کنفرانس بین المللی مدیریت و مهندسی صنایع
10 March 2015 International conference
ON MANAGEMENT AND INDUSTRIAL ENGINEERING

رتبه‌بندی گزینه‌های حفاری تونل‌های حمل و نقلی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره ELECTRE

فاطمه جزو وزیری[۱،*]، مهدی روانشادنیا[۲]، شاهین شعبانی[۳]

*۱ و *- دانشجوی کارشناسی ارشد در رشته مهندسی و مدیریت ساخت، گروه مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و تحقیقات ،*
f.jozvevaziri@srbiau.ac.ir

۲- استادیار، دکتری مدیریت ساخت، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و تحقیقات، ravanshadnia@yahoo.com

۳- استادیار، دکتری راه و ترابری، گروه مهندسی و مدیریت ساخت، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه علوم و تحقیقات،
shabani@iust.ac.ir

Archive of SID

چکیده

انتخاب روش درست حفاری تونل تصمیمی پیچیده بوده که نیاز به در نظر گرفتن بسیاری از فاکتورهای فنی، اقتصادی و محیطی دارد. برای یک تونل، یک روش مشخص حفاری وجود ندارد، و معمولا دو یا چند روش عملی می‌باشد. هر روش شامل تعدادی مشکلات طبیعی است. در نتیجه روش بهینه، روشی است که کمترین مشکلات را داشته باشد. اگرچه تجربیات و قضاوت‌های مهندسی هنوز هم اصلی‌ترین عامل در انتخاب روش‌های حفاری هستند، ولی برای تحلیل جزئی‌تر داده‌های موجود در انتخاب روش حفاری مناسب، تفاوت‌های نامشهود موجود در خصوصیات هر منطقه و سرمایه‌گذاری زیاد در پروژه‌های عمرانی بزرگ نیاز به داشتن تحقیقات علمی و سیستماتیک دارد. هدف از انجام این تحقیق انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل با استفاده از یک روش علمی و سیستماتیک است. برای تحقق این هدف از روش ELECTRE که یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، استفاده شده است. دلیل این انتخاب به کارگیری روشی جدید و متفاوت با کارهای مشابه قبلی می‌باشد. در این مقاله وزن معیارها با استفاده از نظر متخصصین و توسط پرسشنامه به‌دست آمده و اولویت‌بندی گزینه‌های حفاری برای یک مطالعه موردی صورت پذیرفته است. در نهایت TBM به عنوان مناسب ترین گزینه حفاری برای بخشی از پروژه خط ۶ متروی تهران انتخاب شد.

واژگان کلیدی: تصمیم‌گیری چند معیاره (MADM)، ELECTRE، TBM، رودهدر، خط ۶ مترو.

www.SID.ir

کنفرانس بین المللی مدیریت و مهندسی صنایع
۱۹ اسفند ۱۳۹۳
10 March 2015
International conference
ON MANAGEMENT AND INDUSTRIAL ENGINEERING
مرکز همایش های بین المللی صدا و سیما
ISC ISI

Ranking of alternatives for drilling transportation tunnels by using ELECTRE Multi Criteria Decision Making

Abstract

Selecting a correct method for drilling a tunnel is a complex decision that requires consideration of several technical, economic and environmental factors. For a tunnel, there isn't an excavation systematic procedure, and usually two or more methods are practical. Each of methods consists of a number of natural problems. Therefore, a method that has the least problems is an optimal method. Although experience and engineering judgment are still the most important factor in choosing excavation methods, but for a more detailed analysis of the data in the selection of appropriate excavation, intangible differences in characteristics of each region and large investment in major civil projects need to have a systematic scientific research. The purpose of this study is to select the most appropriate tunnel excavation method using a scientific and systematic method. To accomplish this, the ELECTRE method that is a multi-criteria decision-making method, is used. The reason is the use of a new method and different from similar previous works. In this paper, weight of the criteria is obtained from experts' opinion and questionnaires, and prioritization of excavation alternatives has been done for a case study. Finally TBM is selected as the most appropriate excavation alternative for a part of the project Tehran Metro Line ۶.

Keywords: Multiple Attribute Decision Making(MADM); ELECTRE; Tunnel Boring Machines(TBM); Roadheader; Tehran Metro Line ۶.

