

انتخاب روش نگهداری تونل مترو تهران خط ۳ فاز ۴ با روش TOPSIS

امیر حسین رستمی*^۱، کورش شهریار^۲، مهدی امیرافشاری^۳، فضل‌الله جهانگرد^۴

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات

۲- استاد دانشکده معدن و متالورژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر

۳- عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب

۴- کارشناس ارشد سازه دانشگاه صنعتی امیرکبیر

(*عهده دار مکاتبات - arostami80@gmail.com)

چکیده

هنگامی که تونل از شرایط زمینی ضعیف و متفاوتی عبور می‌کند و یا پوشش کم‌عمقی از خاک در بالای تاج تونل قرار دارد، توده خاک یا سنگ باید پایدار شده و سیستم نگهداری به گونه‌ای طراحی و اجرا شود تا میزان نشست و همگرایی که از مهم‌ترین عوامل طراحی تونل است کنترل شود. بنابراین به منظور انجام برنامه‌ریزی لازم برای ایجاد سیستم نگهداری با توجه به شرایط محل انجام پروژه، ارائه یک مدل تصمیم‌گیری در انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل در مرحله برنامه‌ریزی طراحی پروژه تونل ضروری است. هدف از انجام این تحقیق، ارائه طرحی است که بتوان با استفاده از آن، گزینه‌های مناسب سیستم نگهداری تونل متروی تهران خط ۳ فاز ۴ را مشخص و مناسب‌ترین گزینه را انتخاب کرد تا به عنوان الگوی مناسب برای مقاطع آبی استفاده شود. این مدل براساس عوامل فنی، اقتصادی، اجرایی، اجتماعی و سیاسی و عوامل ژئومکانیکی در محل انجام پروژه و با توجه به معیارهای متعدد شکل گرفت. از طرفی گزینه‌های انتخاب سیستم نگهداری تونل مترو، شامل لیتیس، تیر آهن، بتن مسلح با استفاده از سیستم قالب‌بندی مدولار، فورپولینگ، ورق فولادی موج‌دار و قطعات بتنی پیش ساخته است که در این مدل به کار گرفته شد. لذا براساس این معیارها و با استفاده از مدل‌های مختلف تصمیم‌گیری و روش‌های جدید تحقیق در عملیات، گزینه‌های مناسب، اولویت‌بندی شده و در نهایت گزینه E (چهار عدد لیتیس ۱۸ به فاصله ۱ متر به همراه ۱ لیتیس ۲۵، دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ) بر اساس روش TOPSIS به عنوان بهترین گزینه برای سیستم نگهداری مقطع انتخاب شده شناخته شد.

واژگان کلیدی: سیستم نگهداری، تصمیم‌گیری چند معیاره، متروی تهران خط ۳ فاز ۴، نشست، همگرایی.

۱- مقدمه

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 می‌شوند. با توجه به شرایط موجود، تونل‌ها باید به گونه‌ای طراحی شوند که کمترین میزان آسیب را به سازه‌های سطحی وارد و کمترین میزان تغییر شکل در سطح زمین ایجاد شود. پوشش و نگهداری اولیه زمین شامل استفاده از تیر آهن، لیتیس گیردر، قطعات بتنی پیش ساخته (سگمنت) و آرماتور است. علت استفاده از این نگهداری‌ها تثبیت و حفظ تونل پس از حفر آن و تامین ایمنی است (صالح زاده، ۱۳۸۸). انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل مترو بسیار مهم است اگر سیستم نگهداری با توجه به معیارهای مهم و تاثیرگذار به درستی انتخاب نشود باعث خسارات فراوان خواهد شد و هزینه‌های زیادی را به اجرا کنندگان طرح اعمال می‌کند، به این منظور از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره استفاده می‌شود. روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

همواره به مدیران و کارشناسان کمک می‌کند تا در شرایط مختلف بتوانند بهترین تصمیم‌گیری را داشته باشند. این روش‌ها در معادن و مسائل مربوط به معدن نیز وارد شده است.

در سال ۲۰۰۸ یاوز، طراحی و انتخاب سیستم نگهداری با روش AHP را برای راهرو اصلی معدن زغال سنگ زیرزمینی در کشور ترکیه انجام داد (Yavuz, 2008) و در سال ۲۰۰۹ قلی‌نژاد از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره برای انتخاب گزینه مناسب بازسازی زمین‌های استخراج شده در معادن روباز استفاده کرد. همچنین در سال ۲۰۰۷ باسکتین از روش‌های چندشاخصه در بازسازی یک معدن روباز استفاده کرد. در این مقاله با استفاده از روش رتبه‌بندی اولویت‌ها براساس مشابهت به راه‌حل ایده‌آل (TOPSIS) که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه (MADM) است، گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل مترو تهران خط ۳ فاز ۴ انتخاب گردید. در ابتدا گزینه‌ها و معیارهای موثر در انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل مترو تعیین گردید. 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 سیستم نگهداری تونل مترو انجام و گزینه مناسب انتخاب گردید.

