مجله تحقیق در عملیات و کاربردهای آن، سال دهم، شماره دوم (پیاپی ۳۷)، تابستان ۹۲، ص ص ۱۱۱-۹۳
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

انتخاب ماشین حفاری مناسب با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه، مطالعه‌ی موردی: معدن سنگ آهن سنگان

محمد حیاتی*[1]، محمد عطایی[2]

۱- دانشجوی دکتری دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، گروه استخراج معدن، شاهرود، ایران.

۲- استاد گروه معدن دانشگاه صنعتی شاهرود، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، گروه استخراج معدن، شاهرود، ایران.

رسید مقاله: ۷ آذر ۱۳۹۱

پذیرش مقاله: ۱۸ اردیبهشت ۱۳۹۲

چکیده

در مسایل تصمیم‌گیری، هدف نهایی رسیدن به انتخاب مناسب و بهینه است. ازآن جهت که دسترسی به این مهم با توجه به گزینه‌های متعدد و محدودیت‌های شناخته و ناشناخته اغلب غیر ممکن می‌باشد؛ روش‌های تصمیم‌گیری مهندسی می‌تواند برای نزدیک شدن به انتخاب بهینه، ابزاری مناسب و علمی باشد. امروزه در مهندسی معدن با توجه به شرایط پیچیده و گزینه‌های متعدد، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، کاربرد فراوان یافته است. انتخاب ماشین آلات معادن روباز با توجه به میزان سرمایه گذاری بالا و شرایط کاربری متغیر، امر مهمی است که در صورت تصمیم‌گیری نامناسب، می‌تواند بهره‌برداری از معدن را با تردید مواجه سازد. از آن جهت که معدن سنگ آهن سنگان در فاز تجهیز و انتخاب ماشین‌آلات قرار دارد؛ از این‌رو در این تحقیق با استفاده از سه روش SAW، TOPSIS و تخصیص خطی که از پرکاربردترین و مهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره می‌باشد؛ مناسب‌ترین ماشین آلات برای معدن مذکور انتخاب شد. بر اساس نتایج به‌دست آمده، مناسب‌ترین گزینه برای ماشین حفاری، ماشین Sandvic مدل DI600 معرفی و انتخاب گردید.

کلمات کلیدی: ماشین چال‌زنی، معدن سنگان، تصمیم گیری چند معیاره، SAW، TOPSIS، تخصیص خطی.

۱ مقدمه

تصمیم‌گیری مناسب و بهینه از اصول اولیه در علوم مهندسی است. علم مهندسی معدن نیز با توجه به پیچیده بودن شرایط و تعدد گزینه‌های ممکن، از این اصل مستثنی نمی‌باشد. انتخاب ماشین‌آلات معادن روباز با توجه به میزان سرمایه‌گذاری بالا و شرایط کاربری متغیر، امر مهمی است که در صورت تصمیم‌گیری نامناسب، می‌تواند سوددهی و حتی ادامه بهره‌برداری از معدن را با تردید مواجه سازد. انتخاب بهینه‌ی ماشین‌آلات می‌تواند با ایجاد تعادل بین افزایش میزان تولید و کاهش هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری اولیه به سود مطلوب منتهی شود.

* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیکی: Mohammad_Hayaty@yahoo.com

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

روش‌های سنتی انتخاب ماشین آلات با توجه به کاربرد وسیعی‌شان در معادن قابلیت بهینه‌سازی عوامل مهم هزینه‌های عملیاتی را ندارند و همه پارامترهای موثر در انتخاب را در نظر نمی‌گیرند و اکثر روش‌های سنتی بر مبنای فرمول‌های ریاضی بنا نهاده شده‌اند. فرمول‌های ریاضی در بسیاری از موارد به جواب صحیح می‌رسد ولی در دنیای واقعی انتخاب ماشین‌آلات با توجه به افزایش تولید روزانه‌ی معادن متقابلاً با افزایش حجم مساله و تعداد متغیرها مواجه است. لذا روش‌های سنتی با افزایش حجم مساله کارآیی خود را از دست خواهند داد؛ یعنی در قبال مقداری خطا می‌توان از روش موثرتری برخوردار شد که به اندازه کافی به جواب بهینه نزدیک باشد؛ در حالی که روش‌های سنتی این امکان را ندارد. این در حالی است که روش‌های تصمیم‌گیری مهندسی می‌توانند برای نزدیک شدن به انتخاب بهینه، ابزاری مناسب و علمی باشد. در مسایل تصمیم‌گیری، هدف نهایی رسیدن به انتخاب بهینه است. از آن جهت که دسترسی به این مهم با توجه به گزینه‌های متعدد و محدودیت‌های شناخته و ناشناخته، اغلب غیر ممکن است؛ استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه بسیار کارگشا بوده؛ منجر به اخذ نتایج صحیح و علمی می‌شوند و هم‌چنین می‌توان با درجه اطمینان بالاتری گزینه مناسب را انتخاب کرد [۱]. امروزه در مهندسی معدن با توجه به شرایط پیچیده و گزینه‌های متعدد، روش‌های تصمیم‌گیری، کاربرد فراوان یافته است.

