نشریه‌ی علمی-پژوهشی مکانیک سنگ
JOURNAL OF ROCK MECHANICS
دوره پنجم، شماره دوم، تابستان ۱۴۰۰، صفحه ۱۵ تا ۲۵

انتخاب روش بهینه حفاری تونل راه آهن زرین اردکان یزد با استفاده از روش تصمیم گیری چند معیاره *ELECTRE*

محسن ملاشاهی [۱*]؛ قربان خاندوزی [۲]؛ مسعود شاهی [۳]

۱- دانشجوی دکتری، مهندسی ژئوتکنیک و معدن، دانشگاه فناوری و معدن فرایبرگ

۲- دانشجوی دکتری، گروه مهندسی معدن، دانشکده فنی، دانشگاه تهران

۳- فارغ التحصیل کارشناسی ارشد، مهندسی عمران، کارشناس ارشد مهندسی و مدیریت ساخت، دانشگاه علمی کاربردی

دریافت: ۱۳۹۹/۰۹/۰۱؛ پذیرش: ۱۴۰۰/۰۴/۰۱

چکیده

با پیشرفت تکنولوژی در عرصه های مختلف، فن تونل سازی نیز از این امر مستثنی نبود و تحولات عمده ای در آن صورت گرفت. هر چند که هنوز هم روش های سنتی هنوز هم گهگاهی بکار برده می شود، ولی استفاده از ماشین آلات جدید با کارایی بالا و اقتصادی موجب همه گیرشدن روشهای نوین شده است. 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، معمولا بیش از یک روش عملی جهت حفاری پیشنهاد میگردد و انتخاب مناسب ترین روش با کمترین مشکلات و بهترین بازدهی چالشی بزرگ است. 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. در این مطالعه به بررسی روش های مدرن ساخت و ساز تونل با استفاده از روش های آماری با هدف مطالعه موردی انتخاب روش بهینه ساخت تونل راه آهن زرین اردکان یزد پرداخته شده است. نتایج نشان داد که بهترین روش جهت حفاری این تونل بنا به نظر متخصصان و افراد باتجربه روش چند مرحله اتریشی و رودهدر می باشد.

واژگان کلیدی

تونل سازی، انتخاب روش بهینه حفاری تونل، تونل راه آهن زرین، روش تصمیم گیری چند معیاره *ELECTRE*

۱- مقدمه

در ایران از چند هزار سال پیش، به منظور بهره برداری از آب های زیر زمینی، تونل هایی موسوم به قنات حفر می شده است. قنات یکی از ابتکارات شگفت انگیز ایرانیان است که بر کشاورزی و آبیاری فلات ایران از یک سو و از دیگر سو در شکوفایی تمدن و فرهنگ ایران تأثیر ماندگار داشته است. طول بعضی از این سازه های زیر زمینی که نوعی تونل های انتقال آب به حساب می آیند به ۷۰ کیلومتر و یا بیشتر نیز می رسد. تعداد قنات های ایران بالغ بر ۵۰۰۰۰ رشته برآورد شده و جالب توجه آن است که این قنات های متعدد طویل

*نویسنده مسئول: دانشجوی دکتری دانشکده ژئوتکنیک و معدن دانشگاه فناوری و معدن فرایبرگ آلمان، کد پستی ۰۹۵۹۹، ۰۰۹۸۹۱۱۲۷۸۴۹۳۴

پست الکترونیک: **mohsenmolashahi@gmail.com**

و حساس از لحاظ جهت و شیب با وسایل بسیار ابتدایی حفر شده اند [۱].

موقعیت جغرافیایی کشور ایران شرایط ویژه اقتصادی را بوجود آورده که لزوم ایجاد شبکه های حمل و نقل کارا، مناسب و استاندارد را ایجاب می کند، در صورتی که این شرایط و امکان استفاده از هر یک به عنوان فرصتی مناسب جهت توسعه حمل و نقل کشور را در کنار جغرافیای کوهستانی ایران مورد توجه قراردهیم، به نیاز فوق العاده کشور به حفر تونل های آب، راه و راه آهن پی برده می شود. در قرن حاضر، پیشرفت تکنولوژی از یک سو و افزایش روز افزون جمعیت و نیاز آن به خدمات بیشتر از سوی دیگر، باعث افزایش درخواست برای فضاهای عمومی شده است. از مهمترین نقش های این خدمات، شبکه راه های درون شهری و بین شهری است.

استفاده روز افزون از حمل و نقل زمینی و لزوم احداث مسیرهای جدید و تونل های طولانی منجر به پیدایش و گسترش روش های حفاری از اوایل قرن نوزدهم شد. علی رغم سرمایه گذاری اولیه زیاد، سرعت و کیفیت بالای حفاری است. رویکرد استفاده از فضاهای زیرسطحی یکی از رهیافت های نوین درزمینه ی شهرسازی است. این رویکرد ضمن استفاده از قابلیت های مثبت فضاهای زیرسطحی تلاش می کند تا مسائل و مشکلات شهرها از قبیل کمبود فضا، مسائل حمل ونقل و مشکلات زیست محیطی را حل نماید. همچنین، ازجمله فاکتورهای توسعه اقتصادی، افزایش ساخت فضاهای زیرسطحی می باشد. به واسطه هزینه های سرسام آور و مشکلات عدیده تملک اراضی شهری، در مقایسه با توسعه روزمینی، فضاهای زیرسطحی ارزان تر می باشند. تمام کشورهای جهان فضاهای زیرسطحی زیادی با کاربری های متنوع، در حال بهره برداری هستند[۲].