۲- روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی AHP

فرآیند تحلیل سلسله مراتبی یکی از جامع‌ترین روش‌ها برای تصمیم‌گیری چندشاخصه است که توسط پروفیسور ساعتی در سال ۱۹۸۰ به وجود آمد. در این تکنیک امکان فرموله کردن مسأله به صورت سلسله مراتبی وجود دارد. علاوه بر این بر مبنای مقایسه زوجی بنانهاده شده، که قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌نماید و میزان سازگاری و ناسازگاری تصمیم را نشان می‌دهد. همچنین امکان در نظر گرفتن قضاوت‌های فردی و یا گروهی وجود دارد. روش AHP با ایجاد یک درخت تصمیم‌گیری سلسله مراتبی، معیارها و گزینه‌ها و هدف را مرتب می‌کند. مراحل روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی به صورت گام به گام معرفی می‌شود:

گام اول: درخت سلسله مراتبی

ایجاد درخت سلسله مراتبی جهت تعیین هدف، معیارها و گزینه‌ها.

گام دوم: ماتریس تصمیم‌گیری

ماتریس تصمیم‌گیری بر پایه مقیاس نه نقطه‌ای ساعتی بر مبنای جدول ۱ ایجاد می‌شود.

جدول ۱: مقیاس نه نقطه‌ای ساعتی (قلی‌نژاد، ۲۰۰۹)

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 ۴ و ۸	ترجیحات بین فواصل فوق

گام سوم: ماتریس مقایسات زوجی

بین اعضای ماتریس تصمیم‌گیری، مقایسات زوجی انجام می‌گیرد. مقایسات زوجی به منظور اهمیت و برتری نسبی شاخص‌ها نسبت به یکدیگر صورت می‌پذیرد. ماتریس مقایسات زوجی بین n شاخص به صورت زیر در رابطه ۱ نمایش داده می‌شود:

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

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

که در این رابطه a_{ij} نشان دهنده 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.

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

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.

$$W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \vdots \\ W_n \end{bmatrix} \quad (3)$$

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:

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

λ_{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. 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 (Saaty, 1980).

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

که 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.

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

نکته مهم این است که برای سازگاری ماتریس اصلی مقایسات زوجی، بایستی نظرات و مقایسات زوجی کارشناسان به یکدیگر نزدیک باشد در غیر این صورت احتمال ناسازگاری ماتریس زیاد خواهد بود.

۳- تحلیل با روش TOPSIS

این مدل توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ پیشنهاد شد. در این روش که یکی از بهترین مدل‌های تصمیم‌گیری است، m گزینه به وسیله n شاخص مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. اساس این تکنیک بر این مفهوم استوار است که گزینه انتخابی، بایستی کمترین فاصله را با راه حل ایده‌آل مثبت (بهترین حالت ممکن) و بیشترین فاصله را با راه حل ایده‌آل منفی (بدترین حال ممکن) داشته باشد (Yoon and Hwang, 1995).

گام اول: ماتریس بی‌مقیاس موزون

این 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.

$$v_{ij} = R_{ij} \times w_i = \begin{pmatrix} r_{11}w_1 & \dots & r_{1n}w_n \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{i1}w_1 & \dots & r_{in}w_n \end{pmatrix} \quad i = 1, \dots, i; j = 1, \dots, n \quad (7)$$

گام دوم: تعیین راه‌حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی

با استفاده از ماتریس بی‌مقیاس موزون که در آن شاخص‌ها مشخص شده‌اند، 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

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.

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

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

گام چهارم: تعیین نزدیکی نسبی یک گزینه به راه حل ایده آل

برای تعیین نزدیکی نسبی CL_i^* از رابطه ۱۲ استفاده می‌شود.

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

گام پنجم: اولویت بندی

در نهایت هر گزینه‌ای که دارای CL_i^* بزرگتری باشد گزینه مناسب خواهد بود و بر این اساس گزینه‌ها اولویت بندی می‌شوند.

۴- گزینه‌ها و معیارهای انتخاب سیستم نگهداری تونل مترو

تونل‌های مترو نقش بسیار موثری در کاهش ترافیک و بالا بردن کیفیت و کمیت سیستم حمل و نقل درون شهری ایفا می‌کنند. با توجه به عبور تونل از شرایط مختلف روباره زیاد و کم، عبور از زیر اتوبان، یا مناطق مسکونی، گزینه‌ها و معیارهای خاص برای هر قسمت وجود دارد. گزینه‌هایی که به عنوان سیستم نگهداری تونل متروی تهران خط ۳ فاز ۴ حد فاصل شمال پل همت صیاد شیرازی در نظر گرفته شد، شامل ده گزینه (A, B, C, D, E, F, G, H, I, J) می‌باشد که بر اساس معیارهای در نظر گرفته شده، گزینه مناسب انتخاب شد. معیارها شامل عوامل اقتصادی، عوامل اجرایی، عوامل اجتماعی و سیاسی، عوامل فنی و ویژگی‌های ژئومکانیکی محل می‌باشد که در ذیل معرفی می‌شود:

عوامل اقتصادی: هزینه سرمایه‌گذاری (C_1)، هزینه عملیاتی (C_2)، هزینه تامین منابع (C_3)، هزینه‌هایی که به دلیل شرایط پیش‌بینی نشده اضافه می‌شوند (C_4)

