲۰۰۷ باسکتین از روشهای چند شاخصه در بازسازی یک معدن روباز استفاده

در شهرها به علت وجود زمینهای سست و ضعیف و به خاطر مشکلات ترافیک، حمل و نقل و آماده سازی تجهیزات، تونلها عمدتاً در اعماق کم حفر می شوند. با توجه به شرایط موجود، حفاری تونلها باید به گونه ای انجام گیرد که کمترین میزان آسیب و تغییر شکل در سطح زمین ایجاد شود [۳]. روشهای تصمیم گیری چند معیاره همواره به مدیران و کارشناسان کمک می کند تا در شرایط مختلف بتوانند بهترین تصمیم گیری را داشته باشند.

یکدیگر صورت می‌پذیرد. ماتریس مقایسات زوجی بین  $n$  شاخص به صورت رابطه ۱ انجام می‌شود:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & a_{22} & \dots & a_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & a_{nn} \end{bmatrix} a_{ij} = \frac{1}{a_{ji}}, a_{ii} = 1, \quad (1)$$

$i, j = 1, 2, \dots, n$

در این رابطه  $a_{ij}$  نشان‌دهنده برتری شاخص  $i$  ام بر شاخص  $j$  ام است و بالعکس. گام چهارم: ماتریس بی‌مقیاس ماتریس مقایسات زوجی بایستی بی‌مقیاس شود که با تقسیم هر یک از عناصر ستون بر مجموع عناصر همان ستون انجام می‌شود. با انجام این کار، ماتریس بی‌مقیاسی حاصل می‌شود که مجموع عناصر هر ستون از آن برابر یک است. ماتریس مقایسات زوجی بی‌مقیاس شده در رابطه ۲ نشان داده شده است.

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & \dots & r_{1j} \\ r_{21} & r_{22} & \dots & r_{2j} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{n1} & r_{n2} & \dots & r_{nj} \end{bmatrix}, i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, j \quad (2)$$

گام پنجم: اوزان نسبی

برای به دست آوردن وزن نسبی هر شاخص، میانگین حسابی هر سطر محاسبه می‌شود. گام ششم: بردار اوزان شاخص‌ها مقادیر وزن نسبی شاخص‌ها در وزن نسبت داده شده به معیارها در سطوح بالاتر ضرب شده و بردار وزن کلی شاخص‌ها به دست می‌آید. این مقدار در رابطه ۳ مشخص شده است.

$$W = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

کرد [6]. در این مقاله با روش رتبه‌بندی اولویت‌ها براساس مشابهت به راه‌حل ایده آل (TOPSIS) که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM) است، گزینه مناسب انتخاب می‌گردد. در این روش، ابتدا گزینه‌ها و معیارهای موثر تعیین و سپس با استفاده از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی (AHP) معیارهای مورد استفاده وزن دهی شد. پس از بی‌مقیاس‌سازی ماتریس وزنی بدست آمده از روش AHP، این ماتریس به عنوان الگوی روش TOPSIS مورد استفاده قرار گرفت. به این ترتیب اولویت‌بندی بین گزینه‌های موجود به عنوان روش مناسب برای حفاری تونل مترو انجام و گزینه مناسب انتخاب گردید.

### روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP

تحلیل سلسله مراتبی شامل گام‌های ذیل است. گام اول: درخت سلسله مراتبی، ایجاد درخت سلسله مراتبی جهت تعیین هدف، معیارها و گزینه‌ها. گام دوم: ماتریس تصمیم‌گیری ماتریس تصمیم‌گیری براساس جدول شماره ۱ ایجاد می‌شود.

جدول ۱- مقیاس نه نقطه‌ای ساعتی [12]

مقدار عددی	ترجیحات (قضاوت شفاهی)
۹	کاملاً مرجح و یا مطلوب‌تر
۷	ترجیح و یا مطلوبیت خیلی قوی
۵	ترجیح و یا مطلوبیت قوی
۳	کمی مرجح و یا مطلوب‌تر
۱	ترجیح و یا مطلوبیت یکسان
۲ و ۶ و ۸	ترجیحات بین فواصل فوق

گام سوم: ماتریس مقایسات زوجی

بین اعضای ماتریس تصمیم‌گیری، مقایسات زوجی به منظور اهمیت و برتری نسبی شاخص‌ها نسبت به

## بحث و نتایج

### تحلیل با روش TOPSIS

این مدل توسط هوانگ و یون [7] در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد که  $m$  گزینه به وسیله  $n$  شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. در این تکنیک گزینه انتخابی، بایستی کمترین فاصله را با راه حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده‌آل منفی (بدترین حالت ممکن) داشته باشد [13].

گام اول: ماتریس بی‌مقیاس موزونانین ماتریس که در رابطه ۷ نشان داده شده است، از ضرب کردن ماتریس بی‌مقیاس شده  $R_{ij}$  در ماتریس قطری حاوی وزن کلی شاخص‌ها  $w_i$  به دست می‌آید.

$$v_{ij} = R_{ij} \times w_i = \begin{pmatrix} r_{11}w_1 & \dots & r_{1n}w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1}w_1 & \dots & r_{in}w_n \end{pmatrix} i \quad (v)$$

$$= 1, \dots, i; j = 1, \dots, n$$

گام دوم: تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی ماتریس بی‌مقیاس موزون شاخص‌ها را نشان می‌دهد و راه حل ایده‌آل مثبت  $A^*$  از رابطه ۸ و راه حل ایده‌آل منفی  $A^-$  از رابطه ۹ محاسبه می‌شود.

$$A^* = \{v_1^*, v_2^*, \dots, v_n^*\}$$

$$= \left\{ \left( \max_i v_{ij} \mid j \in I' \right), \left( \min_i v_{ij} \mid j \in I'' \right) \right\} \quad (8)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

$$= \left\{ \left( \min_i v_{ij} \mid j \in I' \right), \left( \max_i v_{ij} \mid j \in I'' \right) \right\} \quad (9)$$

گام سوم: تعیین فاصله گزینه‌ها تا ایده‌آل مثبت و منفی

که در این رابطه  $W$  برابر وزن می‌باشد. در روش  $AHP$  برای میزان سازگاری قضاوت‌های تصمیم‌گیرندگان، با استفاده از رابطه ۴ نرخ ناسازگاری محاسبه می‌شود:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (4)$$

$\lambda_{max}$  بزرگترین مقدار ویژه ماتریس مقایسات زوجی است. هرچه نرخ سازگاری به صفر نزدیک‌تر باشد، میزان سازگاری بیشتر است. مقدار آن باید کمتر از ۰/۱ باشد تا نتایج  $AHP$  قابل قبول باشد. وقتی در ارزیابی گزینه‌ها و شاخص‌ها نظرات چند تصمیم‌گیرنده اثر داده شود بایستی از روش  $AHP$  گروهی استفاده شود [5].