پایین تر بودن هزینه های اولیه و عملیاتی نسبت به ایجاد تأسیسات در سطح زمین، فراغت از مسائل توپوگرافی و عدم محدودیت در استفاده از فضا، ایمنی مناسب در مقابل حوادث طبیعی و حملات هوایی و بالاخره پایین بودن هزینه های سرمایش و گرمایش ازجمله مزایایی است که باعث رویکرد به استفاده از فضاهای زیرسطحی در عرصه های گوناگون شده است. از اصلی ترین فضاهای زیرسطحی در توسعه پایدار شهری، تونل های ترافیکی و تونل های مترو هستند که باهدف تسهیل ترافیک سطحی احداث می شوند. البته اجرای این قبیل تونل ها در محیط های شهری همواره با چالش های جدی و مسائل ویژه ای همراه بوده است.

درزمینه پیشرفت و تکامل صنعت تونل سازی، پیشرفت هایی است که در مورد روش های حفاری آن انجام گرفته است. ازجمله روش های حفاری که بدین منظور ابداع شده اند می توان از روش های سنتی ابتدایی، روش های حفاری و حفاظت مرحله به مرحله، روش های حفاری با ماشین آلات اختصاصی، روش حفاری تمام مقطع و... نام برد [۳].

در این پژوهش هدف شناسایی روش های مدرن و جدید ساخت و ساز است و به بررسی شرایط مناسب برای انتخاب هر یک از این روش ها پرداخته می شود و جدول و نمونه ای برای انتخاب روش مناسب برای هر یک از شرایط زمین میزبان تونل ارایه می گردد.

آنچه از بررسی دهها مقاله فارسی و انگلیسی بر می آید این است که بسیاری از محققان در زمینه بررسی و تحلیل روش های مختلف ساخت و ساز تونل به این موضوع پی برده اند که:

عوامل موثر در طراحی و انتخاب روش حفاری بسیار مهم هستند. روش های حفاری بیشتر وابسته به نوع زمین و نگهداری مربوط به آن طراحی می شوند، و اکثر این روش ها مستقیما وابسته به نوع نگهداری تونل ها که خود آن نیز وابسته به نوع محل و جنس زمین حفاری است، می باشند[۴].

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 جث وا و ریک 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.

استفاده از تجهیزات حفاری دورانی و ضربه ای در پروژه ها بسیار رایج است. دانستن کارآیی تجهیزات حفاری انتخاب شده در پروژهای حفاری جهت تخمین هزینه ها و ارائه طرح مناسب بسیارمهم است. قابلیت حفرتجهیزات می تواند با ترکیبی از ویژگی های ماشین وسنگ پیش بینی شود. در ادامه مختصری از مطالعات مختلف در زمینه روش های مدرن ساخت و ساز و حفاری تونل ها ارائه خواهد شد.

در زمینه بررسی روش های مدرن ساخت و ساز تونلهای شهری مطالعات کمی تا بحال انجام شده است که همین نشان دهنده اهمیت توجه به این موضوع است تا این کمی ها و کاستی ها رفع شوند. از معدود کارهای اجام شده در این زمینه چند مورد در ادامه بیان می گردد:

وزیری و همکاران در سال ۲۰۱۵ در مقاله ای تحت عنوان رتبه‌بندی گزینه‌های حفاری تونل‌های حمل و نقلی با استفاده از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره *ELECTRE* بیان نمودند که " 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. حجازی راد و همکاران در سال ۱۳۹۴ در مقاله ای تحت عنوان " بررسی روش‌های مناسب حفاری چندمرحله‌ای ایستگاه‌های زیرزمینی عمیق - مطالعه موردی ایستگاه *x7* خط هفت مترو تهران" بیان نمودند که با توجه به خصوصیات ژئوتکنیکی زمین و هندسه ایستگاه مورد بررسی، با توجه به نتایج، حداکثر نشست سطح زمین در روش گالری‌های کناری بوده و حداقل آن مربوط به روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی می‌باشد. همچنین نشست سطح زمین در پایان اجرای طبقه اول ایستگاه در دو روش پیش‌نگهدارنده طاق بتنی و آلمانی مقادیر بسیار نزدیک به هم داشته و امکان استفاده از هر دو روش را در ایستگاه‌های یک طبقه نشان می‌دهد.