عوامل اجرایی: پتانسیل تامین بودجه (C_5)، دسترسی به نیروی کار متخصص (C_6)، دسترسی به ماشین آلات و تجهیزات مورد نیاز (C_7)، وجود و نیاز به تجربه مدیریتی-اجرایی (C_8)، توانایی اجرایی پروژه (C_9)، مهارت شخص بتن پاش (C_{10})، انعطاف پذیری روش کار به منظور تغییر اجرا در شرایط پیش‌بینی نشده (C_{11})، لزوم استفاده از کارشناس خارجی (C_{12})، میزان تلفات و آسیب‌های انسانی (C_{13})، نشست (اتفاق افتاده در کار) (C_{14})، مدیریت هزینه (مهندسی ارزش) (C_{15})

عوامل اجتماعی و سیاسی: اشتغال زایی (میزان نیروی کاری و حجم اشتغال زایی) (C_{16})، خط مشی دولت (C_{17})، خط مشی و اهداف شرکت کار کننده (C_{18})، سازگاری با شرایط محیطی (C_{19})، نیاز به دانش و مهارت خاص و در دسترس بودن دانش مورد نیاز (C_{20})، افزایش سطح مهارت و دانش فنی (C_{21})، اثر تحریم‌ها (C_{22})

عوامل فنی: تاثیر دهانه بازشدگی (C_{23})، نوع سیمان مورد استفاده (طرح اختلاط بتن) (C_{24})، انعطاف پذیری تغییر روش کاری (C_{25})، نیاز به سیستم زهکشی (C_{26})، ترتیب پیشروی (C_{27})، تاثیر میزان آب (سطحی و زیر زمینی) (C_{28})، تاثیر میزان مواد سولفاتی موجود در آب بر سیستم آب بند (C_{29})، تاثیر زلزله بر سیستم نگهداری (C_{30})، اجرایی بودن سیستم نگهداری انتخاب شده (C_{31})، قابلیت سیستم در تامین نگهداری در شرایط روباره کم عمق (C_{32})، قابلیت سیستم در تامین نگهداری در زمین‌های روان (C_{33})، قابلیت سیستم در تامین نگهداری زمین‌های سست و ضعیف (C_{34})، قابلیت سیستم در تامین نگهداری سنگ‌های له شده و به شدت خرد (C_{35})، تاثیر شعاع تونل (C_{36})، سختی نگهداری (K) و نسبت آن با سختی زمین (C_{37})، زمان نصب لاینینگ نهایی (C_{38})، ضخامت لاینینگ

نهایی (C39)، استفاده از فیبرهای فولادی (C40)، استفاده از مش برای مقاوم کردن (C41)، تحمل ماکزیمم فشار وارده بر سیستم نگهداری (C42)، وجود و اثر سازه‌های سطحی بر سیستم نگهداری (C43)، تغییر جنس لایه‌ها در اطرف و در محل تونل (C44)، تاثیر تزریق (C45)، فاکتور ایمنی (فاکتور ایمنی نهایی برای سیستم نگهداری) (C46)

ویژگی‌های ژئومکانیکی محل: چسبندگی (C) (C47)، زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) (C48)، مدول الاستیسیته (E) (C49)، مقاومت کششی (σ_t) (C50)، مقاومت فشاری (σ_c) (C51)، ضریب پواسون (ν) (C52)، مقاومت برشی (T) (C53)، کنترل وضعیت تنش (C54)، وضعیت آب در منطقه (C55)، وضعیت پیش‌بینی تغییر شکل سیستم نگهداری (C56)، ضخامت روباره (C57)، تاثیر سطح ایستابی (C58)، تاثیر میزان مواد سولفاته موجود در آب (C59)، میزان هوازدگی (C60)، تاثیر آب‌های سطحی (نزولات جوی) و آبیاری محیط پارک بالای تونل (C61)

گزینه‌ها

- A: لتیس ۲۵ با فاصله ۳۰ سانت به همراه دستک (میل‌گرد ۱۸)، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق (نمد، PVC، نمد)، بتن ریزی کف و لاینینگ (ضخامت ۵۰ سانت).
- B: تیر آهن ۱۸ به صورت دویل به همراه دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ (ضخامت ۵۰ سانت).
- C: لتیس ۲۵ با فاصله ۳۰ سانت به همراه تیر آهن ۱۸، دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ (ضخامت ۵۰ سانت).
- D: چهار عدد لتیس ۱۸ با فاصله ۵۰ سانت به همراه یک لتیس ۲۵، دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ.
- E: چهار عدد لتیس ۱۸ با فاصله ۱ متر به همراه یک لتیس ۵، دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ.
- F: چهار عدد لتیس ۱۸ با فاصله ۷۵ سانت به همراه یک لتیس ۵، دستک، ۲ لایه مش و شاتکریت، عایق، بتن ریزی کف و لاینینگ.
- G: بتن مسلح شده با آرماتور (نی لینگ، لتیس ۲۵ با فاصله ۳۰ سانت به همراه دستک، دولایه مش و شاتکریت، عایق، استفاده از فیبرهای فولادی در بتن که در قالب قرار می‌گیرند).
- H: روش فور پلینگ (فور پلینگ، لتیس ۲۵ با فاصله ۳۰ سانت به همراه دستک، دو لایه مش شاتکریت، عایق و لاینینگ).
- I: استفاده از ورق فولادی موج دار (لتیس ۲۵ با فاصله ۳۰ سانت به همراه دستک، دو لایه مش شاتکریت، عایق، ورق فولادی موج دار).
- J: استفاده از سگمنت‌ها (حفاری مقطع با TBM).