در این موارد همانند رابطه ۵ بایستی میانگین هندسی نظرات کارشناسان مختلف ( $x'_{ij}$ ) محاسبه شده و به عنوان ماتریس اصلی در نظر گرفته شود [11].

$$x'_{ij} = \left( \prod_{l=1}^k x_{ijl} \right)^{\frac{1}{k}}, \quad i, j = 1, 2, \dots, n, \quad i \neq j, \quad l = 1, 2, 3, \dots, k \quad (5)$$

در این رابطه  $l$  شماره تصمیم‌گیرنده،  $k$  تعداد تصمیم‌گیرندگان و  $(i, j)$  شاخص‌ها یا گزینه‌های مورد مقایسه هستند.

همچنین اگر نظرات تصمیم‌گیرندگان تاثیر متفاوتی داشته باشد، می‌توان به نظرات کارشناسان وزنی ( $w_l$ ) مطابق ارزش داده شود که در رابطه ۶ آورده شده است.

$$x'_{ij} = \left\{ \prod_{l=1}^k x_{ijl}^{w_l} \right\}^{\frac{1}{\sum w_l}} \quad (6)$$

مورد نیاز ( $C_7$ )، میزان انعطاف پذیری روش به منظور تغییر اجرا در شرایط پیش‌بینی نشده ( $C_8$ )، قابلیت مکانیزاسیون ( $C_9$ )، زمان پروژه ( $C_{10}$ )، تاثیر ابزار دقیق بر کارایی روش ( $C_{11}$ ) و لزوم استفاده از کارشناس خارجی ( $C_{12}$ ) است.

### انتخاب روش حفاری تونل مترو تهران خط ۱

برای این کار ابتدا برای بدست آوردن وزن شاخص‌ها از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. در این تحقیق، برای بهبود و دقت بیشتر وزن‌های بدست آمده، از روش AHP گروهی استفاده شد. قضاوت‌ها با استفاده از هشت گروه تصمیم‌گیرنده انجام گرفت. در این مرحله با استفاده از تکنیک‌های مختلف روش گروهی قضاوت‌ها انجام گردید و با استفاده از میانگین هندسی قضاوت کارشناسان طبق رابطه ۷، وزن‌های نهایی بدست آمد. ورودی الگوریتم TOPSIS با استفاده از رابطه ۷ به صورت ماتریس بی‌مقیاس موزون درآمد. با استفاده از رابطه ۸، راه حل ایده‌آل مثبت  $A^*$  و با استفاده از رابطه ۹، راه حل ایده‌آل منفی  $A^-$  برای هر شاخص بدست آمد. جدول ۳ قسمتی از ماتریس بی‌مقیاس موزون و راه حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی را برای هر شاخص نشان می‌دهد. پس از بدست آمدن راه حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ به ترتیب فاصله هر گزینه از ایده‌آل مثبت  $d_j^+$  و فاصله هر گزینه از ایده‌آل منفی  $d_j^-$  بدست آمد. در نهایت برای تعیین نزدیکی نسبی هر گزینه از رابطه ۱۲ استفاده گردید. فاصله‌های هر گزینه از ایده‌آل‌های مثبت و منفی، نزدیکی نسبی هر گزینه و اولویت‌بندی نهایی گزینه‌های سیستم نگهداری تونل مترو تعیین شد.

برای این کار فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل مثبت  $d_j^+$  از رابطه ۱۰ و فاصله اقلیدسی هر گزینه از ایده‌آل منفی  $d_j^-$  از رابطه ۱۱ محاسبه می‌شود.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (10)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}, i = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

گام چهارم: تعیین نزدیکی نسبی یک گزینه به راه حل ایده‌آل  
برای تعیین نزدیکی نسبی  $CL_i^*$  از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود.

$$CL_i^* = \frac{d_i^-}{d_i^- + d_i^+} \quad (12)$$

گام پنجم: اولویت‌بندی  
در نهایت هر گزینه‌ای که دارای  $CL_i^*$  بزرگتری باشد گزینه مناسب خواهد بود و بر این اساس گزینه‌ها اولویت‌بندی می‌شوند.

### گزینه‌ها و معیارهای انتخاب روش حفاری تونل

گزینه‌های حفاری شامل: A سپرهای دوغابی، B ترانشه باز، C سپرهای توازنی با فشار زمین و D روش اطریشی می‌باشد که براساس معیارهای در نظر گرفته شده، گزینه مناسب انتخاب می‌گردد. معیارها نیز شامل: تاثیر دانه بندی خاک و آبرفت در مسیر تونل ( $C_1$ )، هزینه عملیاتی ( $C_2$ )، پایداری سینه کار ( $C_3$ )، میزان نشست ( $C_4$ )، مدیریت هزینه (مهندسی ارزش) ( $C_5$ )، دسترسی به نیروی کار متخصص ( $C_6$ )، دسترسی به ماشین آلات و تجهیزات

**تحلیل عددی:** هدف از این تحلیل، تعیین پایداری پس از مرحله ساخت آن است. بنابراین فقط برای آشنایی با شرایط اولیه و چگونگی مدل سازی مراحل حفاری، تنها، حفاری مقطع A با در نظر گرفتن شرایط آب زیرزمینی و روباره و بارهای ترافیکی به صورت گام به گام، رسم و بررسی می شود [۱۱].

جدول ۲- موارد تحلیلی در ۵ مقطع متفاوت ایستگاه [۱۱]

شماره تحلیل	موارد مقطع تحلیلی	تغییر روباره (متر)	سطح آب زیرزمینی (متر)	بارهای ترافیکی (متر)	بدون فرض بارهای ترافیکی (متر)
۱	A	۳	۳۰	۰/۶	-
۲	A	۳	۳۰	-	۰
۳	B	۲	۳۴	۰/۶	-
۴	B	۲	۳۴	-	۰
۵	C	۱	۳۸/۵	۰/۶	-
۶	C	۱	۳۸/۵	-	۰
۷	D	۰/۵	۴۲	۰/۶	-
۸	D	۰/۵	۴۲	-	۰
۹	E	صفر	۴۷	۰/۶	-
۱۰	E	صفر	۴۷	-	۰

نمودار تغییرات روباره (با فرض مقطع E به عنوان مبدا) و تغییرات آب زیرزمینی در طول ایستگاه در شکل (۱۰) نشان داده می شود.