رستمی و همکاران در سال ۱۳۹۰ در مقاله تحت عنوان انتخاب روش حفر و نگهداری تونل مترو تهران خط ۳ فاز ۴ با روش *TOPSIS* بیان نمودند که هنگامی که تونل از شرایط زمینی ضعیف و متفاوتی عبور می کند و یا پوشش کم عمقی از خاک در بالای تاج تونل قرار دارد، توده خاک یا سنگ باید پایدار شده و سیستم نگهداری به گونه ای طراحی و اجرا شود تا میزان نشست و همگرایی که از مهمترین عوامل طراحی تونل است کنترل شود. بنابراین به منظور انجام برنامه ریزی لازم برای ایجاد سیستم نگهداری با توجه به شرایط محل انجام پروژه، ارائه یک مدل تصمیم گیری در انتخاب گزینه مناسب سیستم نگهداری تونل در مرحله برنامه ریزی طراحی پروژه تونل ضروری است. هدف از انجام این تحقیق، ارائه طرحی است که بتوان با استفاده از آن، گزینه های مناسب سیستم نگهداری تونل متروی تهران خط ۳ فاز ۴ را مشخص و مناسب ترین گزینه را انتخاب کرد تا به عنوان الگوی مناسب برای مقاطع آتی استفاده شود.

پوری و همکاران (۱۳۹۳) روش بهینه حفر تونل در ساخت متروها از دیدگاه اجرایی و اقتصادی با بکارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی را پیشنهاد دادند.

بسیاری از صاحبنظران مدیریت معتقدند که کانون اصلی مدیریت را تصمیم گیری تشکیل می دهد. در واقع آنها انجام وظایفی چون برنامه ریزی، سازماندهی و کنترل را چیزی جز تصمیم گیری نمی دانند. هربرت سایمون تصمیم گیری را با مدیریت یکی می داند. نیومن نیز کیفیت مدیریت را تابع کیفیت تصمیم می داند. بنابراین از دیدگاه این صاحبنظران اساس مدیریت سازمان تصمیم گیری است.

به عنوان مثال یک کارخانه تولیدی را در نظر بگیرید که یک کالا با کیفیت عالی و کمترین هزینه ممکنه تولید می کند، اما اصولا تولید این کالا با توجه به اهداف کارخانه بهترین انتخاب به حساب نمی آید یا آنکه تقاضا در بازار برای این

کالا ناچیز می باشد به عبارتی تصمیم متخذه در اصل نامناسب بوده در حالیکه اجرای آن به بهترین صورت ممکن و با کمترین هزینه انجام پذیرفته است. در علم مدیریت توجه اساسی به اخذ تصمیم صحیح با توجه به روابط بین هدفهای مطلوب و امکانات موجود در سازمان می باشد و از نظر آن وظیفه اصلی مدیر تصمیم گیری به روش علمی می باشد.

و در نهایت تصمیم گیری را می توان طریقه عمل و یا حرکت در مسیر خاصی تعریف کرد که با تامل و به صورت آگاهانه از بین روشهای مختلف برای نیل به یک هدف مطلوب انتخاب شده است. بنابراین تصمیم گیری مستلزم انتخاب راهی از میان راه هاست. شناسائی راههای ممکن و انتخاب یکی از آنها به اطلاعات نیاز دارد اطلاعات همیشه به میزان مورد نیاز در دسترس نیست و مدیریت ناگزیر به تصمیم گیری با اطلاعات کمتر است.

۳-۱- مدل های تصمیم گیری چند معیاره

در اغلب تصمیم گیری ها مدیران به جای یک معیار خواستار بهینه کردن مقدار چندین معیار اعم از کمی و کیفی، مانند حداکثر کردن سود، حداقل کردن اضافه کاری افزایش رضایت شغلی و هستند. بدیهی است این معیارها به دلیل داشتن مقیاس های مختلف با هم قابل مقایسه نبوده و حتی در برخی مسائل با یکدیگر متضاد می باشند یعنی افزایش یک معیار باعث کاهش معیار دیگر گردد. بنابراین در تصمیم گیری با معیارهای چندگانه معمولا به دنبال گزینه ای هستیم که بیشترین مزیت را برای تمامی معیارها ارائه کند [۶].

۳-۲- شرح روش الکتر

در این روش به جای رتبه‌بندی گزینه‌ها از مفهوم جدیدی معروف به غیر رتبه‌ای استفاده می‌شود، بدین صورت که مثلا $Ak \nrightarrow Al$ بیانگر آن است که اگرچه گزینه‌های k و l هیچ ارجحیتی از نظر ریاضی به یکدیگر ندارند اما تصمیم‌گیرنده و آنالیست ریسک بهتر بودن Ak را بر Al می‌پذیرند [۲].

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

الگوریتم این روش در نه مرحله به شرح زیر است [۲]:

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

$$n_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}^2}} \qquad (۱)$$

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

$$W = \{w_1, w_2, \dots, w_n \approx (DM \text{ از مفروض}) \qquad (۲)$$

$$\text{ماتریس بی مقیاس وزین} = V = N_D.W_{n.n}$$

$$= \begin{matrix} V_{11} & V_{1j} \dots & V_{1n} \\ . & . & . \\ V_{m1,\dots} & V_{mj,\dots} \dots & V_{mn} \end{matrix}$$

قدم سوم- مشخص نمودن مجموعه هماهنگی و مجموعه نا هماهنگی برای هر زوج از گزینه‌های: $k,l=1,2, \dots, m \; ; \; l \neq k$. مجموعه شاخص‌های موجود $J = \{j|j = 1,2, \dots, n\}$ را به دو زیر مجموعه متمایز هماهنگ (S_{kl}) و ناهماهنگ (D_{kl}) تقسیم می‌نماییم.