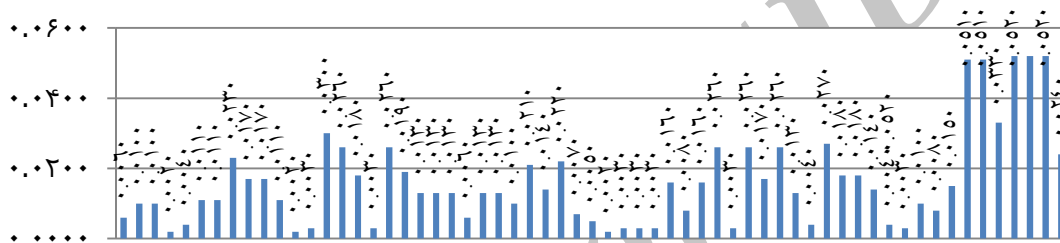
۵ - انتخاب سیستم نگهداری تونل مترو تهران خط ۳ فاز ۴

ابتدا برای به دست آوردن وزن شاخص‌ها از روش فرآیند تحلیل سلسله مراتبی استفاده شد. در این تحقیق، جهت بهبود و دقت بیشتر وزن‌های به دست آمده، از روش AHP گروهی استفاده شد. قضاوت‌ها با استفاده از پنج 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 به دست آمد. بدین ترتیب قسمتی از ماتریس بی‌مقیاس در جدول ۲ و وزن‌های نهایی به دست آمده در شکل ۱ نشان داده شده است. ورودی الگوریتم

TOPSIS بایستی به صورت ماتریس بی‌مقیاس موزون باشد. بنابراین با استفاده از رابطه ۷ ماتریس بی‌مقیاس موزون بدست آمد. با استفاده از رابطه ۸، راه حل ایده‌آل مثبت A^* و با استفاده از رابطه ۹، راه حل ایده‌آل منفی A^- برای هر شاخص به دست آمد. جدول ۳ قسمتی از ماتریس بی‌مقیاس موزون و راه‌های ایده‌آل مثبت و منفی را برای هر شاخص نشان می‌دهد. پس از بدست آمدن راه‌های 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^- به دست 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.

جدول ۲: قسمتی از ماتریس بی‌مقیاس شده موزون برای گزینه‌های سیستم نگهداری

گزینه‌ها معیارها	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
C1	0.000528	0.000240	0.000372	0.000924	0.001608	0.001566	0.000102	0.000084	0.000408	0.000162
C61	0.002424	0.001488	0.001896	0.003408	0.006144	0.004920	0.000672	0.000360	0.001152	0.001512

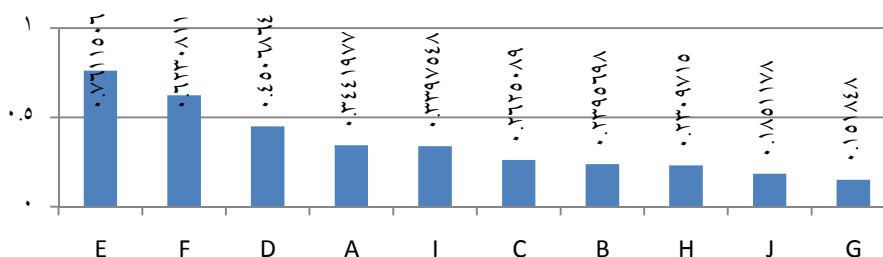
شکل ۱: نمودار وزن معیارهای به دست آمده برای انتخاب سیستم نگهداری که معیار C_1 تا معیار C_{61} از چپ به راست قرار دارد.

جدول ۳: قسمتی از راه‌های ایده‌آل مثبت و منفی برای انتخاب گزینه سیستم نگهداری

C1	0.001608	0.000084
C61	0.006144	0.000360

جدول ۴: فاصله از ایده‌آل‌های مثبت و منفی و اولویت‌بندی نهایی گزینه سیستم نگهداری تونل

گزینه‌ها	فاصله از ایده‌آل مثبت	فاصله از ایده‌آل منفی	نزدیکی نسبی به گزینه ایده‌آل	اولویت بندی
A	0.0267777	0.0140543	0.3441977	4
B	0.0330497	0.0104121	0.2395698	7
C	0.0311902	0.0111021	0.2625089	6
D	0.0225808	0.0185265	0.4506864	3
E	0.0114027	0.0363374	0.7611506	1
F	0.0164936	0.0272655	0.6230811	2
G	0.0365900	0.0065509	0.1518480	10
H	0.0377447	0.0113363	0.2309715	8
I	0.0328976	0.0169288	0.3397548	5
J	0.0368453	0.0083702	0.1851178	9