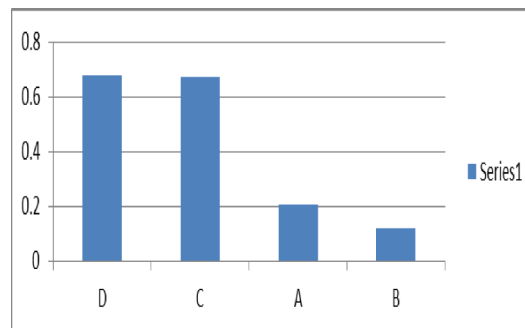
**ایجاد هندسه تونل:** بر اساس نقشه های رسم شده در محیط نرم افزار ، هندسه آن در محیط نرم افزار رسم می شود. به طور تقریبی می توان فاصله مرزهای مدل از تونل را از طریق رابطه Kirsch مشخص کرد. بر طبق این رابطه فاصله مرزهای کناری از مرکز تونل ۱۰ برابر شعاع متوسط تونل در نظر گرفته می شود بنابراین ابعاد در نظر گرفته شده در این مدل

Synthesis with respect to: Goal: W&L

Overall Inconsistency = 0.12

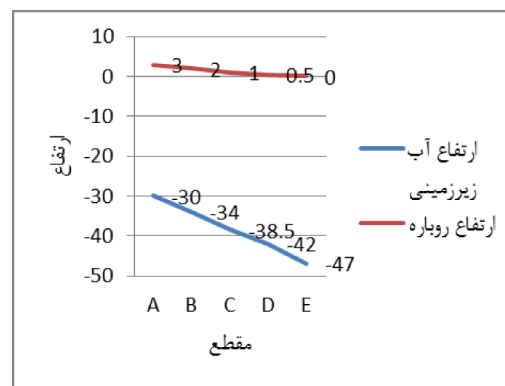


شکل ۱- رتبه بندی انتخاب گزینه روش حفاری تونل با روش AHP



شکل ۲- رتبه بندی نهایی انتخاب گزینه روش حفاری

تونل با روش TOPSIS



شکل ۳- تغییرات روباره و آب زیر زمینی در طول ایستگاه

جدول ۳- اطلاعات خاک دربرگیرنده تونل

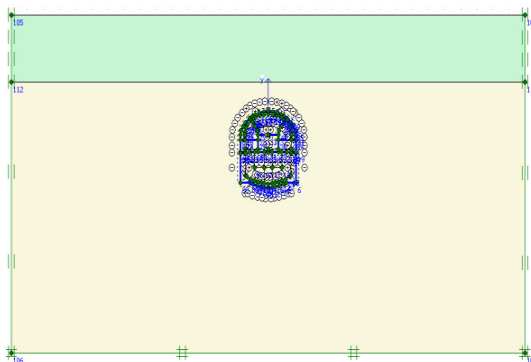
واحد	لایه L2	لایه L1	پارامتر
-	موهر کولمب	موهر کولمب	مدل مواد
-	زهکشی شده	زهکشی شده	نوع رفتار مواد
kN/m <sup>3</sup>	۲۱	۲۱	وزن مخصوص غیر اشباع
kN/m <sup>3</sup>	۲۲/۴	۲۲/۴	وزن مخصوص اشباع
m/day	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶	نفوذپذیری قائم
m/day	۰/۰۸۶	۰/۰۸۶	نفوذپذیری افقی
kN/m <sup>2</sup>	۲۵۰۳۰۰	۱۱۳۸۰۰	مدول یانگ
-	۰/۳۵	۰/۳۵	نسبت پواسون
kN/m <sup>2</sup>	۷	۷	چسبندگی
°	۴۰	۴۰	زاویه اصطکاک
°	۱۰	۱۰	زاویه اتساع
-	۰/۴۵	-	ضریب کاهش مقاومت

جدول ۴- اطلاعات لتیس گیردرهای سازه نگهبان

واحد	T170	T140	T100	پارامتر
-	الاستیک	الاستیک	الاستیک	نوع رفتار مواد
kN/m	۴۰/۵۹ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۴۳/۳۳ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۲۳/۸۸ ×۱۰ <sup>۶</sup>	سختی نرمال
kN/m <sup>2</sup> / m	۲/۴۴۴ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۱۳۶۵ ×۱۰ <sup>۳</sup>	۴۹۷/۴ ×۱۰ <sup>۳</sup>	سختی خمشی
m	۰/۸۵	۰/۷	۰/۲۵	ضخامت معادل
kN/m/ m	۲۵	۲۵	۲۵	وزن
-	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	نسبت پواسون
kN/m	۱۶/۷۱ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۷۱/۶۳ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۴۷/۷۵ ×۱۰ <sup>۶</sup>	سختی نرمال
kN/m <sup>2</sup> / m	۰/۱۷۰۶ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۰/۱۳۴۳ ×۱۰ <sup>۶</sup>	۳/۹۷۹ ×۱۰ <sup>۶</sup>	سختی خمشی
m	۰/۳۵	۰/۱۵	۱	ضخامت معادل
kN/m/ m	۲۵	۲۵	۲۵	وزن
-	۰/۱۸	۰/۱۸	۰/۱۸	نسبت پواسون

۸۰ متر در جهت X در دو طرف تونل و ۶۰ متر در جهت Y- تونل می‌باشند.

پس از رسم هندسه تونل و اعمال سطوح تماس آن، ابعاد مدل و لایه‌های خاک، مدل اولیه به شکل (۴) مشاهده می‌شود.

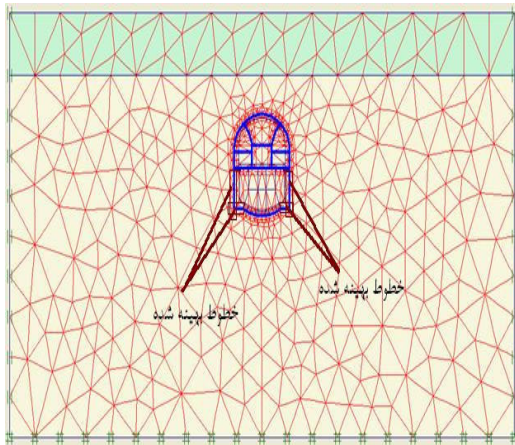


شکل ۴- هندسه مدل انتخابی بر اساس ابعاد مدل و لایه‌های خاک

برای تحلیل از مدل موهر-کولمب در رفتار مواد استفاده شده است. مدل موهر-کولمب یکی از مرسوم‌ترین مدل‌های رفتاری مکانیک خاک به شمار می‌رود که دارای ۵ پارامتر اصلی بوده و به صورت ارتجاعی خمیری کامل است.

**اطلاعات مربوط به مصالح بکار رفته: اطلاعات** مربوط به خاک در برگیرنده بر طبق اطلاعات جدول (۳)، لتیس گیردرها بر طبق اطلاعات جدول (۴) و بتن پوششی تونل بر طبق اطلاعات جدول (۵) در مدل تعریف شد.

گوشه‌های پایین در کنار تونل، مش خطوط با استفاده از گزینه REFINE LINE، بهینه می‌شوند. محل این بهینه سازی‌ها در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل ۶- مش بندی المان محدود تونل به صورت Fine

پس از وارد کردن وزن مخصوص آب با مقدار ۱۰ کیلو نیوتن بر متر مکعب، سطح ایستابی با ارتفاع ۳۰ متر از سطح زمین در مقطع A، در مدل اعمال می‌شود تا شرایط اولیه برای مدل ایجاد گردد.

در تمام ۸ فاز، محاسبات میانی و جابجایی‌های فازهای قبلی در نظر گرفته شده‌اند و تمام رفتارهای زهکشی نشده به حساب آورده شده‌اند. نوع بار گذاری فازها به صورت ساختاری مرحله‌ای و نوع محاسبات از نوع پلاستیک هستند و حداکثر تعداد مراحل، ۲۵۰ مرحله انتخاب شدند.