در تحقیقات متعددی از برخی از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه مانند روش تحلیل سلسه مراتبی (AHP) و روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل (TOPSIS) به‌تنهایی و یا ترکیب با منطق فازی به‌منظور انتخاب گزینه مناسب (از قبیل: روش استخراج مناسب، سیستم حمل و نقل، بارگیری- باربری، حفاری مناسب، مکان مناسب، سیستم نگهداری مناسب و ...) در مسایل مربوط به معدن، تونل و فضاهای زیرزمینی استفاده شده است؛ برخی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در جدول (۱) نشان داده شده است.

بررسی‌های به عمل آمده نشان می‌دهد که در هیچ‌کدام از تحقیقات انجام شده خصوصاً در حوزه مسایل معدنی، از چندین روش تصمیم‌گیری به طور هم‌زمان استفاده نشده؛ لذا در این تحقیق با استفاده از روش‌های وزن دهی ساده(SAW) ، شباهت به گزینه ایده‌آل (TOPSIS) و تخصیص خطی (LA) به عنوان برخی از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه – که در تحقیقات و مطالعات معدنی کمتر مورد استفاده قرار گرفته‌اند - برای انتخاب مناسب‌ترین ماشین چال‌زنی برای معدن سنگ آهن سنگان استفاده شده است.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

جدول ۱. برخی از مهم‌ترین تحقیقات انجام شده در استفاده از روش‌های MADM در مسایل معدنی

مساله و روش مورد مطالعه	مرجع
انتخاب پلان (طرح) بهینه‌ی معدن‌کاری در برنامه‌ریزی تولید یک معدن روباز با استفاده از روش AHP	[۱]
استفاده از تئوری فازی جهت انتخاب بهینه سیستم حمل و نقل ذغال از داخل پیت به کارخانه فرآوری	[۲]
انتخاب روش استخراج زیرزمینی یک معدن با استفاده از روش‌های Yager و AHP	[۳]
خرید مناسب‌ترین سیستم پایش حفاری یک معدن روباز با استفاده از روش AHP	[۴]
انتخاب مناسب‌ترین روش حمل و نقل زیرزمینی مواد معدنی با استفاده از روش PROMETHEE I	[۵]
انتخاب یک سیستم بهینه حمل و نقل در یک معدن زغال با استفاده از روش‌های Yager و AHP	[۶]
انتخاب تجهیزات مناسب برای یک معدن روباز با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره	[۷]
انتخاب بهترین روش استخراج یک معدن طلا با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه	[۸]
انتخاب تجهیزات مناسب برای یک معدن روباز با استفاده از روش AHP	[۹]
انتخاب مناسب‌ترین روش حمل و نقل زیرزمینی مواد معدنی با استفاده از روش PROMETHEE II	[۱۰]
انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج آنومالی شماره سه معدن گل‌گهر با استفاده از روش AHP فازی	[۱۱]
انتخاب سیستم راک بولت نگهداری مناسب در یک معدن زیرزمینی با استفاده از روش AHP	[۱۲]
انتخاب بهترین روش استخراج یک معدن طلا با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه	[۱۳]
انتخاب بهترین روش استخراج یک معدن طلا با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه	[۱۴]
انتخاب بهترین موقعیت ساخت یک کارخانه سیمان با استفاده از روش AHP	[۱۵]
انتخاب روش استخراج مناسب یک معدن روباز با استفاده از روش PROMETHEE II	[۱۶]
انتخاب روش مناسب حفر یک تونل با استفاده از روش AHP	[۱۷]
انتخاب مناسب‌ترین روش استخراج یک معدن زغال سنگ در ترکیه با استفاده از روش AHP	[۱۸]
انتخاب سیستم بهینه حمل و نقل در یک معدن روباز با استفاده از روش‌های Yager و AHP	[۱۹]
انتخاب ماشین حفار مناسب در عملیات تونل‌سازی با استفاده از روش AHP	[۲۰]
انتخاب ماشین حفار مناسب در عملیات تونل‌سازی با استفاده از روش Yager	[۲۱]
انتخاب نوع محصول در یک شرکت معدنی با استفاده از روش AHP	[۲۲]
انتخاب سیستم بهینه بارگیری، باربری در معادن روباز با استفاده از روش‌های AHP و TOPSIS	[۲۳]
انتخاب روش استخراج مناسب یک معدن پلاتین با استفاده از روش AHP	[۲۴]
انتخاب روش بهینه استخراج زیرزمینی با استفاده از روش TOPSIS	[۲۵]
انتخاب روش بهینه استخراج زیرزمینی با استفاده از روش AHP	[۲۶]
انتخاب روش بهینه استخراج زیرزمینی با استفاده از روش AHP فازی	[۲۷]
انتخاب سیستم نگهداری مناسب در تونل اصلی باربری یک معدن زیرزمینی با استفاده از روش AHP	[۲۸]
انتخاب بهینه‌ترین روش استخراج زیرزمینی یک معدن در ترکیه با استفاده از روش AHP فازی	[۲۹]
انتخاب ماشین‌آلات بارگیری- باربری در معادن روباز از روش TOPSIS فازی	[۳۰]
انتخاب روش استخراج زیرزمینی مناسب با استفاده از روش‌های Yager و AHP	[۳۱]
انتخاب سیستم نگهداری مناسب در تونل‌های دسترسی یک معدن زیرزمینی با استفاده از روش AHP	[۳۲]
انتخاب روش استخراج یک معدن با استفاده از روش AHP فازی	[۳۳]
انتخاب محل کارخانه کانه‌آرایی با استفاده از روش AHP	[۳۴]