شکل ۲: رتبه بندی نهایی انتخاب گزینه سیستم نگهداری تونل با روش TOPSIS

۶- تحلیل عددی

تحلیل عددی بر مبنای روش‌های اجزای محدود و تفاضل محدود و استفاده از نرم افزارهای PLAXIS و FLAC انجام شد. فرایند تحلیلی از طریق مدلسازی دو بعدی مراحل حفاری و اجرای سازه نگهبان تونل و نیز انجام محاسبات به کمک هر یک از نرم افزارهای فوق الذکر صورت گرفت. همچنین رفتار لایه های زیر سطحی بر مبنای پارامترهای ژئوتکنیکی موجود مورد ارزیابی قرار گرفت. علاوه بر این به منظور بررسی تاثیر عملیات حفاری زیرزمینی مسیر تونل بر توده زمین، دو مدل رفتاری موهر- کلمب و سخت شونده همسان که در واقع مدل رفتاری اصلاح شده مدل موهر- کلمب با قابلیت وابسته نمودن مدول تغییرشکل بر سطح تنش اعمال شده است، استفاده شد. پارامترهای ژئوتکنیکی استفاده شده به شرح جدول زیر به نرم افزار معرفی شد. لازم به ذکر است به منظور کنترل صحت نتایج تحلیل عددی، ضمن استفاده از نرم افزار PLAXIS و ارزیابی نتایج تحلیل های اندرکنشی از دو مدل رفتاری موهر- کلمب و سخت شونده همسان برای شبیه سازی رفتار تغییرشکل توده زمین استفاده شد. همچنین به منظور صحت گذاری بر فرایند تحلیلی انجام شده توسط نرم افزار مذکور، تحلیل مدل عددی دو بعدی عملیات اجرای تونل بر مبنای استفاده از روش تفاضل محدود و توسط نرم افزار FLAC و برای روبراه خاکی روی تاج تونل انجام شد (ITASCA, 2005, PLAXIS, 2002).

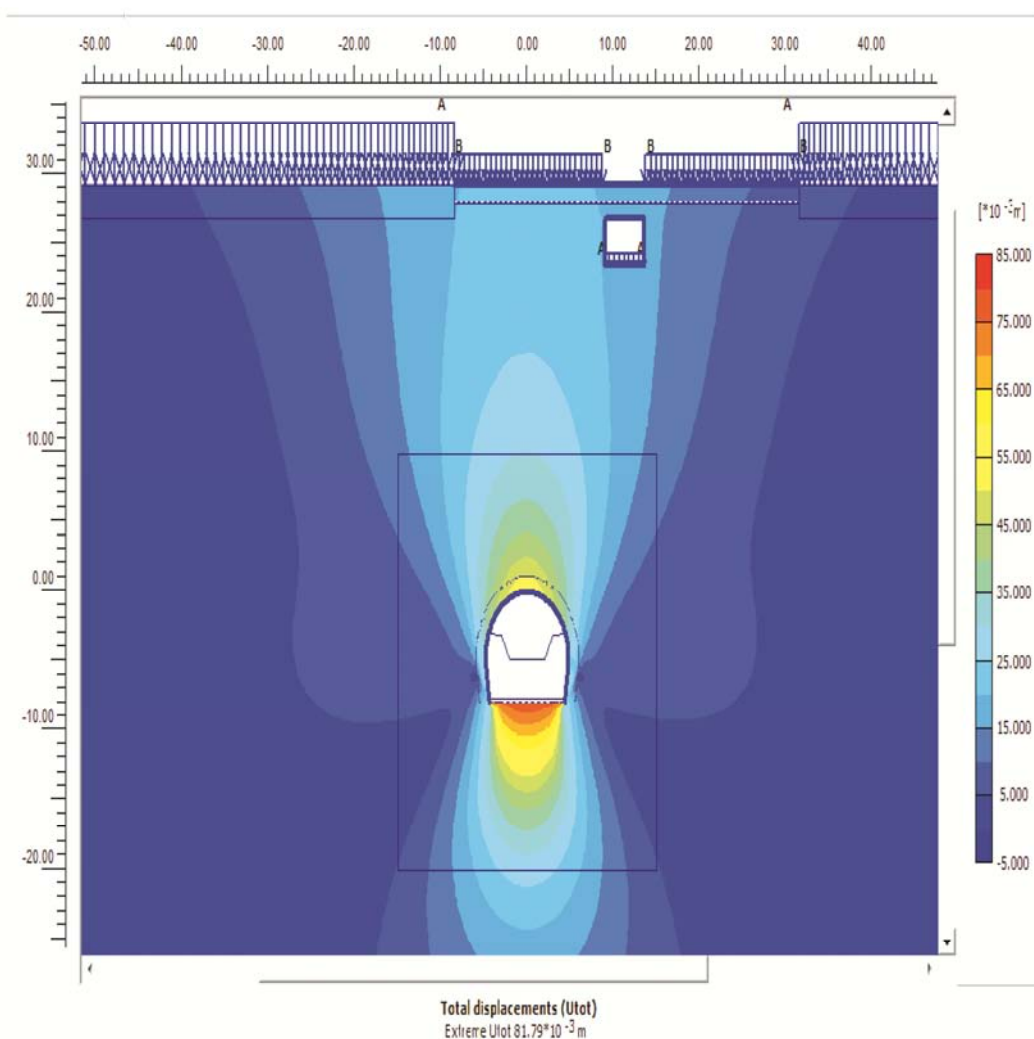
جدول ۵: مشخصات ژئوتکنیکی کلی لایه‌های شناسایی شده در مسیر توسعه شمالی خط ۳-۲