### مراحل هشت گانه حفاری

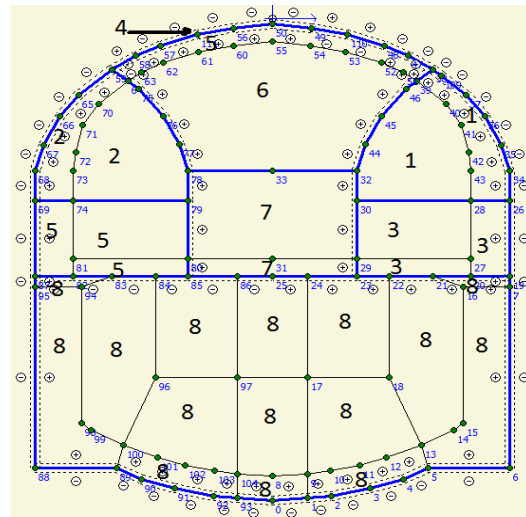
فاز اول: در این فاز، بخش شماره ۱ حفاری و لتیس‌های اطراف آن مانند شکل (۷) نصب می‌شود. حداکثر میزان جابجایی در پایان این فاز این فاز، ۱۱/۳۷ میلی‌متر در کف گالری است.

فاز دوم: در فاز دوم، بخش شماره ۲ حفاری و لتیس‌های اطراف آن، مانند فاز یکم نصب می‌شود، شکل (۸). حداکثر میزان جابجایی در پایان

جدول ۵- اطلاعات بتن پوششی تونل

واحد	Concrete	نشانه	پارامتر
-	الاستیک خطی	Model	مدل مواد
-	بدون تخلخل	Type	نوع رفتار مواد
kN/m <sup>3</sup>	۲۵	$\gamma_{unsat}$	وزن مخصوص غیر اشباع
kN/m <sup>2</sup>	۲۳۴۲۰۰۰۰	$E_{ref}$	مدول یانگ
-	۰/۱۸	$\nu$	نسبت پواسون
kN/m <sup>2</sup>	۷	$C_{ref}$	چسبندگی

فرآیند بارگذاری مقطع: پس از اعمال سطوح مشترک بین مواد، شکل مقطع تونل به صورت شکل (۱۲) مشاهده می‌شود. بخش‌هایی که در طی هر فاز حفاری می‌شوند نیز در این شکل، مشاهده می‌شوند.

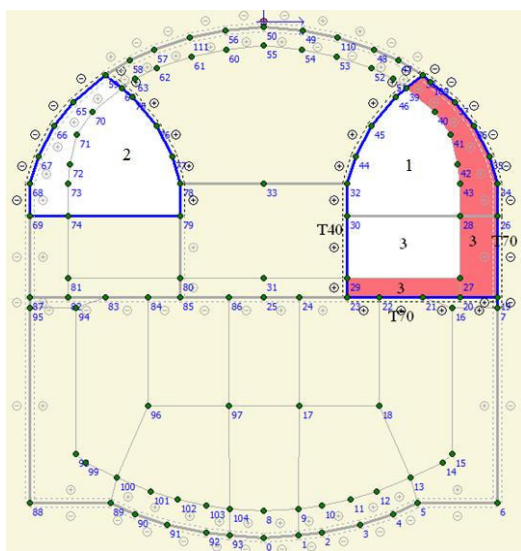


شکل ۵- مقطع تونل با در نظر گرفتن فصول مشترک و مراحل حفاری

پس از اعمال شرایط مرزی و بسته شدن اطراف مدل، عملیات مش بندی بر اساس روش کرنش صفحه‌ای و با روش مش بندی المان محدود به صورت FINE، ۱۵ گره‌ای انجام شد. برای دقت بیشتر المان‌ها در

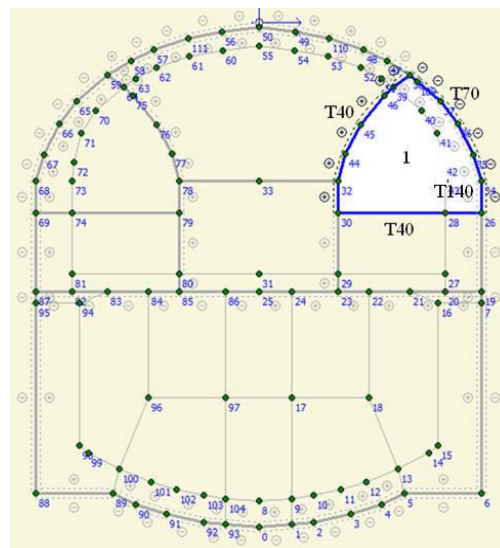


این فاز برابر ۱۱/۱۸ میلی متر در کف گالری شماره ۱ است.

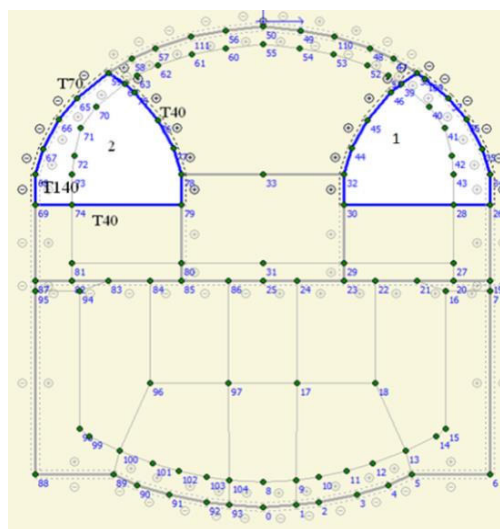


شکل ۹- فاز سوم حفاری

فاز چهارم: در فاز چهارم، بخش شماره ۴ حفاری و لتیس‌های اطراف آن مانند شکل (۱۰) نصب می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۳۵/۵۴ میلی متر در تراز سقف تونل است.