مجموعه هماهنگ S_{kl} از گزینه‌های Ak و Al مشتمل بر کلیه شاخص‌هایی خواهد بود که Ak بر Al به ازای آن‌ها ترجیح داده می‌شود (رابطه ۳)، یعنی داشته باشیم:

$$S_{kl} = \{j | r_{kj} \geq r_{lj}\} \qquad (۳)$$

(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:

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

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 (wj) از شاخص‌هایی است که مجموعه S_{kl} را تشکیل می‌دهند، بدین صورت معیار هماهنگی ($I_{k,l}$) بین Ak و Al بدین قرار است:

$$I_{kl} = \sum_{j \in S_{kl}} w_j \; ; \; \sum_{j \in 1}^{n} w_j = 1 \qquad (۵)$$

معیار هماهنگی ($I_{k,l}$) منعکس کننده اهمیت نسبی از Ak در رابطه با Al است به طوری که ۱ ≥$I_{k,l}$ ≥0 خواهد بود. ارزش بیشتر از $I_{k,l}$ بدان مفهوم است که ارجحیت Ak بر Al بیشتر هماهنگ است.

بنابراین ارزش‌های متوالی از معیارهای $k,l=1,2,...,m$, $k\neq l$) $I_{k,l}$) تشکیل ماتریس نامتقارن هم آهنگی (I) را می‌دهند، بدین قرار:

$$I=\begin{bmatrix} - & I_{1,2} & I_{1,3} & \dots & I_{1,m} \\ I_{2,1} & - & I_{2,3} & \dots & I_{2,m} \\ \vdots & \vdots & - & & \vdots \\ I_{m1} & I_{m2} & \dots & I_{m(m-1)} & - \end{bmatrix} \quad (۶)$$

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 Ak در رابطه با Al 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:

$$NI_{kl}=\frac{\max\limits_{j\in D_{k,l}}|V_{kj}-V_{lj}|}{\max\limits_{j\in J}|V_{kj}-V_{lj}|} \quad (۷)$$

از این رو ماتریس ناهماهنگی به ازای کلیه مقایسات زوجی از گزینه‌ها عبارت خواهد بود از:

$$NI=\begin{bmatrix} - & NI_{1,2} & NI_{1,3} & \dots & NI_{1,m} \\ NI_{2,1} & - & NI_{2,3} & \dots & NI_{2,m} \\ \vdots & \vdots & - & & \vdots \\ NI_{m1} & NI_{m2} & \dots & NI_{m(m-1)} & - \end{bmatrix} \quad (۸)$$

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.

قدم ششم- مشخص نمودن ماتریس هماهنگ موثر. ارزش‌های I_{kl} از ماتریس هماهنگی باید نسبت به یک ارزش آستانه سنجیده شوند تا شانس ارجحیت Ak بر Al بهتر مورد قضاوت واقع شود. این شانس در صورتی که $I_{k,l}$ از یک حداقل آستانه (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، چنین:

$$\bar{I}=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} I_{k,l}/m(m-1) \quad (۹)$$

بر اساسI (حداقل آستانه) سپس یک ماتریس بولین F (با عناصر صفر و یک) تشکیل می‌دهیم به گونه‌ای که:

$$f_{k,l}=1 \overset{\text{اگر}}{\rightarrow} I_{kl}\leq\bar{I}$$
$$f_{k,l}=0 \overset{\text{اگر}}{\rightarrow} I_{kl}>\bar{I} \quad (۱۰)$$

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 (NI) را به طور مثال می‌توان به طریق ذیل محاسبه نمود:

$$\overline{NI}=\sum_{k=1}^{m}\sum_{l=1}^{m} NI_{k,l}/m(m-1) \quad (۱۱)$$

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

$$g_{k,l}=1 \overset{\text{اگر}}{\rightarrow} NI_{kl}\leq\overline{NI}$$
$$g_{k,l}=0 \overset{\text{اگر}}{\rightarrow} NI_{kl}>\overline{NI} \quad (۱۲)$$

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:

$$h_{k,l}=f_{k,l}.g_{k,l} \quad (۱۳)$$

قدم نهم- حذف گزینه‌های کم جاذبه. ماتریس کلی H نشاندهنده ترتیب ارجحیت‌های نسبی از گزینه‌هاست، بدان معنی که ۱ =$h_{k,l}$ نشان می‌دهد که Ak بر Al هم از نظر معیار هماهنگی و هم از نظر معیار ناهماهنگی ارجح است، لکن Ak هنوز ممکن است تحت تسلط گزینه‌های دیگری باشد. بنابراین شرط این که Ak با استفاده از روش الکتر یک گزینه موثر باشد، عبارت است از:

$$h_{k,l} = 1 \rightarrow I \text{ برای حداقل یک} \xrightarrow{\text{بطوریکه}} I = 1,2,\ldots, m\ ; k \neq 1$$
$$h_{k,l} = 0 \rightarrow \text{ها i برای کلیه} \rightarrow I = 1,2,\ldots, m\ ; \quad i \neq k\ ; i \neq 1 \qquad (۱۴)$$

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.