Archive of SID

۱- مقدمه

احداث تونل در یک کشور از نظر مسائل اقتصادی، اجتماعی و در مواردی از نظر مسائل سیاسی حائز اهمیت می باشد. لذا اجرای یک پروژه تونلسازی، مستلزم یک برنامه ریزی بسیار دقیق می باشد. از سوی دیگر در در مباحث مهندسی سنگ و علوم وابسته به زمین، به دلیل عدم قطعیت در تعیین ویژگی ها و رفتار واقعی سنگ، همیشه اجرای یک برنامه ریزی دقیق در این مورد بسیار مشکل است. یکی از مهمترین مباحث در یک پروژه تونلسازی، انتخاب نوع روش حفاری است. در این زمینه تحقیقات زیادی انجام شده که در بین آن‌ها کمتر از روش‌های سیستماتیک استفاده شده است. میوه چی برای تونل قمرود (میوه‌چی، ۱۳۸۲) و صداقتی برای خط ۷ متروی تهران (صداقتی، ۱۳۹۰)، با استناد به دلایل فنی روش حفاری مناسب را انتخاب کرده اند. همچنین زمانی برای تونل انتقال آب گلاب (زمانی، ۱۳۸۵)، جزایری برای خط ۴ متروی تهران (جزایری، ۱۳۸۵)، عسکری برای تونل انتقال آب کرج (عسکری، ۱۳۸۶) در داخل کشور و در سال ۲۰۰۱ Jethwa JL (Jethwa، ۲۰۰۱) و در سال ۲۰۰۷ Rick P (Rick، ۲۰۰۷)، با مقایسه مزایا و معایب هر روش این انتخاب را انجام دادند. البته در این میان محققانی هم از روش‌های تصمیم‌گیری استفاده کرده اند: به عنوان مثال طاهری برای قطار شهری اصفهان (طاهری، ۱۳۸۲)، دلیریان برای تونل انتقال آب قمرود (دلیریان، ۱۳۸۵)، میخک برای تونل متروی شیراز (میخک، ۱۳۸۸)، نیک‌منش برای تونل انتقال آب بهشت آباد (نیک‌منش، ۱۳۹۰)، در داخل کشور و O. Acaroglu برای حوزه ذغال سنگ Cayirhan (Acaroglu، ۲۰۰۶) و Oraee برای حوزه ذغال سنگ طبس (Oraee، ۲۰۱۰) در خارج از کشور با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) اقدام به انتخاب روش مناسب حفاری تونل کرده اند. در این مقاله از روش تصمیم‌گیری چند معیاره الکتر استفاده شده که روشی سیستماتیک و جدید است.

۲- انواع روش‌های حفاری تونل

تونل‌ها نوعی سازه زیر زمینی می‌باشند که از لحاظ کاربری به سه دسته کلی تونل‌های حمل و نقل، صنعتی و معدنی تقسیم می‌شوند (مدنی، ۱۳۸۳). روش‌های مختلفی برای اجرای حفر پروژه‌های تونل وجود دارد که به جز برخی از روش‌های خاص حفر تونل که گسترش زیادی پیدا نکرده اند، روش‌های عمده حفاری تونل را می‌توان به شرح ذیل طبقه‌بندی کرد:

الف- چالزنی و آتشباری[۱]

ب) ماشین‌های حفار بازویی[۲]

ج) ماشین‌های مکانیزه حفاری تمام مقطع[۱]

[۱] -Drill & Blast (D&B)

[۲] -Roadheader

www.SID.ir

۲-۱- روش چالزنی و آتشباری

در روش چالزنی و آتشباری به منظور حفر تونل و فضای زیرزمینی در سنگ‌های سخت، پس از حفر چال‌های انفجاری که تعداد و طول آن‌ها متناسب با اندازه مقطع حفاری و طول پیشروی است، عملیات خرج‌گذاری انجام شده و سپس آتشباری انجام می‌شود. در اثر انفجار سنگ‌های جبهه کار خرد شده و از محل خود جدا می‌شوند و بدین ترتیب، پیشروی تونل در سنگ انجام می‌گیرد. (Olofsson، ۱۹۸۸)

۲-۲- حفاری با استفاده از ماشین‌های بازویی

در ماشین‌های بازویی، یک یا چند بازوی حفار وجود دارد که سطح مقطع آن به مراتب کمتر از سطح مقطع تونل است که با جابه‌جا کردن آن در نقاط مختلف مقطع، تونل را حفاری می‌کنند. قابلیت انعطاف و طرح اشکال مختلف در مقاطع تونلی و قابلیت مانور برای حفاری تقاطع راهروها از خصوصیات اصلی ماشین‌های بازویی می‌باشد.

تجربیات انجام شده در پروژه‌های تونل نشان داده است که دستگاه‌های بازویی را می‌توان با موفقیت در محدوده وسیعی از سنگ‌های با مقاومت مختلف به کار برد. اما وجود سطوح ضعف ذاتی در سنگ نظیر درزه‌ها و صفحات لایه‌بندی، ممکن است قابلیت حفاری دستگاه را محدود سازد.

مهمترین اجزای دستگاه عبارت است از بدنه، موتور، بازو، سرمته، ناخن‌های حفار و سیستم بارگیری است.

۲-۳- حفاری با استفاده از ماشین حفاری تمام مقطع

ماشین تمام مکانیزه برای حفر تمام مقطع تونل است که به دلیل نیاز به سرمایه زیاد استفاده از آن در تونل‌های بلند توجیه پذیر است و بر اساس طبقه‌بندی پیشنهادی توسط انجمن بین‌المللی تونل سازی (ITA) در سال ۲۰۰۰ می‌توان ماشین‌های حفر تمام مقطع تونل را در دو گروه اصلی قرار داد (حسن پور، ۱۳۸۹):

- ماشین‌های سنگ سخت
  - ماشین‌های باز یا ماشین‌های کفشک دار
    - یک کفشکه
    - دو کفشکه
  - ماشین‌های دارای سپر
    - تک سپره
    - سپر دوگانه یا تلسکوپی
- ماشین‌های‌زمین نرم
  - سپر دوغابی
  - سپر ترکیبی
  - سپر متعادل کننده فشار زمین

در این مقاله ما سه روش اصلی انفجار، رودهدر و تی بی ام، همچنین با توجه به مثال موردی که متروی شهری است، دو روش روسی و اتریشی را که در ایران مرسوم اند را به عنوان گزینه‌های تصمیم‌گیری در نظر گرفتیم.