مشخصه ژئوتکنیکی نوع لایه	استحکام	درصد رطوبت (ω) (%)	دانسیته خشک (γ_d) ($\frac{gr}{cm^3}$)	ضریب چسبندگی (c) ($\frac{kg}{cm^2}$)	زاویه اصطکاک داخلی (ϕ) (درجه)	ضریب پواسون (ν)	ضریب ارتجاعی (E_s) ($\frac{kg}{cm^2}$)
SC/SM و GC/GM	بسیار متراکم تا متراکم	۳-۲۰	۱/۶۵-۲	۰/۵	۳۵-۴۲	۰/۳-۰/۳۵	۵۰۰-۱۳۰۰
CL	سفت تا سخت	۱۰-۲۵	۱/۵-۱/۷	۰/۱-۰/۲	۳۸	۰/۳۵-۰/۴	۲۰۰-۵۰۰

مدلسازی مراحل ساخت سازه نگهبان با کمک روش اجزای محدود انجام شد که مدلسازی به صورت کرنش مسطح انجام شده توده خاک با استفاده از اجزای مثلثی ۶ گرهی و با رفتار پلاستیک و معیار تسلیم موهر- کلمب مدل سازی شد. به منظور کاهش اثرات مرزی باید محدوده مناسبی برای مسئله در نظر گرفته شود. و مرزهای مدل از محدوده تنش و تغییر شکل به اندازه کافی فاصله داشته باشند به طوری که وضعیت تنش ها و تغییر شکل ها در این نقاط، در قبل و بعد از اعمال تغییرات در مدل تفاوت چندانی نداشته باشد (بهپور گوهری، ۱۳۸۵). همچنین توصیف وضعیت نمونه‌های خاک بدست آمده از لایه‌های زیر سطحی در حین عملیات حفاری گمانه های واقع در امتداد مسیر پروژه، نشانگر وجود بافت عمدتاً متشکل از مصالح درشت دانه در اندازه ماسه و شن به همراه درصد نسبتاً کم و متفاوتی از مصالح ریز دانه از جنس لای و رس است. علاوه بر این نتایج آزمایش نفوذ استاندارد SPT در گمانه‌های حفر شده در امتداد مسیر پروژه نشانگر تعداد ضربات ثبت شده در طی انجام این آزمایش به مقدار بیش از ۵۰ ضربه و با توجه به نفوذ کم مخروط نشانگر وجود لایه‌های دارای بافت بسیار متراکم می‌باشد. مشخصات پلاستیسیته نمونه‌های اخذ شده از لایه‌های خاکی، معرف وجود مصالح غیر پلاستیک و یا دارای خواص پلاستیسیته بسیار کم می‌باشد که این وضعیت به دلیل وجود بافت درشت دانه در مصالح تشکیل دهنده لایه‌های زیر سطحی، قابل تصور می‌باشد (رستمی، ۱۳۸۹).

۷- ضخامت روباره روی تاج سازه نگهدار تونل ۲۹ تا ۲۹/۵ متر - مدل گسیختگی موهر - کلمب (MC)

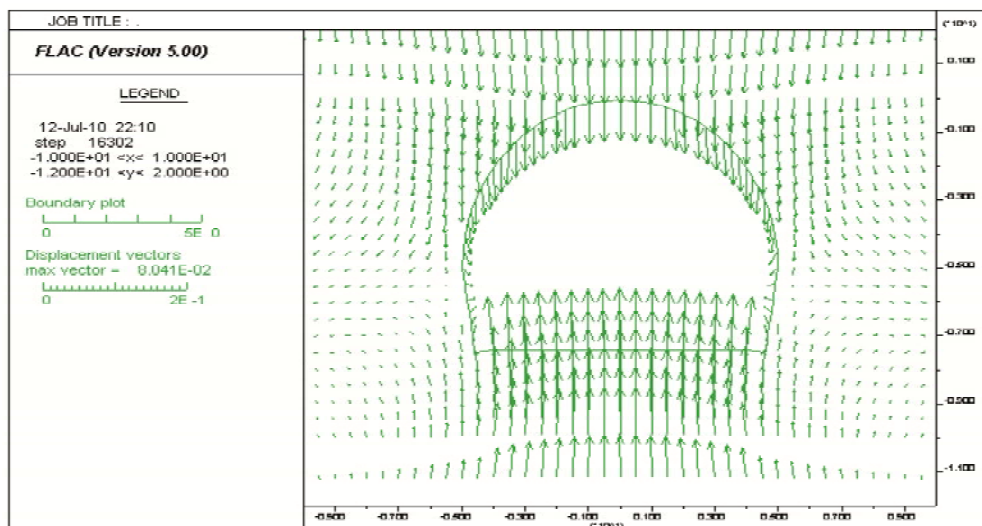
در این بخش نتایج تحلیل عددی حفاری دو مرحله‌ای تونل و اجرای سازه نگهدار آن بر مبنای معیار گسیختگی موهر - کلمب برای رفتار تنش - تغییرشکلی توده زمین در نظر گرفته شده است. به منظور کنترل نتایج مدلسازی عددی عملیات اجرایی تونل خط ۳ مترو، مراحل عملیات حفاری تونل در دو مقطع و نصب سازه نگهدار به کمک نرم‌افزار تفاضل محدود (FLAC)، مدلسازی شده و رفتار ژئوتکنیکی توده خاک و نیروهای تولید شده در اعضای سازه نگهدار مورد بررسی قرار گرفته است. که تغییر مکان توده خاک به صورت بالازدگی کف تونل به میزان ۸۲ میلیمتر و حداکثر نشست سطح زمین در حدود ۲۰ میلیمتر در شکل ۴ برآورد شده است.