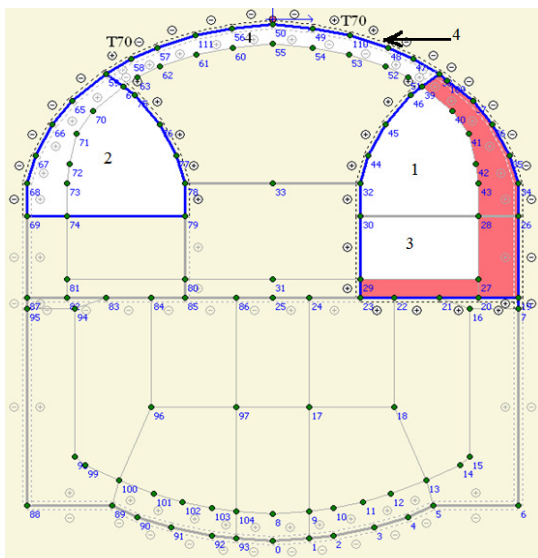


شکل ۷- فاز یکم حفاری



شکل ۸- فاز دوم حفاری

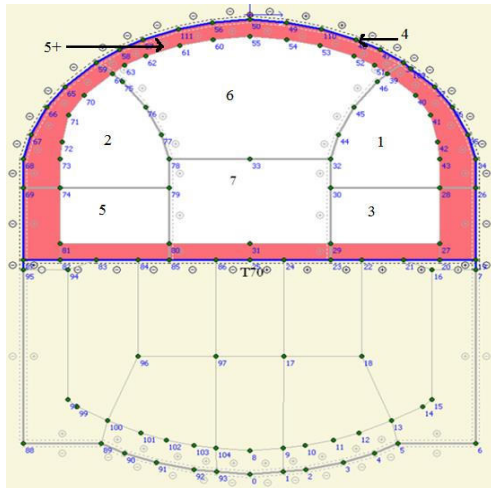
فاز سوم: در فاز سوم، پس از برداشتن لتیس کف گالری شماره ۱، بخش شماره ۳ حفاری و لتیس‌های اطراف نصب و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۹) انجام می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۱۱/۰۵ میلی متر در کف گالری ۲ است.



شکل ۱۰- فاز چهارم حفاری

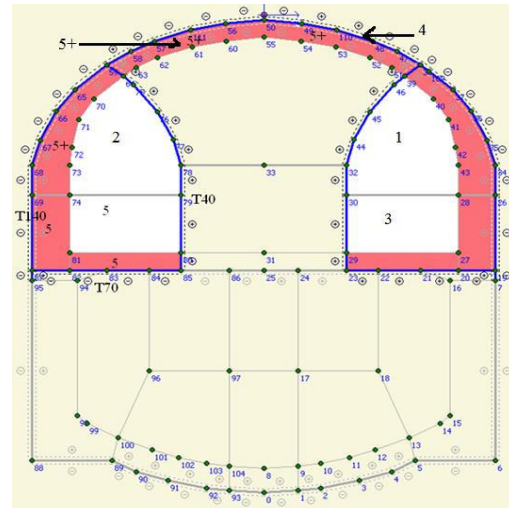
فاز پنجم: در فاز پنجم، بخش شماره ۵ حفاری و به همراه سقف تونل مانند شکل (۱۱) بتن‌ریزی می‌شوند. حداکثر جابجایی در پایان این فاز برابر ۳۷/۳۵ میلی متر در سقف تونل است.





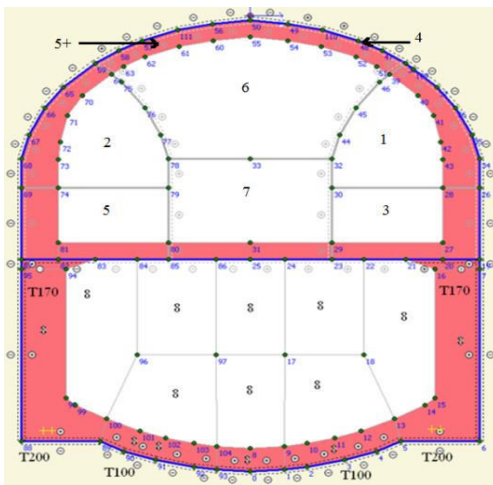
شکل ۱۳- فاز هفتم حفاری

فاز هشتم: در این مرحله، بخش زیرین تونل به صورت یکجا، حفاری و لیس‌های اطراف آن نصب و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۱۴) انجام می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این مرحله برابر  $37/01$  میلی‌متر در سقف است.

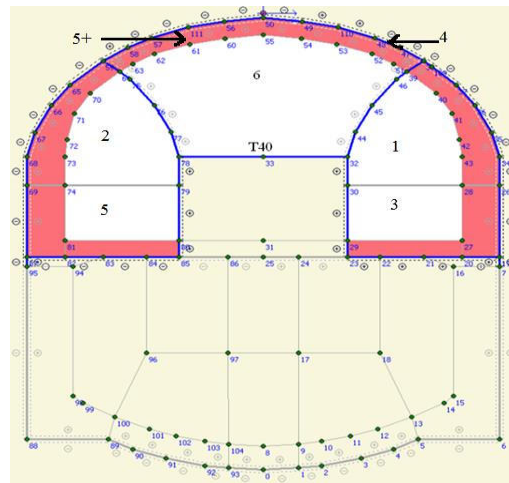


شکل ۱۱- فاز پنجم حفاری

فاز ششم: در فاز ششم، بخش شماره ۶ حفاری و لیس کف آن مانند شکل (۱۲) نصب می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این فاز  $36/36$  میلی‌متر در سقف تونل است.



شکل ۱۴- فاز هشتم حفاری

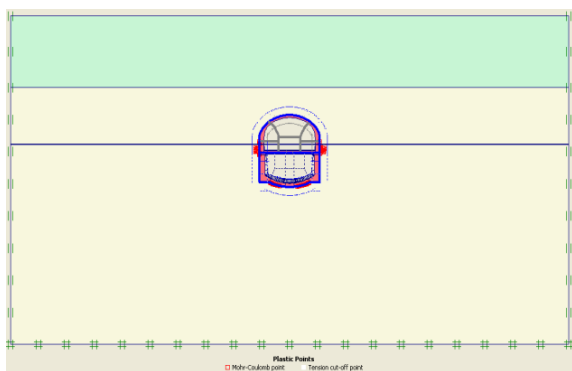


شکل ۱۲- فاز ششم حفاری

## نتایج

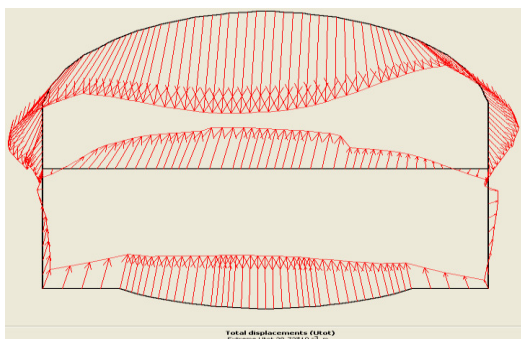
شکل‌های (۱۵) تا (۲۰) مقادیر نهایی پارامترها را برای تحلیل حالت ۱ نشان می‌دهند. با مشاهده شکل (۱۵) مشخص می‌شود که حداکثر مقدار جابجایی برابر  $37/01$  میلی‌متر در سقف تونل است. همچنین، عمده جابجایی برای قسمت فوقانی تونل اتفاق

فاز هفتم: در این فاز، بخش شماره ۷ حفاری و لیس‌های اطراف برداشته و بتن‌ریزی آن مانند شکل (۱۳) انجام می‌شود. در پایان این مرحله، قسمت بالای تونل تکمیل می‌شود. حداکثر جابجایی در پایان این مرحله  $37/37$  میلی‌متر در سقف تونل است.