۳- عوامل تاثیر گذار در انتخاب نوع روش حفاری تونل

عواملی بسیار زیادی در انتخاب روش حفاری تونل موثرند که بر اساس مطالعات انجام شده و نظرات خبرگان معیارهای زیر در نظر گرفته شد:

X_1: پارامترها و مخاطرات ژئوتکنیکی (مقاومت سنگ، وجود خاک چسبنده، آب زیرزمینی، ناپایداری سینه کار و دیواره‌ها و ...)

X_2: پارامترهای هندسی (سطح مقطع، طول، شیب کف و عمق تونل، وجود قوس در مسیر تونل)

X_3: پارامترهای عملیاتی (برنامه زمانبدی، فضای عملیاتی، ابعاد شفت، تجهیزات موجود، قابلیت دسترسی به سینه کار و انعطاف پذیری اجرایی، کارگر بر بودن، وجود سازه‌های بحرانی)

X_4: عوامل مدیریتی (ریسک یا احتمال موفقیت، سهولت تامین منابع مورد نیاز)

X_5: پارامترهای زیست محیطی (ایمنی، تهویه، سرو صدا، لرزش، مخاطرات بهداشتی، خشک شدن چشمه‌ها)

X_6: پارامترهای اقتصادی (سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تجهیزات، سیستم پشتیبانی، عملیاتی، تعمیر و نگهداری)

X_7: موقعیت و محل احداث تونل (محیط شهری، دسترسی به دهانه‌ها، محدودیت‌های سطح زمین)

X_8: دانش و تکنولوژی موجود (تجربه محلی)

X_9: مقررات و استانداردهای عمومی (قوانین حاکم، استانداردهای زیست محیطی، الزامات در طول عملیات، پوشش داخلی تونل)

---

[۱] -TBM (Tunnel Boring Machines)

Archive of SID
www.SID.ir

x_{10}: هدف از اجرای پروژه (آبرسانی، عبور فاضلاب یا تاسیسات شهری، اکتشفات معدن، حمل و نقل عمومی)

با گرفتن نظرات ۱۰۰ نفر مشاور و پیمانکار متخصص در زمینه تونل از طریق پرسشنامه وزن‌های زیر حاصل شد (جدول ۱):

جدول ۱: وزن معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین

معیار	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
وزن	۹/۵۵	۶/۶۷	۷/۲۵	۶/۱	۵/۳	۷/۳۸	۷/۳۵	۵/۹۸	۴/۶۲	۵/۲۱

۴- روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره

تصمیم‌گیری چند شاخصه[۱] به تصمیمات خاصی (از نوع ترجیحی) مانند ارزیابی، اولویت‌گذاری و یا انتخاب از بین گزینه‌های موجود (که گاه باید بین چند شاخص متضاد انجام شود) اطلاق می‌گردد.

انواع مختلفی از مسائل MADM وجود دارند که تمامی آن‌ها در خصوصیات زیر مشترکند (آذر، ۱۳۸۷):

گزینه‌ها، شاخص‌های چندگانه، واحدهای بی مقیاس و وزن شاخص‌ها.

مدل‌های MADM به دو بخش کلی تقسیم می‌شوند (آذر، ۱۳۸۷):

الف) مدل‌های جبرانی

این مدل مشتمل بر روش‌هایی است که در آن‌ها اجازه مبادله بین شاخص‌ها مجاز است. یعنی تغییری احتملا کوچک در یک شاخص می‌تواند توسط تغییری مخالف در شاخص یا شاخص‌های دیگر جبران شود. از این دسته روش‌ها به ترتیب می‌توان روش‌های تحلیل سلسله مراتبی (AHP)، الکتر، تاپسیس، مجموع ساده موزون و . . . را نام برد.

ب) مدل‌های غیر جبرانی

این مدل‌ها شامل روش‌هایی می‌شوند که در آن‌ها مبادله بین شاخص‌ها امکان پذیر نمی‌باشد. ویژگی این مدل‌ها سادگی آن‌ها بوده و با محدود بودن اطلاعات تطابق دارد. از این دسته روش‌ها می‌توان متد تسلط، لکسیکوگرافیک و متد حذف را نام برد.

۴-۱- شرح روش الکتر[۲]

در این روش به جای رتبه‌بندی گزینه‌ها از مفهوم جدیدی معروف به "غیر رتبه ای" استفاده می‌شود، بدین صورت که مثلا $A_k \rightarrow A_l$ بیانگر آن است که اگرچه گزینه‌های k و l هیچ ارجحیتی از نظر ریاضی به یکدیگر ندارند اما تصمیم‌گیرنده و آنالیست ریسک بهتر بودن A_k را بر A_l می‌پذیرند (اصغرپور، ۱۳۹۰).

در این روش کلیه گزینه‌ها با استفاده از مقایسات غیر رتبه‌ای مورد ارزیابی قرار گرفته و بدان طریق گزینه‌های غیر موثر حذف می‌شوند.