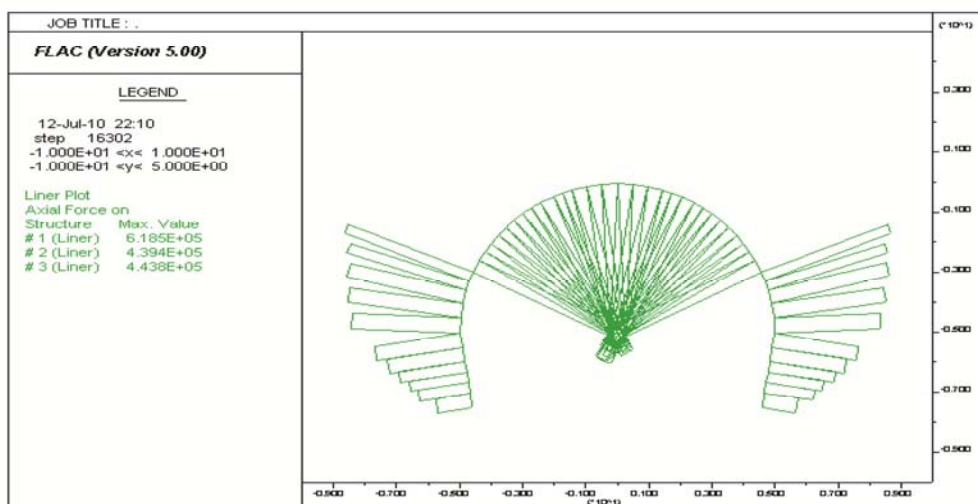
شکل ۴: تغییر شکل ایجاد شده و روند تشکیل سرعت تغییر مکان در توده زمین اطراف مقطع مرحله‌بندی شده تونل (مدل MC)

شکل ۵ مربوط به بردارهای تغییر شکل است که نشان دهنده وقوع بالازدگی در کف مقطع حفاری تونل به میزان حداکثر ۸۰ میلیمتر می‌باشد. تغییر شکل ایجاد شده در محیط خاکی بسیار نزدیک به نتیجه تحلیل با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS است.

شکل ۶ توزیع نیروی محوری ایجاد شده در سازه نگهدارنده تونل در اثر حفاری دو مرحله‌ای مقطع تونل که حداکثر آن در حدود ۶۳ تن محاسبه شده است را نشان می‌دهد که این مقدار نیروی محوری قابل مقایسه به مقدار ۷۲ تن محاسبه شده توسط نرم‌افزار PLAXIS می‌باشد.



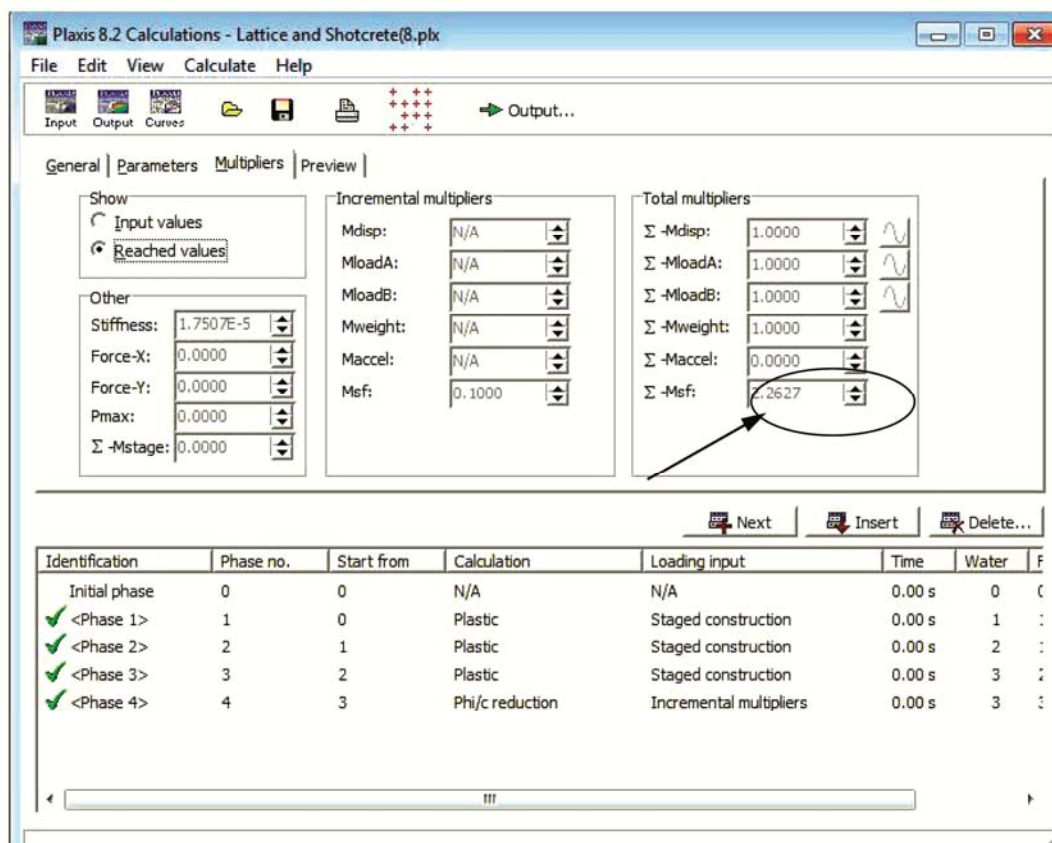
شکل ۵: بردارهای تغییرشکل که نشان دهنده وقوع بالازدگی در کف مقطع حفاری تونل به میزان حداکثر ۸۰ میلی‌متر می‌باشد