شکل ۱- محل احداث تونل زرین

تونل راه آهن زرین با طول ۸۰۰ متر به روش $NATM$ در حال حفاری می باشد. در این روش حفاری به کمک لودر، بیل مکانیکی و نیروی انسانی انجام می‌گیرد. حفاری و اجرای تونل با روش $NATM$ در سه مرحله بصورت بخش فوقانی، میانی و کناری اجرا می‌شود. سازه ی تونل با مقطع نعل اسبی و ابعاد متر ۱۲* ۱۲ متر تونل تشکیل شده است و در عمق حداکثری ۸۰ متر از سطح زمین طبیعی قرار دارد.

منطقه مورد مطالعه که تونل زرین در آن قرار میگیرد در بخش جنوب – جنوب غربی زون ایران مرکزی و در مجاورت زون سنندج سیرجان واقع شده است. ایران مرکزی یکی از زونهای اصلی و عمده ای است که به شکل مثلث در مرکز ایران قرار دارد و بزرگترین و پیچیده ترین زون زمین شناسی ایران به شمار می‌رود.

منطقه عمومی که تونل زرین در آن جای دارد ، از تناوب واحدهایی تشکیل شده که یا از مقاومت تک محوری نسبتاً بالا تا بالایی برخوردار هستند و یا واحدهایی هستند که دارای مقاومت تک محوری بسیار پایینی هستند، این همجواری با توجه به سیستم های ساختمانی خاصی که در منطقه حکم فرماست (طاقدیس‌های پست و ناودیس‌های مرتفع و تناوب لایه های زود فرسا و سخت) موجب آن شده که اشکال خاصی از نظر ریخت شناسی در منطقه به وجود آید.

واحد های نرم‌تر با مقاومت پایین را شیل ، شیست و اسلیت های عمدتاً سازند شمشک و سازند دزو و ریزو تشکیل می دهند و واحدهای مقاوم و سخت را رخنمون‌های دولومیتی و گاهاً مرمری شده سازند های شتری و دزو در کنار برونزدها و توده های نفوذی آذرین از جنس میکرو دیوریت تا میکرو گابرو و میکرو دیاباز تشکیل میدهند. از نظر نسبی نیز در محدودهٔ تونل واحدهای شیلی و شیستی قدیم‌تر از واحدهای کربناته هستند بنابراین مرتفع ترین قسمت های منطقه را دولومیت ها تشکیل می دهند که بعضاً مورفولوژی خشنی دارند و به صورت دیواره های قائم با شیب بسیار زیاد دیده می شوند.

دامنه این ارتفاعات صخره ای نیز از شیل ها و شیستهای پالئوزوئیک تشکیل شده است . وجود یک توپوگرافی نه چندان مرتفع ولی با ریختار کوهستانی در منطقه سبب تشکیل توده های وسیعی از نهشته های آبرفتی و تخر یبی در پای دامنه ها و ارتفاعات منطقه بخصوص در مناطق جنوبی تونل شده است.

لذا با توجه به موارد فوق می توان چند عامل اصلی را در تشکیل مورفولوژی بوجود آمده در منطقه مؤثر دانست [۹] :

۱- تناوب لایه های زود فرسا و سخت و دیر فرسا

۲- سیستم ساختمانی حاکم بر منطقه

۳- اثر فرسایش شیاری شدید بر بخش های شیلی (شیستی و سیلتی) و آبرفتهای پایکوهی و ایجاد آبراهه های شاخه ای متعدد

سازند های شیلی که با توجه به شرایط تکتونیکی منطقه

اغلب با درجات مختلف دگرگونی در منطقه مشاهده میشوند عموماً از ساختارهای پیچیده ای برخوردار بوده و بصورت چین خورده مشاهده می‌شوند.

این واحدها ، تمامی محدوده دهانه ورودی و خروجی تونل را پوشانده است. در بررسی بر روی نمونه های دستی از مقاومت فشاری کمی برخوردار بوده و جزء سنگهای نه چندان مستحکم و ضعیف و حتی در برخی موارد بسیار ضعیف بحساب می‌آیند.

۵-۱- عوامل تاثیرگذار 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 [۲] :

X1: پارامترها و مخاطرات ژئوتکنیکی (مقاومت سنگ، وجود خاک چسبنده، آب زیرزمینی، ناپایداری سینه کار و دیواره‌ها و...)

X2: پارامترهای هندسی (سطح مقطع، طول، شیب کف و عمق تونل، وجود قوس در مسیر تونل)

X3: 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)

X4: عوامل مدیریتی (ریسک یا احتمال موفقیت، سهولت تامین منابع مورد نیاز)

X5: پارامترهای زیست محیطی (ایمنی، تهویه، سرو صدا، لرزش، مخاطرات بهداشتی، خشک شدن چشمه‌ها)

X6: پارامترهای اقتصادی (سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تجهیزات، سیستم پشتیبانی، عملیاتی، تعمیر و نگهداری)

X7: موقعیت و محل احداث تونل (محیط شهری، دسترسی به دهانه‌ها، محدودیت‌های سطح زمین)

X8: دانش و تکنولوژی موجود (تجربه محلی)

X9: مقررات و استانداردهای عمومی (قوانین حاکم، استانداردهای زیست محیطی، الزامات در طول عملیات، پوشش داخلی تونل)