۴-۲-الگوریتم

الگوریتم این روش در نه مرحله به شرح زیر است (اصغرپور، ۱۳۹۰):

قدم یکم- تبدیل ماتریس تصمیم‌گیری D به یک ماتریس "بی مقیاس" با استفاده از رابطه (۱):

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}} \qquad (1)$$

قدم دوم- تشکلیل ماتریس "بی مقیاس وزین" (V) با استفاده از بردار معلوم W به عنوان ورودی به الگوریتم (رابطه ۲ و ۳). یعنی:

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n\} \approx (\text{DM مفروض از}) \qquad (2)$$

$$\text{ماتریس بی مقیاس وزین} = V = N_D . W_{n\times n} = \begin{vmatrix} V_{11}, \dots V_{1j}, \dots V_{1n} \\ . \quad . \quad . \\ . \quad . \quad . \\ V_{m1}, \dots V_{mj}, \dots V_{mn} \end{vmatrix} \qquad (3)$$

[۱] -Multiple Attribute Decision Making
[۲] -ELECTRE

Archive of SID
www.SID.ir

قدم سوم- مشخص نمودن مجموعه هماهنگی و مجموعه نا هماهنگی برای هر زوج از گزینه‌های: $k,l = ۱,۲,\dots,m\ ;\ l \neq k$. مجموعه شاخص‌های موجود $J = \{j|j = ۱,۲,\dots,n\}$ را به دو زیر مجموعه متمایز هماهنگ (S_{kl}) و ناهماهنگ (D_{kl}) تقسیم می‌نماییم.

مجموعه هماهنگ (S_{kl}) از گزینه‌های A_k و A_l مشتمل بر کلیه شاخص‌هایی خواهد بود که A_k بر A_l به ازای آن‌ها ترجیح داده می‌شود (رابطه ۴)، یعنی داشته باشیم:

$$S_{kl} = \{j|r_{kj} \geq r_{lj}\} \qquad (۴)$$

(r_{lj} با مطلوبیت افزایشی مفروض است).

و بر عکس زیر مجموعه مکمل به نام مجموعه ناهماهنگ (D_{kl}) مجموعه‌ای از شاخص‌ها است که به ازای آن‌ها داشته باشیم (رابطه ۵):

$$D_{kl} = \{j|r_{kj} < r_{lj}\} = J - S_{kl} \qquad (۵)$$

قدم چهارم- محاسبه ماتریس هماهنگی. ارزش ممکن از مجموعه هماهنگی (S_{kl}) به وسیله اوزان موجود از شاخص‌های هماهنگ در آن مجموعه اندازه‌گیری می‌شود. یعنی معیار هماهنگی برابر با مجموع اوزان (w_j) از شاخص‌هایی است که مجموعه S_{kl} را تشکیل می‌دهند، بدین صورت معیار هماهنگی ($I_{k,l}$) بین A_k و A_l بدین قرار است (رابطه ۶):

$$I_{kl} = \sum_{j\in S_{k,l}} w_j\ ;\ \sum_{j=۱}^{n} w_j = ۱ \qquad (۶)$$

معیار هماهنگی ($I_{k,l}$) منعکس کننده اهمیت نسبی از A_k در رابطه با A_l است به طوری که $۰ \leq I_{k,l} \leq ۱$ خواهد بود. ارزش بیشتر از $I_{k,l}$ بدان مفهوم است که ارجحیت A_k بر A_l بیشتر هماهنگ است.

بنابراین ارزش‌های متوالی از معیارهای $I_{k,l}$ ($k,l=۱,۲,\dots,m\ ,\ k\neq l$) تشکیل ماتریس نامتقارن هم آهنگی (I) را می‌دهند، بدین قرار (رابطه ۷):

$$I = \begin{vmatrix} - & I_{۱,۲} & I_{۱,۳} & \dots & I_{۱,m} \\ I_{۲,۱} & - & I_{۲,۳} & \dots & I_{۲,m} \\ \vdots & \vdots & - & \vdots & \vdots \\ I_{m۱} & I_{m۲} & \dots & I_{m(m-۱)} & - \end{vmatrix} \qquad (۷)$$

قدم پنجم: محاسبه ماتریس ناهماهنگی. معیار ناهماهنگی (نظیر به مجموعه $D_{k,l}$) بر عکس معیار $I_{k,l}$ نشان دهنده شدت بدتر بودن ارزیابی از A_k در رابطه با A_l می‌باشد. این معیار ($NI_{k,l}$) با استفاده از عناصر ماتریس V (امتیازات وزین شده) به ازای مجموعه ناهماهنگ $D_{k,l}$ محاسبه می‌گردد، بدین قرار (رابطه ۸):

$$NI_{k,l} = \frac{\max\limits_{j\in D_{k,l}} |V_{kj} - V_{lj}|}{\max\limits_{j\in J} |V_{kj} - V_{lj}|} \qquad (۸)$$