شکل ۶: توزیع نیروی محوری ایجاد شده در سازه نگهدارنده تونل در اثر حفاری دو مرحله‌ای مقطع تونل

با توجه به نتایج تحلیل‌های صورت گرفته بر مبنای انتخاب مدل‌های رفتاری موهر - کلمب (MC) و سخت شوندگی (HS) برای لایه‌های زیرسطحی خاکی در محدوده پروژه، به نظر می‌رسد برآورد نیروهای داخلی سازه نگهدارنده و طراحی آن‌ها در شرایطی که حفاری تونل به صورت عمیق (به صورتی که ضخامت روباره بیش از عرض مقطع تونل باشد) انجام شود، بر مبنای مدل رفتاری HS به نتایج منطقی تری منجر می‌گردد به منظور اطمینان از عدم وقوع گسیختگی برشی در توده خاک در اثر عملیات حفاری زیرزمینی مسیر تونل مترو پایدار یا ناپایداری توده خاک برای بحرانی‌ترین وضعیت عملیات اجرایی (در شرایط روباره کم به میزان تقریبی ۸ متر) توسط نرم‌افزار مربوطه محاسبه شد که در شکل ۷ مقدار آن نشان داده شده است. لازم به ذکر است که نحوه محاسبه ضریب اطمینان مورد بحث براساس

روش کاهش پارامترهای مقاومتی توده خاک تا حصول وضعیت شروع گسیختگی تحلیل شد و مقدار آن برای شرایط بحرانی ریزش از طاق تونل به صورتی که در اشکال بالا نشان داده شده، معادل ۲/۲۶ محاسبه شده است.



شکل ۷: ضریب اطمینان محاسبه شده در مقابل ریزش سقف تونل به روش کاهش پارامترهای مقاومت برشی

۸- نتیجه گیری

نوع انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل مترو بسیار حایز اهمیت است. به گونه‌ای که اگر گزینه‌ای که انتخاب می‌شود 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 روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره ضروری است. امروزه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره به علت استفاده از افراد کارشناس و خبره و کمک به مدیران در گرفتن تصمیم‌های مناسب جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده است. در این مقاله انتخاب سیستم نگهداری تونل مترو با ۶۱ معیار و ۱۰ گزینه انجام شد که با اجرای این مدل بر روی تونل متروی تهران خط ۳ فاز ۴ گزینه E ($E=0/761$)، با اختلاف زیادی نسبت به گزینه F ($F=0/62$) و گزینه‌های دیگر به عنوان گزینه مناسب انتخاب گردید. به همین دلیل نقش مدل‌سازی و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مشخص شد. وزن شاخص‌ها با روش AHP بدست آمد. این روش به دلیل ایجاد مسئله به صورت سلسه مراتبی مقایسات زوجی بین گزینه‌ها، اعمال سازگاری و ناسازگاری بین مقایسات و همچنین وجود نرم افزارهای تایید شده، پرکاربرد و قابل اطمینان است. استفاده از AHP گروهی باعث دقیق‌تر شدن مقایسات زوجی و بدست آمدن وزن‌های مناسب‌تر گردید. روش TOPSIS نیز الگوریتمی ساده و قابل فهم برای مدیران دارد و یکی از بهترین و پرکاربردترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره

است. مقایسه نتایج تحلیل با روش اجزاء محدود با نرم افزار PLAXIS و تفاضل محدود به کمک نرم افزار FLAC، نشاندهنده عملکرد قابل قبول تصمیمگیری انجام شده و تأیید آن در شرایط اجرایی در محل انجام پروژه است. با مقایسه نتایج حاصل از نرم افزارهای FLAC و PLAXIS و با توجه به ضریب اطمینان بدست آمده ($f_s=2/2627$) برای گزینه E پایداری بلند مدت سیستم نگهداری انتخاب شده با روش TOPSIS تأیید شد.

منابع

۱. بهپور گوهری، م.، ۱۳۸۵. آموزش جامع PLAXIS V8، 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.
۳. صالح زاده، ح.، ۱۳۸۸. طراحی و مهندسی تونل و شفت در سنگ، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا-قرب نوح، ۵۳۰ص.
4. 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.
5. 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.
6. Gholinejad, A., Sargheini, J. and Amirafshar, M., 2009. Choosing the post –mining for open pit mine using mulit Attributes precision making techniques. Journal of geology and environmental.
7. Hwang, C. L. and Yoon, K.P., 1981. Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application. New York: Springer.
8. ITASCA Consulting Group, Inc., FLAC 2D, 2005. Fast Lagrangian Analysis of Continua. Version 5, User's Manual.
9. Yavuz, M., 2008. The Optimum Support Design Selection By Using AHP MethodFor The Main Haulage Road In WLC Tuncbilek Colliery, Tunnelling and Underground Space Technology, 23.
10. PLAXIS, 2002. 2D PLAXIS 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. and Hwang, C. L., 1995. Multiple Attribute Decision Making, Sage Publication, Thousand Oaks, C.