شکل ۱۷- نقاط پلاستیک برای تحلیل شماره ۱

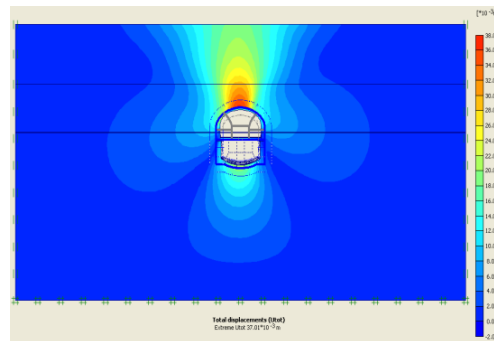
از شکل (۱۸) برداشت می‌شود که طبقه فوقانی تونل، میل به همگرایی دارد. به خاطر فشار از پایین، در طبقه تحتانی تونل، میل به حرکت به سمت داختمونل دارد. اما در کناره‌های آن این تمایل، کمتر است که می‌تواند به دلیل تحمل فشار توسط لیس‌های نصب شده در طبقه بالایی تونل باشد.



شکل ۱۸- جابجایی دیواره‌ها برای تحلیل شماره ۱ با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده

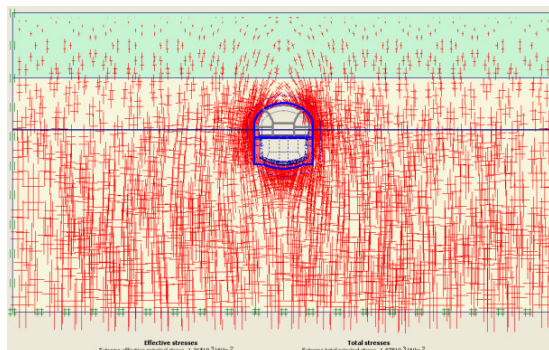
توجه به دو شکل (۱۹) و (۲۰) نشان می‌دهد که نیروهای برشی و ممان‌های خمشی با یکدیگر مرتبط بوده و در جهت عکس یکدیگر هستند. مشاهده می‌شود که هر دو پارامتر، در نقاط گوشه پایینی هر دو طبقه مقادیر زیادی دارند. علت زیاد بودن هر دو پارامتر در قسمت راست سقف تونل می‌تواند به این دلیل باشد که چون این بخش از تونل، تاج فاز یکم حفاری بوده و از آغاز حفاری تحت تنش قرار گرفته،

می‌افتد و جابجایی زیادی در طبقه تحتانی تونل وجود ندارد. این موضع، بیانگر این نکته است که عمده فشار وارده به طبقه فوقانی تونل وارد می‌شود



شکل ۱۵- جابجایی نهایی برای تحلیل شماره ۱

شکل (۱۶) نمایانگر تمرکز شدید تنش‌های کل و موثر در اطراف و زیر تونل است. ولی در سقف تمرکز تنش کمتر است.



شکل ۱۶- تنش کل و موثر برای تحلیل شماره ۱

همانطور که در شکل (۱۷) مشاهده می‌شود، نقاط پلاستیک، بیشتر در کناره‌ها و زیر تونل قرار دارند. که با مقایسه نتایج آن با شکل (۱۶) می‌توان گفت که احتمالاً این نقاط به خاطر تمرکز تنش در این ناحیه ایجاد شده‌اند.

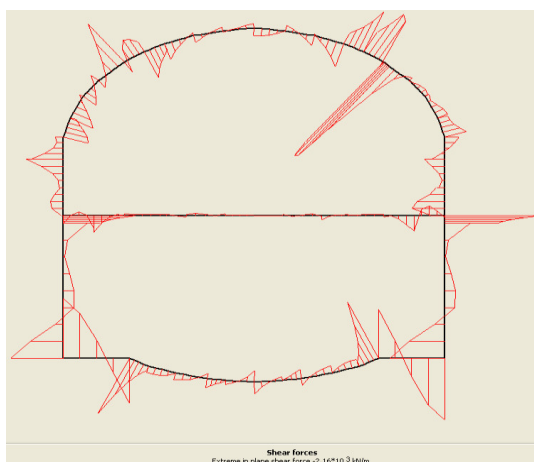
جهت مقایسه رفتار تونل در حالت بارگذاری ترافیکی و استاتیکی، از نمودارهای مقایسه‌ای هر یک از پارامترها استفاده می‌شود (شکل‌های ۲۱ تا ۲۵). ملاحظه می‌شود که عموماً و تا زمانی که آب در اطراف تونل وجود دارد، مقادیر ترافیکی پارامترها بیشتر از جابجایی استاتیکی است.

پس از خروج آب از مقطع تونل، اختلاف بین پارامترها تقریباً صفر خواهد بود که نشانه تاثیر حضور آب بر این پارامتر است. شیب این پارامترها، متناسب با روباره، تغییر می‌کند.

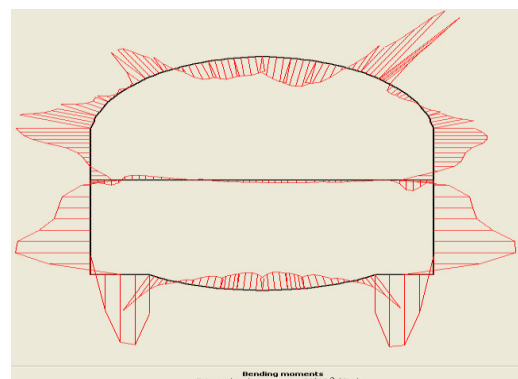
جدول ۶- مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

پارامتر	بیشترین جابجایی کل ( $10^{-3} \times m$ )	بیشترین تنش موثر ( $10^3 \times kN/m^2$ )	بیشترین جابجایی دیواره‌ها ( $10^{-3} \times m$ )
۱	۳۷/۰۱	-۱/۸۷	۳۸/۷۳
۲	۳۶/۳۳	-۱/۸۶	۳۸
۳	۳۴/۹۹	-۱/۸۴	۳۶/۶۳
۴	۳۴/۳۷	-۱/۸۳	۳۵/۹۷
۵	۳۲/۷۶	-۱/۸۲	۳۴/۳۳
۶	۳۲/۰۸	-۱/۸۰	۳۳/۶۰
۷	۳۱/۸۸	-۱/۸۰	۳۳/۴۱
۸	۳۱/۲۳	-۱/۷۹	۳۲/۷۳
۹	۳۰/۷۲	-۱/۷۷	۳۲/۱۸
۱۰	۳۰/۷۱	-۱/۷۷	۳۲/۱۸

پس از پایان حفاری تونل نیز همچنان بیشترین تنش به آن وارد شده و بیشترین خمش را دارد.