X10: هدف از اجرای پروژه (آبرسانی، عبور فاضلاب یا تاسیسات شهری، اکتشفات معدن، حمل و نقل عمومی)

با گرفتن نظرات ۱۳۰ نفر مشاور و پیمانکار متخصص در زمینه تونل از طریق پرسشنامه وزن‌های زیر حاصل شد:

جدول ۱- وزن معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین

معیار	وزن
X1	۹/۳۲
X2	۷/۷۹
X3	۶/۳۷
X4	۸/۸۱
X5	۵/۷۲
X6	۸/۴۱
X7	۷/۵۲
X8	۷/۶۴
X9	۸/۴۷
X10	۸/۳۱

۵-۲- روش و روند حفاری در پروژه تونل زرین

حفاری در تونل زرین به روش سنتی و چالزنی و انفجار تک مرحله ای تمام مقطع انجام می پذیرد که بدلیل مشکلات فنی و مشکلات در مطالعات و طراحی این تونل در حین حفاری دچار مشکلاتی از جمله بوجود آمدن دیواره نا هموار و شکسته شده، ناپایداری دیواره، نیازممند اصلاحات استحکامی و تزریق، نگهداری قویتر و پر هزینه تر و مشکلات عدیده دیگری گردیده است.

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

ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری با توجه به پروژه مذکور و نظر کارشناس مربوطه ایجاد می گردد.

وزن معیارها که شرح داده شد، به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد و نتایج وزن های نرمال شده معیارها در جدول ۲ نشان داده شده است.

وزن معیارها که شرح داده شد، به عنوان ورودی مدل در نظر گرفته شد و نتایج وزن های نرمال شده معیارها در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۲- ماتریس تصمیم گیری

	رودهدر	*TBM*	انفجار	اتریشی	روسی

X1	۷	۱	۷	۹	۴
X2	۸	۱	۹	۷	۵
X3	۶	۱	۶	۱۰	۵
X4	۴	۱	۶	۹	۵
X5	۷	۱	۶	۵	۶
X6	۷	۵	۸	۳	۴
X7	۷	۱	۷	۴	۵
X8	۹	۵	۹	۵	۶
X9	۶	۴	۶	۱۰	۶
X10	۶	۳	۶	۱۰	۵

جدول ۳- وزن نرمال شده معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین

معیار	وزن
X1	۰/۱۴۶
X2	۰/۰۹۳
X3	۰/۰۷
X4	۰/۱۱۳
X5	۰/۰۸
X6	۰/۱۰۲
X7	۰/۰۸۶
X8	۰/۰۹۰
X9	۰/۱۱۲
X10	۰/۱۱۱

پس از تعیین وزن نرمال شده معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین مراحل پیاده سازی و محاسبات توسط روش الکتر را بصورت قدم به قدم انجام داده شد.

قدم یکم: تبدیل ماتریس تصمیم‌گیری موجود به یک ماتریس "بی مقیاس شده" (جدول ۴)

قدم دوم: ایجاد ماتریس " بی مقیاس" وزین (جدول ۵)

جدول ۴- وزن نرمال شده معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین

	رودهدر	*TBM*	انفجار	اتریشی	روسی
X1	۰/۵۰	۰/۰۷	۰/۵۰	۰/۶۴	۰/۲۹
X2	۰/۵۴	۰/۰۷	۰/۶۱	۰/۴۷	۰/۳۴
X3	۰/۴۳	۰/۰۷	۰/۴۳	۰/۷۱	۰/۳۶
X4	۰/۳۲	۰/۰۸	۰/۴۸	۰/۷۱	۰/۴۰
X5	۰/۵۸	۰/۰۸	۰/۴۹	۰/٤۱	۰/۴۹
X6	۰/۵۵	۰/۳۹	۰/۶۳	۰/۲۳	۰/۳۱
X7	۰/۵۹	۰/۰۸	۰/۵۹	۰/۳۴	۰/۴۲
X8	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۵۷	۰/۳۲	۰/۳۸
X9	۰/۴۰	۰/۲۷	۰/۴۰	۰/۶۷	۰/۴۰
X10	۰/۴۲	۰/۱۴	۰/۴۲	۰/۷۱	۰/۳۵

جدول ۵- وزن نرمال شده بی مقیاس معیارها به دست آمده از نظرات متخصصین

	رودهدر	*TBM*	انفجار	اتریشی	روسی
X1	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۹	۰/۰۴
X2	۰/۰۶	۰/۰۱	۰/۰۶	۰/۰۵	۰/۰۳
X3	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۵	۰/۰۸	۰/۰۴
X4	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۴
X5	۰/۰۵	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۰۳	۰/۰۴
X6	۰/۰۶	۰/۰۴	۰/۰۷	۰/۰۳	۰/۰۴
X7	۰/۰۷	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۰۴	۰/۰۵
X8	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳	۰/۰۳
X9	۰/۰۳	۰/۰۲	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۳
X10	۰/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۳	۰/۰۶	۰/۰۳

قدم سوم و چهارم: محاسبه ماتریس هماهنگی I

جدول ۶- 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

قدم پنجم: محاسبه ماتریس ناهماهنگ NI

جدول ۷- 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

قدم ششم و هفتم: مشخص نمودن ماتریسهای هماهنگ موثر و ناهماهنگ موثر (جدول ۸ و ***Error! Reference source not found.***)