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

۲ روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه

این روش‌ها به منظور انتخاب مناسب‌ترین گزینه از بین m گزینه‌ی موجود به‌کار می‌روند و مشخصه متمایز آن‌ها این است که معمولاً تعداد معدود و قابل شمارشی از گزینه‌های از پیش‌تعیین شده وجود دارد. بهترین گزینه در یک مدل چند شاخصه، گزینه‌ای خواهد بود که بالاترین ارزش را از هر مشخصه موجود تامین کند. مبنای مدل‌سازی، ایجاد و تشکیل جدول توافقی می‌باشد [۳۵]. از مهم‌ترین و رایج‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌توان به روش‌های وزن‌دهی ساده، شباهت به گزینه ایده‌آل و تخصیص خطی اشاره نمود [۳۶]. در هر سه روش، قبل از هر چیز باید عملکرد گزینه‌ها از نظر شاخص‌ها ارزیابی شود. بدین منظور ماتریس تصمیم به صورت زیر ایجاد گردد:

$$X = \begin{bmatrix} x_{11} & \cdots & x_{1n} \\ \vdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & \cdots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

که در آن x_{ij} عملکرد گزینه‌ی i ($i = 1,2,...,m$) در رابطه با شاخص j ($j = 1,2,...,n$) می‌باشد.

در استفاده از روش‌های وزن دهی ساده، شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل و تخصیص خطی، تعیین اهمیت نسبی شاخص‌های موجود گام موثری در فرآیند حل مساله می‌باشد. بدین منظور می‌توان از روش‌هایی همچون استفاده از نظرات خبرگان، آنتروپی شانون و روش بردار ویژه اشاره نمود [۳۷]. پس از تشکیل ماتریس تصمیم و تعیین ضریب اهمیت شاخص‌ها، روند روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه مذکور با هم متفاوت است که در ادامه به شرح آن‌ها پرداخته شده است:

۲-۱ روش وزن‌دهی ساده

روش وزن‌دهی ساده یکی از قدیمی‌ترین روش‌های به کار رفته در تصمیم‌گیری چندشاخصه است به طوری‌که در این روش با مفروض بودن اوزان اهمیت شاخص‌ها (بردار W)، مناسب‌ترین گزینه (A^*)، محاسبه می‌شود [۳۵]. منطق این روش گشتاورهای مرکزی، مانند میانگین می‌باشد و در واقع این روش همان میانگین موزون است که اعداد درون ماتریس را به منزله‌ی عناصری که میانگین‌شان محاسبه شده و اوزان شاخص‌ها را به منزله‌ی وزن این اعداد در نظر می‌گیرد. لذا لازم است از روشی برای بی‌مقیاس‌سازی استفاده کرد که شاخص‌ها را هم جهت سازد. فرض به‌کارگیری این روش بر استقلال ارجحیت و مجزا بودن آثار شاخص‌ها از یکدیگر است. مراحل این روش به دو گام اصلی خلاصه می‌شود [۳۸]:

گام اول: بی‌مقیاس‌سازی ماتریس تصمیم: بدین منظور از نرم خطی استفاده می‌شود که برای شاخص‌های مثبت و منفی به ترتیب از روابط زیر استفاده می‌شود:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\underset{i}{Max}\{x_{ij}\}} \qquad (1)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

$$r_{ij} = \frac{\underset{i}{Min}\{x_{ij}\}}{x_{ij}} \qquad (۲)$$

گام دوم: انتخاب گزینه برتر: در این مرحله وزن نهایی هر گزینه و در نهایت گزینه برتر از رابطه‌ی زیر تعیین می‌شود:

$$A^* = \{A_i \mid \underset{i}{Max} \frac{\sum_{j=1}^{m} w_j r_{ij}}{\sum_{j=1}^{m} w_j}\} \qquad (۳)$$

چنانچه مجموع وزن شاخص‌ها مساوی یک باشد؛ خواهیم داشت:

$$A^* = \{A_i \mid \underset{i}{Max} \sum_{j=1}^{m} w_j r_{ij}\} \qquad (۴)$$

۲-۲ روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل

اساس این روش، انتخاب گزینه‌ای است که کم‌ترین فاصله را از جواب ایده‌آل مثبت و بیش‌ترین فاصله را از جواب ایده‌آل منفی دارد. در این روش، گزینه‌ای ارجح خواهد بود که نزدیک‌ترین فاصله را در فضای n بعدی به راه حل ایده‌آل داشته باشد. در این تکنیک در فضای اقلیدسی راه‌حل ایده‌آل مثبت (A^+) و راه‌حل ایده‌آل منفی (A^-) تعریف شده؛ سپس فاصله گزینه iام از راه‌حل ایده‌آل منفی و از راه‌حل ایده‌آل مثبت محاسبه می‌شود. در ادامه مبنای رتبه‌بندی گزینه‌ها میزان دوری از A^- و میزان نزدیکی به A^+ خواهد بود. در تشخیص راه‌حل ایده‌آل مثبت و منفی این نکته حائز اهمیت است که مطلوبیت هر شاخص باید به‌طور یکنواخت افزایشی (یا کاهشی) باشد که در این صورت بهترین ارزش موجود از یک شاخص نشان دهنده‌ی ایده‌آل مثبت آن بوده؛ بدترین ارزش موجود از آن مشخص کننده ایده‌آل منفی برای آن خواهد بود [۳۸]. مراحل روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل به شرح زیر است:

گام اول: تبدیل ماتریس تصمیم به یک ماتریس بی‌مقیاس شده: این عملیات با استفاده از نرم اقلیدسی انجام می‌شود که رابطه آن به شرح زیر است:

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^{m} x_{ij}^2}} \qquad (۵)$$

گام دوم: ایجاد ماتریس تصمیم بی‌مقیاس‌شده وزن‌دار (V): بدین منظور ماتریس تصمیم بی‌مقیاس‌شده در بردار وزن شاخص‌ها ضرب می‌شود؛ یعنی:

$$v_{ij} = w_j r_{ij}, \qquad j = 1, \ldots, n; \qquad i = 1, \ldots, m. \qquad (۶)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

گام سوم: مشخص نمودن راه‌حل ایده آل مثبت و راه‌حل ایده آل منفی: اگر حل ایده‌آل با A^+ و ضد ایده‌آل با A^- نشان داده شود؛ در این صورت:

$$A^+ = \{v_1^+, v_2^+, \ldots, v_j^+, \ldots, v_n^+\} \quad (۷)$$

$$A^- = \{v_1^-, v_2^-, \ldots, v_j^-, \ldots, v_n^-\} \quad (۸)$$

که v_j^+ بهترین مقدار شاخص j از بین تمام گزینه‌ها و v_j^- بدترین مقدار شاخص j از بین تمام گزینه‌ها می‌باشد. گزینه‌هایی که در A^+ و A^- قرار می‌گیرند؛ به ترتیب نشان‌دهنده‌ی گزینه‌های کاملاً بهتر و کاملاً بدتر هستند.

گام چهارم: محاسبه‌ی فاصله‌ی نسبی از A^+ و A^-: در این مرحله، فاصله‌ی اقلیدسی هر یک از گزینه‌ها از راه حل ایده‌آل مثبت و فاصله اقلیدسی هر یک از گزینه‌ها از راه حل ایده‌آل منفی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad (۹)$$

$$S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^{n} (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad (۱۰)$$

که در این روابط اندیس j معرف شاخص مورد نظر و اندیس i معرف گزینه مورد نظر می‌باشد.