از این رو ماتریس ناهماهنگی به ازای کلیه مقایسات زوجی از گزینه‌ها عبارت خواهد بود از (رابطه ۹):

$$NI = \begin{vmatrix} - & NI_{۱,۲} & NI_{۱,۳} & \dots & NI_{۱,m} \\ NI_{۲,۱} & - & NI_{۲,۳} & \dots & NI_{۲,m} \\ \vdots & \vdots & - & \vdots & \vdots \\ NI_{m۱} & NI_{m۲} & \dots & NI_{m(m-۱)} & - \end{vmatrix} \qquad (۹)$$

مورد توجه است که اطلاعات موجود از I و NI با یکدیگر اختلاف فاحش داشته و مکمل یکدیگرند به طوری که ماتریس I منعکس کننده اوزان w_j از شاخص‌های هماهنگ بوده و ماتریس نامتقارن NI منعکس کننده بیشترین اختلاف نسبی از $V_{ij} = n_{ij}.w_j$ به ازای شاخص‌های ناهماهنگ است.

Archive of SID

www.SID.ir

قدم ششم- مشخص نمودن ماتریس هماهنگ موثر. ارزش‌های I_{kl} از ماتریس هماهنگی باید نسبت به یک ارزش آستانه سنجیده شوند تا شانس ارجحیت A_k بر A_l بهتر مورد قضاوت واقع شود. این شانس در صورتی که $I_{k,l}$ از یک حداقل آستانه ($\bar{I}$) تجاوز کند نیز بیشتر خواهد شد، بدان معنی که باید:

$\bar{I}$ (دلخواه) را مثلا می‌توان به صورت متوسط از معیارهای هماهنگی به دست آورد (رابطه ۱۰)، چنین:

$$\bar{I} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} I_{k,l}/m(m-1) \qquad (10)$$

بر اساس $\bar{I}$ (حداقل آستانه) سپس یک ماتریس بولین F (با عناصر صفر و یک) تشکیل می‌دهیم به گونه‌ای که (رابطه ۱۱):

$$\begin{aligned} f_{kl} = 1 &\xrightarrow{\text{اگر}} I_{kl} \geq \bar{I} \\ f_{kl} = 0 &\xrightarrow{\text{اگر}} I_{kl} < \bar{I} \end{aligned} \qquad (11)$$

آنگاه هر عنصر واحد در ماتریس F (ماتریس هماهنگ موثر) نشان‌دهنده یک گزینه موثر و مسلط بر دیگری است.

قدم هفتم- مشخص نمودن ماتریس ناهماهنگ موثر. عناصر $NI_{k,l}$ از ماتریس ناهماهنگ نیز همچو در قدم ششم باید نسبت به یک ارزش آستانه سنجیده شوند. این ارزش آستانه ($\overline{NI}$) را به طور مثال می‌توان به طریق ذیل محاسبه نمود (رابطه ۱۲):

$$\overline{NI} = \sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} NI_{k,l}/m(m-1) \qquad (12)$$

سپس یک ماتریس بولین G (معروف به ماتریس ناهماهنگ موثر) تشکیل می‌دهیم (رابطه ۱۳):

$$\begin{aligned} g_{kl} = 1 &\xrightarrow{\text{اگر}} NI_{kl} \leq \overline{NI} \\ g_{kl} = 0 &\xrightarrow{\text{اگر}} NI_{kl} > \overline{NI} \end{aligned} \qquad (13)$$

عناصر واحد در ماتریس G نیز نشان‌دهنده روابط تسلط در بین گزینه‌ها می‌باشد.

قدم هشتم- مشخص نمودن ماتریس کلی و موثر. عناصر مشترک ($h_{k,l}$) به گونه زیر از دو ماتریس F و G تشکیل یک ماتریس کلی (H) را برای تصمیم‌گیری می‌دهند (رابطه ۱۴):

$$h_{k,l} = f_{k,l} \cdot g_{k,l} \qquad (14)$$

قدم نهم- حذف گزینه‌های کم جاذبه. ماتریس کلی H نشان‌دهنده ترتیب ارجحیت‌های نسبی از گزینه‌هاست، بدان معنی که $h_{k,l} = 1$ نشان می‌دهد که A_k بر A_l هم از نظر معیار هماهنگی و هم از نظر معیار ناهماهنگی ارجح است، لکن A_k هنوز ممکن است تحت تسلط گزینه‌های دیگری باشد. بنابراین شرط این که A_k با استفاده از روش "الکتر" یک گزینه موثر باشد (رابطه ۱۵)، عبارت است از:

$$\begin{aligned} h_{k,l} = 1 \rightarrow l \text{ برای حداقل یک } &\xrightarrow{\text{به طوری که}} l = 1,2,\dots,m\ ;\ k \neq l \\ h_{k,l} = 0 \rightarrow \text{ها } i \text{ برای کلیه } &\rightarrow\ i = 1,2,\dots,m\ ;\ i \neq k\ ;\ i \neq l \end{aligned} \qquad (15)$$

وجود این دو شرط تواما ممکن است نادر باشد لکن به سادگی می‌توان گزینه‌های موثر را از ماتریس H تشخیص داد بدین طریق که هر ستونی از H را که حداقل دارای یک عنصر برابر با واحد باشد می‌توان حذف نمود زیرا آن ستون تحت تسلط ردیف یا ردیف‌هایی می‌باشد.