$I = ۰/۵۴۶$ و $NI = ۰/۶۵۲$

ماتریس بولین F

جدول ۸- ماتریس بولین F

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

ماتریس ناهماهنگ موثر G

جدول ۹- ماتریس ناهماهنگ موثر G

۰	۰	۰	۰	-
۰	-	۱	۰	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 گزینه های کم جاذبه (جدول ۱۰ و جدول ۱۱)

جدول ۱۰- ماتریس کلی و موثر H

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

جدول ۱۱- اولویت بندی گزینه های حفاری تونل زرین

روش حفاری	رتبه
اتریشی	۱و۲
رودهدر	۱و۲
انفجار	۳
روسی	۴
TBM	۵

با توجه به نتایج بدست آمده از نظر متخصصان و با استفاده از روش اکتر مشخص کردید دو روش اتریشی و رودهدر بهترین روش ها برای حفاری تونل راه آهن زرین می باشند و با توجه به نتایج حاصل از روش انفجار که در رتبه سوم قرار گرفت می توان دریافت که در انتخاب روش حفاری این تونل باید اصلاحاتی انجام پذیرد و با توجه به میزان بودجه و امکانات مکانیزاسیون از یکی از دو روش حفر تونل اتریشی و یا رودهدر (کله گاوی) استفاده گردد.

روش الکتر که زیرمجموعه روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است، برای انتخاب روش مناسب حفاری در تونل راه آهن زرین جاده اردکان- چادرملو 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 روش اتریشی و رودهدر به عنوان گزینه حفاری برای تونل راه آهن زرین اردکان – چادر ملو انتخاب شد.

[۱] یاوری، مهدی، مهدوری، سعید(۱۳۸۵). پیش بینی نرخ نفوذ ماشین های تونل بری با استفاده از شبکه عصبی. نشریه دانشکده فنی، جلد ۴۰ ، شماره ۱، اردیبهشت ماه ۱۳۸۵ ، از صفحه ۱۱۵ تا ۱۲۱ .

[۲] جزو وزیری فاطمه، روان شادنیا مهدی، شعبانی شاهین، "رتبه بندی گزینه های حفاری تونل های حمل و نقلی با استفاده از روش تصمیم گیری چندمعیاره"ELECTRE ، کنفرانس بین المللی مدیریت و مهندسی صنایع، ۱۳۹۳, دوره ۱.

[۳] حجازی راد سعید، گنجیان نوید ، منصوری محمدرضا، " بررسی روش‌های مناسب حفاری چندمرحله‌ای ایستگاه‌های زیرزمینی عمیق - مطالعه موردی ایستگاه x7 خط هفت مترو تهران"، دوره ۴، شماره ۱، بهار و تابستان ۱۳۹۴، صفحه ۳۳-۵۲.

[۴] عبادتی ناصر, کابلی مجتبی " مدل سازی، توزیع تنش و تغییر رفتار زمین در حفر تونل زیرزمینی شهر تهران" زمین شناسی ژئوتکنیک (زمین شناسی کاربردی) زمستان ۱۳۹۲ , دوره ۹ , شماره ۴.

[۵] لکی روحانی علی، جلفایی ، " مدل سازی کامل سه بعدی حفر تونل و نصب پوشش با تاکید بر حفاری مرحله‌ای، مقایسه تحلیل سه بعدی با دوبعدی" مهندسی عمران و محیط زیست، ۱۳۹۵.

[۶] گودرزی امیررضا, ملکی محمد, میرسپاهی مهراد " تاثیر سربار، هندسه استقرار و الگوی حفاری بر رفتار تونل های دوقلوی کم عمق"، پژوهشنامه حمل و نقل : تابستان ۱۳۹۴ , دوره ۱۲ , شماره ۲.

[۷] صیادی احمد، حیاتی محمد، منجزی مسعود، "مدیریت ریسک ساخت تونل با استفاده از تکنیک‌های"MADM ، نشریه مدیریت صنعتی، مقاله ۶، دوره ۳، شماره ۷، پاییز ۱۳۹۰، صفحه ۹۹-۱۱۶. ..

[۸] فیض الله پوری, محمد؛ جمشید سلحشور و مهدی مهدوی عادلی، ۱۳۹۳، ارائه روش بهینه حفر تونل در ساخت متروها از دیدگاه اجرایی و اقتصادی با بکارگیری روش تحلیل سلسله مراتبی(AHP) مطالعه موردی : متروی اهواز، اولین کنگره ملی مهندسی ساخت و ارزیابی پروژه های عمرانی، گرگان، سازمان نظام مهندسی ساختمان استان گلستان.

[۹] گزارش زمین شناسی تونل راه آهن زرین (اردکان-چادرملو)، شرکت توسعه زیرساختهای ریلی، ایران

[۱۰] میرسالاری, سیداسماعیل؛ محمدفاروق حسینی و فریبرز محمودی، ۱۳۹۴، شناسایی وبررسی ریسک های مرتبط با زمین و TBM در تونل زنی با روش تعادل فشار زمین(EPB)، مطالعه ی موردی خط یک متروی اهواز، دومین کنفرانس بین المللی ژئوتکنیک و مهندسی لرزه ای شهری، تبریز، شرکت دانش بنیان لرزه پایدار آذربایجان زیر نظر دانشگاه تبریز.