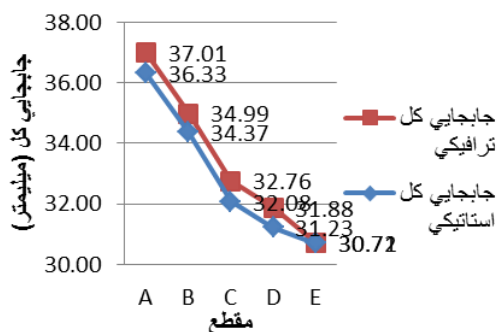


شکل ۱۹- نیروهای برشی برای تحلیل شماره ۱ با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده



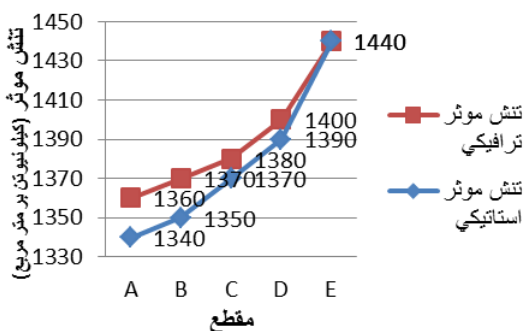
شکل ۲۰- ممان‌های خمشی برای تحلیل شماره ۱ با مقیاس ۲۰۰ برابر بزرگ شده

مقادیر عددی نتایج بدست آمده را در (۶) خلاصه شده است. جدول (۶) مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت مراحل تحلیل ۹ آنالیز دیگر نیز دقیقاً مانند این آنالیز است. برای مقایسه و قضاوت در مورد میزان تاثیر هر یک از عوامل موردنظر، مقدار نهایی پارامترهای هر ۱۰ حالت تحلیل در جدول (۷) نشان داده شده‌اند.



شکل ۲۱- مقایسه جابجایی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

بر اساس شکل (۳) و با مشاهده شکل (۲۲) مقادیر تنش موثر ترافیکی بیش از تنش استاتیکی است. با افزایش یکنواخت عمق سطح ایستایی و کاهش یکنواخت بار روباره، تنش موثر افزایش می‌یابد. زیرا با وجود خروج آب از میان حفرات، روباره کاهش یافته و امکان تاثیر بیشتر فشار موثر آب را به سازه می‌دهد. علت زیاد شدن شیب افزایش تنش می‌تواند به خاطر صفر شدن مقدار روباره باشد.



شکل ۲۲- مقایسه تنش موثر ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

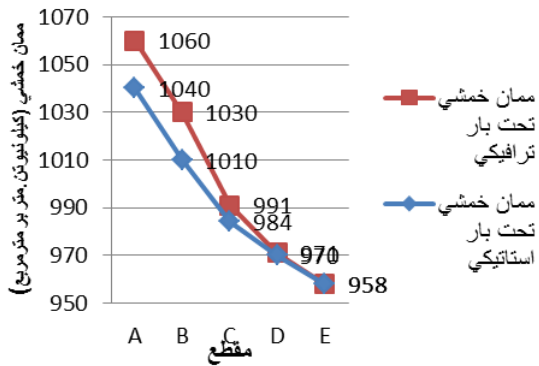
بر اساس شکل (۳) و با مشاهده شکل (۲۳) جابجایی دیواره تونل در حالت ترافیکی بیش از استاتیکی است. علت زیاد شدن شیب کاهش تنش در ابتدای نمودار می‌تواند به خاطر روباره زیاد در این مقاطع باشد.

جدول ۷- مقادیر بدست آمده در ۱۰ حالت بارگذاری پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری‌های دائم و موقت

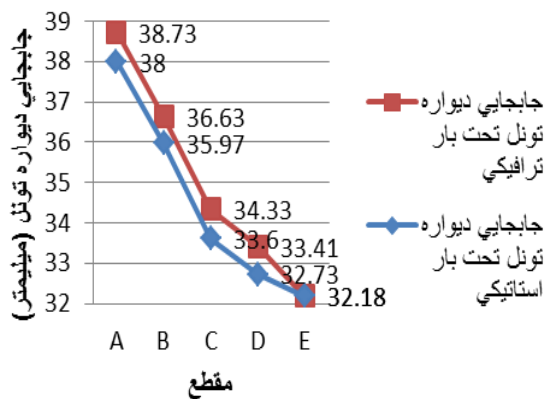
پارامتر	بیشترین نیروی برشی ( $10^2 \times kN/m$ )	بیشترین ممان خمشی ( $kNm/m$ )
۱	-۲/۱۶	۱۰۶۰
۲	-۲/۱۲	۱۰۴۰
۳	-۲/۱۰	۱۰۳۰
۴	-۲/۰۵	۱۰۱۰
۵	-۲/۰۲	۹۹۱
۶	-۱/۹۸	۹۸۴
۷	-۱/۹۸	۹۷۱
۸	-۱/۹۵	۹۷۰
۹	-۱/۹۲	۹۵۸
۱۰	-۱/۹۲	۹۵۸

در این نمودارها باید به این نکته توجه شود که پارامترهایی که شیب آنها ثابت است نشان دهنده استقلال آنها از فاکتور تغییر روباره و وابسته به تغییر آب زیر سطحی است و پارامترهایی که شیب آنها متغیر است نشان دهنده استقلال آنها از فاکتور تغییر آب زیر سطحی و وابستگی آن به تغییر روباره است. بر اساس شکل (۳) و با مشاهده شکل (۲۱) عموماً و تا زمانی که آب در اطراف تونل وجود دارد، جابجایی ترافیکی ۰/۷ میلی‌متر بیشتر از جابجایی استاتیکی است. پس از خروج آب از مقطع تونل، اختلاف بین جابجایی‌ها تقریباً صفر خواهد بود که نشانه تاثیر آب بر این پارامتر است.

شیب این پارامتر هم، متناسب با روباره، تغییر می‌کند. نسبت بار ترافیکی به بار استاتیکی در مقطع کم شده و در نتیجه، اثر جابجایی مربوط به بار ترافیکی کم می‌شود.



شکل ۲۵- مقایسه ممان خمشی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری های دائم و موقت

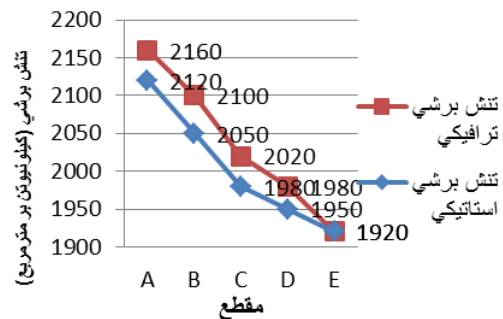


شکل ۲۳- مقایسه جابجایی ترافیکی و استاتیکی دیواره تونل پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری های دائم و موقت