۵- مثال موردی- بخشی از پروژه خط ۶ متروی تهران

خط ۶ مترو که شمال غرب تهران را به جنوب شرق آن متصل می‌نماید در ابتدا توسط مشاور سیستررا در مطالعات طرح جامع حمل و نقل ریلی شهر تهران به عنوان یکی از کریدورهای ترافیکی مد نظر قرار گرفته است. این خط با تمامی خطوط موجود و پیش بینی شده تلاقی دارد.

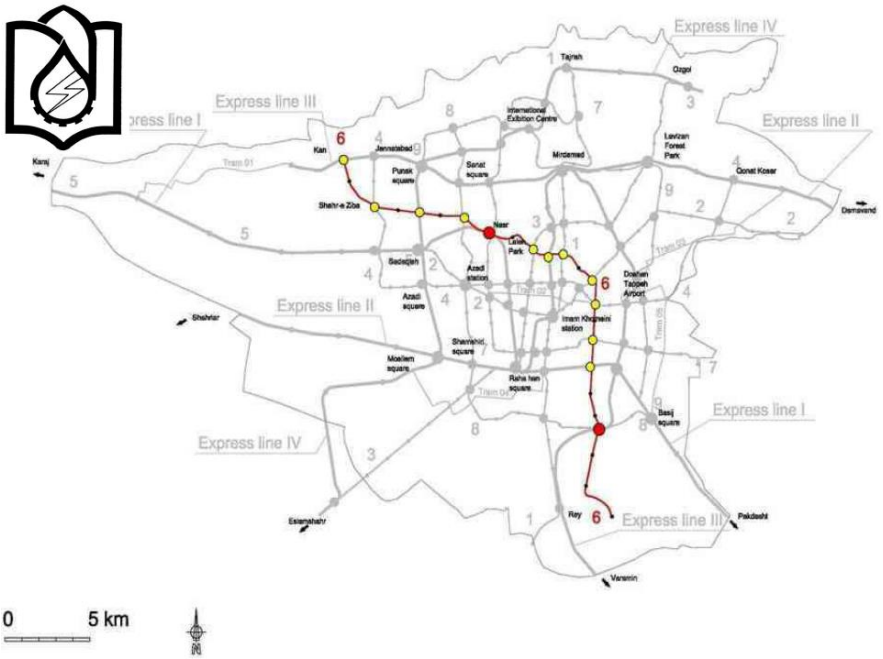
محدوده‌های اولیه تحت پوشش در نظر گرفته شده برای این خط عبارتند از شهر ری- میدان شاه عبد العظیم، میدان خراسان، میدان شهدا، خیابان ۱۷ شهریور، میدان امام حسین، میدان سپاه، ابتدای خیابان شریعتی، میدان هفت تیر، بلوار کریم خان زند، میدان جهاد، خیابان فاطمی، بزرگراه شهدای گمنام، ابتدای کوی نصر، بلوار مرزداران، بلوار پیامبر، بلوار کاشانی، میدان شهر زیبا و کن می باشد.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۲ مشخصات کلی و شکل ۱ نقشه مسیر خط ۶ متروی تهران را نشان می‌دهند.

جدول ۲: مشخصات کلی خط ۶ مترو

طول خط	تعداد ایستگاه ها	فاصله متوسط ایستگاه ها	سرعت متوسط بهره برداری
۳۱ کیلومتر	۲۹ ایستگاه	۱/۱ کیلومتر	۳۷/۵ سانتی متر در ساعت



شکل ۱: نقشه مسیر و ایستگاه های خط ۶ متروی تهران

۵-۱-عوامل پروژه خط ۶ متروی تهران

کارفرما: شرکت راه آهن شهری تهران و حومه (مترو)

مدیر طرح: مهندسین مشاور حمل و نقل ریلی بهروری تهران

مشاور: مهندسین مشاور رهساز طرح

پیمانکار: شرکت آهاب (سهامی خاص)

۵-۲-روش حفاری و روند اجرای پروژه:

در این پروژه از روش روسی برای حفر ایستگاه‌ها و از TBM برای حفر تونل استفاده شده است.

عملیات حفر تونل در زیر تراز ایستگاه با دستگاه حفار TBM به صورت مستقل از ایستگاه‌ها صورت گرفته و قبل از اجرای تیکت هال حفر تونل انجام شده بود. بدین صورت که با پیشروی در تونل، عملیات لاینینگ (قطعات پیش ساخته به صورت سگمنت) هم انجام می‌شود. خود ایستگاه با روش روسی یعنی شمع و ریب اجرا شده است.

۵-۳- انتخاب روش مناسب حفاری به کمک روش الکتر

ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به پروژه مذکور و نظر کارشناس مربوطه ایجاد شد (جدول ۳).

Archive
www.SID.ir

جدول ۳: ماتریس تصمیم‌گیری

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
انفجار	۱	۱	۱	۱	۱	۵	۱	۵	۴	۲
تی بی ام	۹	۷	۱۰	۹	۵	۳	۴	۵	۱۰	۱۰
رودهدر	۴	۵	۵	۵	۶	۴	۵	۶	۶	۵
روسی	۷	۸	۶	۴	۷	۷	۷	۹	۶	۶
اتریشی	۷	۹	۶	۶	۶	۸	۷	۹	۶	۶

وزن معیارها که در بخش سوم شرح داده شد، به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد (جدول ۴).