[۱۱] افتخاری، سیدمصلح، باغبانان علیرضا، باقرپور راحب (۱۳۹۱). بررسی تاثیر پارامترهای اجرایی ماشین TBM بر نرخ نفوذ آن با استفاده از روش شبکه های عصبی مصنوعی- مطالعه موردی تونل بلند زاگرس. مهندسی تونل و فضاهای زیرزمینی : زمستان ۱۳۹۱ , دوره ۱ , شماره ۱ ; از

صفحه ۲۹ تا صفحه ۴۲.

[۱۲] مهدی یاوری ،سعید مهدوری (۱۳۸۳). پیش بینی ضریب بهره وریTBM های باز. کنفرانس مهندسی معدن ایران، دانشگاه تربیت مدرس۱۲-۱۴ بهمن ۱۳۸۳.

[۱۳] حسینی سعید، شهریار، کوروش، منجزی، مسعود (۱۳۹۰). پیش بینی جابه جایی های زمین اطراف تونل در اثر حفاری با دستگاه) EPB مطالعه موردی: قطعه چهارم از خط ۳ متروی تهران). زمین شناسی مهندسی : پاییز و زمستان ۱۳۹۰ ، دوره ۵ ، شماره ۲ ، از صفحه ۱۲۳۵ تا صفحه ۱۲۵۰.

[۱۴] شریف سامانی, مجید؛ آرش ابراهیم آبادی و امیرحسین بانگیان تبریزی، ۱۳۹۳، انتخاب بهینه ماشین حفار تمام مقطع تونل (TBM) با استفاده از تحلیل سلسله مراتبی فازی (FAHP) مطالعه موردی: تونل بهشت آباد، کنفرانس ملی علوم معدنی، ساری، سازمان نظام مهندسی معدن استان مازندران.

[۱۵] محمدنژاد, رضا؛ مهدی عابدپورکاریزکی؛ محمدجلال ارشدی و محمدمهدی رجائی، ۱۳۹۴، طراحی سیستم نوین تهویه درحفاری تونل های تمام مقطع مکانیزه با TBMمطالعه موردی: خط ۲ قطار شهری مشهد، کنفرانس بین المللی علوم و مهندسی، امارت - دبی، موسسه ایده پرداز پایتخت ویرا.

[۱۶] زارع, مسعود و حسین گودرزی معظمی راد، ۱۳۹۴، ارائه یک مدل تجربی جدید عملکرد دستگاه حفار تمام مقطع در پروژه های تونلسازی مکانیزه، کنفرانس سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، تهران، موسسه مدیران ایده پرداز پایتخت ویرا.

[۱۷] کامرانی مقصود, داود و امیررضا بهزادیان، ۱۳۹۴، بررسی شرایط تنش و کرنش در جبهه حفاری های انجام شده با دستگاهTBM ، کنفرانس بین المللی انسان، معماری، عمران و شهر، تبریز، مرکز مطالعات راهبردی معماری و شهرسازی.

[۱۸] مشرفی فر, محمدرضا؛ جواد غلام نژاد و اسماعیل اعلایی، ۱۳۹۴، ارزیابی عملکرد TBM با استفاده از مدل QTBMدر قطعه اول تونل قمرود، کنفرانس بین المللی دستاوردهای نوین در مهندسی عمران، معماری، محیط زیست و مدیریت شهری، تهران.

[۱۹] اصغرپور، محمدجواد، تصمیم گیری‌های چند معیاره، انتشارات دانشگاه تهران.

[20]E. Triantaphyllou, "Multi-criteria decision making methods: a comparative study," in Applied Optimization, vol. 44, Kluwer Academic, the Netherlands, 2000.

[21]M. Abdoos and N. Mozayani, "Fuzzy decision making based on relationship analysis between criteria," in Proc. North American Fuzzy Information Processing Society Annual Conf., IEEE, pp. 743- 747, Jun. 2005.

[22]J. Chen and S. Lin, "An interactive neural network-based approach for solving multiple criteria decision-making problems," Decision Support Systems, vol. 36, no. 2, pp. 137-146, Oct. 2003.

[23]M. Janic and A. Reggiani, "An application of the multiple criteria decision making analysis to the selection of a new hub airport," EJTIR, vol. 2, no. 2, pp. 113-141, 2002.

[24]S. Haykin, Neural Networks a Comprehensive Foundation, Prentice Hall, 2nd Edition, 1999.

[25]T. Kohonen, Self-Organization and Associative Memory, Springer- Verlag, 3rd Edition, 1996.

[26]H. Miklos, Numerical Control of Kohonen Neural Network for Scateered Data Approximation, Mathematics Subject Classification, 2000.

[27]H. Ching-Lai and Y. Kwangsun, Multiple Attribute Decision Making: Methods and Application, Springer-Berlin Heidelberg, 1981.

[28] Bruines, P. A., & Verhoef, P. W. (2000). Modelling Tunnel Boring Machine Performance by Neuro-Fuzzy Methods. Tunnelling and Underground Space Technology, 15 (3), 259-269. http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(00)00055-9.