### نتیجه گیری

انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل مترو حائز اهمیت است. اگر گزینه انتخابی، گزینه مناسبی نباشد، پروژه با شکست مواجه خواهد شد و حتی اگر شکست نخورد بسیار پرهزینه و غیر منطقی است. بنابراین ایجاد مدلی برای انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری و استفاده از روش های تصمیم گیری چندمعیاره ضروری است. امروزه روش های تصمیم گیری چند معیاره به علت استفاده از افراد کارشناس و خبره و کمک به مدیران در گرفتن تصمیم های مناسب جایگاه ویژه ای پیدا کرده است. در این مقاله انتخاب روش حفاری تونل مترو با ۱۲ معیار و ۴ گزینه انجام شد که با اجرای این مدل بر روی تونل متروی تهران خط ۱، گزینه D ( $D=0/676391$ )، با اختلاف زیادی نسبت به گزینه B ( $B=0/116567$ ) و گزینه های دیگر به عنوان گزینه مناسب انتخاب گردید. وزن شاخص ها با روش AHP بدست آمد. استفاده از AHP گروهی باعث دقیق تر شدن مقایسات زوجی و بدست آمدن وزن های مناسب تر گردید. روش TOPSIS نیز یکی از بهترین و پرکاربردترین روش های تصمیم گیری چند معیاره است. تحلیل روش حفاری با روش اجزاء محدود و

بر اساس شکل (۳) و با مشاهده شکل (۲۴) تنش برشی ترافیکی دارای مقادیر بیشتری نسبت به تنش برشی استاتیکی است. با افزایش عمق سطح ایستایی، اختلاف تنش های برشی می یابد. شیب زیاد پارامترها در ابتدای نمودار بیانگر تاثیر زیاد روباره بر تنش ها است.



شکل ۲۴- مقایسه تنش برشی ترافیکی و استاتیکی پس از مرحله پایانی تحلیل بعد از نصب نگهداری های دائم و موقت

بر اساس شکل (۳) و با مشاهده شکل (۲۵) تغییر روباره مهمترین عامل در مقادیر ممان خمشی است. شیب زیاد پارامترها در ابتدای نمودار بیانگر تاثیر زیاد روباره بر ممان های خمشی است.

حداکثر مقدار نشست در سطح زمین بالای تونل ۲۰ میلی متر است که با توجه به عمق تونل و قرار گرفتن آن در زیر خیابان و نبود ساختمان در کنار این سازه، این مقدار نشست، مجاز و قابل چشم پوشی است. تغییر روباره بر جابجایی دیواره‌ها و جابجایی کل تاثیرگذار است. زیرا شیب نمودار این پارامترها بسته به تغییر روباره، تغییر می‌کند. تنش برشی و تنش موثر تابع هر ۲ عامل آب زیر سطحی و روباره هستند.

### منابع

- ۱- بهپور گوهری، م. (۱۳۸۵)، آموزش جامع PLXISV8، انتشارات فروزش، ۶۴۰ص.
- ۲- رستمی، ا.ح. (۱۳۸۹)، انتخاب روش نگهداری تونل مترو با استفاده از روش های تصمیم گیری چند معیاره (مطالعه موردی تونل مترو تهران خط ۳ فاز ۴)، پایان نامه کارشناسی ارشد دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، ۱۰۸ص.
- ۳- صالح زاده، ح. (۱۳۸۸)، طراحی و مهندسی تونل و شفت در سنگ، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا-قرب نوح، ۵۳۰ص.
- ۴- قلی نژاد، ع-ل، سرقینی، ج، امیرافشاری، م. (۱۳۸۸)، انتخاب روش بازسازی معدن روباز با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چند شاخصه، فصل نامه علمی پژوهشی زمین شناسی و محیط زیست، سال سوم، شماره ۲، تابستان ۱۳۸۴ص.
- 5- Altuzarra, A., 2004, Monero Jimenez, J.M. & Salvador, M., Searching for consensus In AHP-Group decision making. A bayesian Perspective, Gorbirnoelecteronico.Toma de decisions complejasbasadas en internet: e:democracia y e-cognocracia, PM 052.
- 6- Bascetin A., 2007, A decision support System using analytical hierarchy process (AHP) for the optimal environmental reclamation of an open pit mine, Environmental Geology, vol 52, pp 663-672.

با نرم افزار PLAXIS نشان دهنده عملکرد قابل قبول تصمیم گیری انجام شده و تأیید آن در شرایط اجرایی در محل انجام پروژه است.

با توجه به نتایج بدست آمده، با بکارگیری لئیس برای اجرای سیستم نگهداری موقت و بتن برای اجرای سیستم نگهداری دائم در تمام مقاطع مورد نظر در خاک موجود، تونل پایدار خواهد بود. با ۱۹/۸ متر ارتفاع و ۱۷/۵ متر عرض برای این ایستگاه، در مقطع A که ارتفاع خاک آن ۲۲ متر از سقف تونل است با ۳ متر روباره و ۳۳ متر عمق آب زیرزمینی از سطح، با احتساب بار ترافیکی حداکثر جابجایی برابر ۳۷ میلی متر برآورد شد.

در تمام نمودارها به جز ممان خمشی، وجود آب زیرزمینی باعث اختلاف ثابتی میان مقادیر نهایی پارامترهای حاصل تاثیر از بارهای ترافیکی و استاتیکی می‌شود. با افزایش عمق آب زیرزمینی و خروج آن از محدوده ایستگاه تمام پارامترها با یکدیگر برابر می‌شوند. این موضوع می‌تواند نمایانگر تاثیر مهم آب زیرزمینی بر بیشتر پارامترهای نهایی باشد.

در تمام نمودارها، مقادیر نهایی پارامترهای حاصل از تاثیر بارهای ترافیکی، بیشتر از بارهای استاتیکی است و. تاثیر بیشتری بر تنش موثر، تنش کل، ممان‌های خمشی و جابجایی دیواره تونل دارند.

نمودارهایی که در آنها شیب خطوط ثابت هستند، آب زیرزمینی تاثیر بیشتری نسبت به تغییر روباره دارد. زیرا تغییر در سطح آب زیرزمینی یکنواخت فرض شده و تغییر در روباره، شیبدار است. علت تاثیر کمتر آب زیرزمینی بر ممان خمشی به دلیل تاثیرپذیری بیشتر ممان خمشی از جابجایی‌های ایجاد شده از تونل است. تغییر در آب زیرسطحی، بیشتر بر تنش کل تاثیر می‌گذارد.

- 7- Hwang C. L. & Yoon K. p., 1981, Multiple Attribute Decision Making: Methods And Application. New York: Springer, pp 229-472.
- 8-ITASCA Consulting Group, Inc., FLAC2D(2005),"Fast Lagrangian Analysis of Continua", Version 5, User's Manual.
- 9- MahmutYavuz, 2008, The Optimum Support Design Selection By Using AHPMethodFor The Main Haulage Road In WLCTuncbilek Colliery, Tunnelling and Underground Space Technology, 23P.
- 10-PLAXIS(2002), "2DPLAXIS Version 8.2".
- 11- Saatt T. L., 1980,The Analytical Hierarchy Process, McGraw Hill Company, New York.
- 12- Saatt T. L., 1990, "How to make a decision: The Analytic Hierarchy Process", European Journal of Operational Research , Vol 48, pp 9-26.
- 13- Yoon K. P. & Hwang C. L., 1995, Multiple Attribute Decision Making, Sage Publication, Thousand Oaks, CA, pp 163-572.