جدول ۴: وزن نرمال شده معیارها

معیار	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
وزن نرمالیزه	۰/۱۴۶	۰/۱۰۲	۰/۱۱۱	۰/۰۹۳	۰/۰۸۱	۰/۱۱۳	۰/۱۱۲	۰/۰۹۱	۰/۰۷۱	۰/۰۸

قدم یکم: تبدیل ماتریس تصمیم‌گیری موجود به یک ماتریس "بی مقیاس شده" (جدول ۵).

جدول ۵: ماتریس N_D

۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۸	۰/۰۸	۰/۳۹	۰/۰۸	۰/۳۲	۰/۲۷	۰/۱۴
۰/۶۴	۰/۴۷	۰/۷۱	۰/۷۱	۰/۴۱	۰/۲۳	۰/۳۴	۰/۳۲	۰/۶۷	۰/۷۱
۰/۲۹	۰/۳۴	۰/۳۶	۰/۴۰	۰/۴۹	۰/۳۱	۰/۴۲	۰/۳۸	۰/۴۰	۰/۳۵
۰/۵۰	۰/۵۴	۰/۴۳	۰/۳۲	۰/۵۸	۰/۵۵	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۴۰	۰/۴۲
۰/۵۰	۰/۶۱	۰/۴۳	۰/۴۸	۰/۴۹	۰/۶۳	۰/۵۹	۰/۵۷	۰/۴۰	۰/۴۲

قدم دوم: ایجاد ماتریس " بی مقیاس" وزین (جدول ۶).

جدول ۶: ماتریس بی مقیاس وزین V

۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۱
۰/۰۹	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶
۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳	۰/۰۳
۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۶	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳
۰/۰۷	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۴	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۷	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳

قدم چهارم و پنجم: محاسبه ماتریس‌های هماهنگی و ناهماهنگی (جداول ۷ و ۸).

جدول ۷: ماتریس هماهنگ I

۰	۰	۰/۱۱۳	۰/۲۰۴	-
۰/۵۰۱	۰/۵۰۱	۰/۶۰۳	-	۰/۸۸۷
۰/۱۵۲	۰/۱۶۴	-	۰/۳۹۷	۰/۸۸۷
۰/۶۹۲	-	۰/۹۰۷	۰/۴۹۹	۱
-	۰/۹۱۹	۱	۰/۴۹۹	۱

جدول ۸: ماتریس ناهماهنگ NI

۱	۱	۱	۱	-
۱	۰/۹۶	۰/۲۳۶	-	۰/۲۱۲
۱	۱	-	۱	۰/۲۳۴
۱	-	۰/۲۳۶	۱	۰
-	۰/۴۵۳	۰	۰/۷۱۳	۰

Archive of SID
www.SID.ir

قدم ششم و هفتم: مشخص نمودن ماتریس‌های هماهنگ موثر و ناهماهنگ موثر (جداول ۹ و ۱۰)

$\overline{NI} = ۰.۶۵۲$ و $\bar{I} = ۰.۵۴۶$

جدول ۹: ماتریس بولین F

۰	۰	۰	۰	-
۰	۰	۱	-	۱
۰	۰	-	۰	۱
۱	-	۱	۰	۱
-	۱	۱	۰	۱

جدول ۱۰: ماتریس ناهماهنگ موثر G

۰	۰	۰	۰	-
۰	۰	۱	-	۱
۰	۰	-	۰	۱
۰	-	۱	۰	۱
-	۱	۱	۰	۱

قدم هشتم و نهم: مشخص نمودن ماتریس کلی و موثر و حذف گزینه‌های کم‌جاذبه (جداول ۱۱ و ۱۲)

جدول ۱۱: ماتریس کلی و موثر H

۰	۰	۰	۰	-
۰	۰	۱	-	۱
۰	۰	-	۰	۱
۰	-	۱	۰	۱
-	۱	۱	۰	۱

جدول ۱۲: اولویت‌بندی گزینه‌های حفاری تونل

روش حفاری	رتبه
تی بی ام و اتریشی	۱ و ۲
تی بی ام و اتریشی	۱ و ۲
روسی	۳
رودهدر	۴
انفجار	۵

۶- نتیجه گیری

روش الکتر که زیرمجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، برای انتخاب روش مناسب حفاری در تونل متروی خط ۶ تهران به کار گرفته شد. در این مقاله ۱۰ معیار و ۵ گزینه حفاری به ترتیب انفجار، تی بی ام، رودهدر، روسی و اتریشی در نظر گرفته شد. همان طور که در جدول دیده‌شد، پارامترها و مخاطرات ژئوتکنیکی با بیشترین امتیاز مهمترین معیار در انتخاب روش حفاری می‌باشد، معیارهای موقعیت و محل احداث تونل، پارامترهای اقتصادی و عملیاتی در درجه اهمیت بعدی و معیارهای هندسی، مدیریتی، دانش و تکنولوژی، زیست محیطی، هدف اجرا و مقررات و استانداردها به ترتیب در رتبه‌های بعدی قرار می‌گیرند. در نهایت مدل تصمیم‌گیری با برنامه فرترن اجرا شد و تی بی ام به عنوان مناسب‌ترین گزینه حفاری برای بخشی از پروژه خط ۶ تونل متروی تهران انتخاب شد.

تشکر و قدردانی

با تشکر ویژه از جناب آقای دکتر محمدعلی جزو وزیری که نویسندگان را در نگارش این مقاله یاری نمودند.

منابع و مراجع

[۱] آذر، ع.، رجب زاده، ع.، (۱۳۸۷)، تصمیم‌گیری کاربردی (رویکرد MADM)، (چاپ دوم)، انتشارات نگاه دانش.

[۲] اصغر پور، م.، (۱۳۹۰)، تصمیم‌گیری‌های چند معیاره، (چاپ دهم)، انتشارات دانشگاه تهران.

[۳] جزایری، م.، مجداردکانی، م.، (۱۳۸۵)، "انتخاب ماشین حفار شیلد مناسب برای حفاری تونلهای شهری"، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف.

[۴] حسن پور، ج.، رستمی، ج.، (۱۳۸۹)، عملکرد ماشین های تونل بری در سنگ سخت، نشر فن آریا.

[۵] دلیریان، ا.، گشتاسبی، ک.، شمسی، غ.، همتی شعبانی، ع.، (۱۳۸۵)، "انتخاب روش حفاری بهینه از لحاظ فنی برای تونل انتقال آب قمرود (قطعات ۳ و۴)"، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف.

[۶] زمانی، ح.، نصیری، م.، (۱۳۸۵)، "انتخاب دستگاه TBM مناسب جهت اجرای تونل اصلی پروژه انتقال آب گلاب"، هفتمین کنفرانس تونل ایران، تهران، انجمن تونل ایران، دانشگاه شریف.

Archive of SID
www.SID.ir

[۷] صداقتی، ز.، رجبی، م.، عماد، م.، (۱۳۹۰)، "چگونگی انتخاب ماشین حفاری بر اساس مشخصات ژئوتکنیکی مسیر در تونل‌های شهری (مطالعه موردی خط ۷ متروی تهران)"، نخستین همایش آسیایی و نهمین همایش ملی تونل" فضاهای زیرزمینی برای توسعه پایدار"، تهران، انجمن تونل ایران با همکاری انجمن بین‌المللی تونل (ITA) و شرکت همایش سازان، سالن همایش‌های هتل المپیک.

[۸] طاهری، ع.، منصوری، ح.، (۱۳۸۲)، "ارزش‌گذاری پارامترهای فنی مؤثر در انتخاب ماشین تونلزنی در محیط‌های سنگی به کمک روش AHP –مثال موردی قطار شهری اصفهان"، ششمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت.

[۹] عسکری، م.، تبریزی، ع.، کریمی، م.، (۱۳۸۶)، "نحوه انتخاب ماشین حفر تونل در پروژه قطعه اول تونل انتقال آب کرج"، سومین کنفرانس مکانیک سنگ ایران، تهران، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

[۱۰] مدنی، ح. (۱۳۸۳)، "تونلسازی جلد اول"، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر.

[۱۱] میخک بیرانوند، ا.، قائدرحمتی، ر.، و الماسی، ن.، (۱۳۸۸)، "انتخاب TBM مناسب برای حفاری تونل متروی شیراز با استفاده از روشAHP"، ششمین همایش زمین‌شناسی مهندسی و محیط زیست ایران، تهران، انجمن زمین‌شناسی مهندسی ایران، دانشگاه تربیت مدرس.

[۱۲] میوه چی، م. حاجی زاده، ا.، و معمری، ح.، (۱۳۸۲)، "نحوه انتخاب و تهیه مشخصات فنی ماشین حفر تونل در پروژه قطعات سوم و چهارم تونل انتقال آب قمرود"، ششمین کنفرانس تونل ایران، تهران، دانشگاه علم و صنعت.

[۱۳] نیک منش، م.، حسینی، م.، فضلی، ص.، (۱۳۹۰)، "انتخاب مناسب‌ترین روش حفاری تونل انتقال آب بهشت آباد"، سی امین گردهمایی علوم زمین، تهران، سازمان زمین‌شناسی و اکتشافات معدنی کشور.

[١٤] Acaroglu,O, H. Ergin and S. Eskikaya.(٢٠٠٦). "Analytical hierarchy process for selection of roadheaders". VOLUME ١٠٦, ٥٦٩-٥٧٥.

[١٥] Jethwa JL. (٢٠٠١). "National Tunnelling Policy". National Workshop on Application of Rock Engineering in Nation's Development. Roorkie: Ind Inst Tech.

[١٦] Olofsson, S,O. (١٩٨٨). "Applications Explosive Technology for Construction and Mining", Applex Publisher.

[١٧] Oraee, Kazem. Ezzeddin, Bakhtavar. (٢٠١٠). "Selection of Tunnel Support System by Using Multi Criteria Decision-Making Tools". The ٢٩ th International Conference on Ground Control in Mining.

[١٨] Rick P. LOVAT, P.Eng. (٢٠٠٧). "TBM Design Considerations: Selection of Earth Pressure Balance or Slurry Pressure Balance Tunnel Boring Machines".

Archive of SID

www.SID.ir