گام پنجم: محاسبه‌ی شاخص نزدیکی نسبی: این شاخص از رابطه‌ی زیر محاسبه می‌شود:

$$C_i^+ = \frac{S_i}{S_i^+ + S_i} \quad (۱۱)$$

مقدار شاخص نزدیکی نسبی بین صفر و یک تغییر می‌کند. هر چه گزینه‌ی مورد نظر به ایده‌آل مشابه‌تر باشد؛ مقدار شاخص نزدیکی نسبی آن، به یک نزدیک‌تر خواهد بود. کاملاً روشن است که اگر گزینه‌ای بر گزینه‌ی ایده‌آل منطبق باشد؛ آن‌گاه فاصله آن تا حل ایده‌آل مساوی صفر و شاخص نزدیکی نسبی آن مساوی یک خواهد بود و در صورتی که گزینه‌ای بر گزینه ضد ایده‌آل منطبق باشد؛ آن‌گاه فاصله آن تا حل ضد ایده‌آل مساوی صفر و شاخص نزدیکی نسبی آن مساوی صفر خواهد بود.

گام ششم: رتبه‌بندی گزینه‌ها: بدین منظور بر اساس مقدار شاخص نزدیکی نسبی، گزینه‌ای که دارای بیش‌ترین شاخص نزدیکی نسبی است؛ در رتبه اول و گزینه‌ای که دارای کم‌ترین شاخص نزدیکی نسبی است؛ در رتبه آخر قرار می‌گیرد.

۲-۳ روش تخصیص خطی

این روش یکی از مهم‌ترین فنون تصمیم‌گیری چند شاخصه می‌باشد. در روش تخصیص خطی گزینه‌های مفروض از یک مساله بر حسب امتیازات آن‌ها از هر شاخص رتبه‌بندی شده؛ سپس رتبه نهایی گزینه‌ها از طریق یک فرآیند جبران خطی (به ازای تبادلات ممکن در بین شاخص‌ها) مشخص خواهد شد. در این روش بر اساس خاصیت سیمپلکس فضای جواب، ضمن در نظر گرفتن تمامی ترتیبات به طور ضمنی، جواب بهینه در یک

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

فضای محدب سیمپلکس استخراج می‌شود. به علاوه خاصیت جبرانی بودن شاخص‌ها از مبادله بین رتبه‌ها و گزینه‌ها به‌دست می‌آید؛ اگر چه بردار وزن شاخص‌ها بر اساس نظر خبرگان به‌دست آمده باشد [۳۶]. مراحل به کارگیری این تکنیک به شرح زیر می‌باشد:

گام اول: تعیین رتبه‌ی هر گزینه به ازای هر یک از شاخص‌های موجود به صورت یک ماتریس (m×m) که سطر آن بیان‌گر رتبه و ستون آن بیان‌گر شاخص است.

گام دوم: تشکیل ماتریس تخصیص یا ماتریس گاما (γ) که یک ماتریس مربعی بوده و سطر آن گزینه i و ستون آن رتبه k می‌باشد. درایه‌های ماتریس گاما (γ_{ik}) عبارت است از مجموع وزن شاخص‌هایی که گزینه iام در آن-ها دارای رتبه kام می‌باشد. ماتریس گاما یک ماتریس تخصیص است که می‌توان با هر یک از روش‌های تخصیص (حمل و نقل، روش مجارستانی، روش شبکه و روش برنامه‌ریزی خطی صفر و یک) جواب بهینه را به‌دست آورد. متداول‌ترین روش حل در تخصیص خطی روش برنامه‌ریزی خطی است.

گام سوم: محاسبه‌ی جواب بهینه (رتبه نهایی) با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی به کمک مدل زیر:

$$Max\ Z = \sum_{i=1}^{m}\sum_{k=1}^{m} \lambda_{ik}.h_{ik} \qquad (۱۲)$$

s.t.

$$\begin{aligned} &\sum_{k=1}^{m} h_{ik} = 1 \qquad i = 1,2,\cdots,m, \\ &\sum_{i=1}^{m} h_{ik} = 1 \qquad k = 1,2,\cdots,m, \\ &h_{ik} = 0 \text{ یا } 1. \end{aligned} \qquad (۱۳)$$

همان‌طورکه اشاره شد در کلیه روش‌های فوق تعیین اهمیت نسبی شاخص‌های موجود گام موثری در فرآیند حل مساله می‌باشد.

از جمله روش‌های استخراج ضرایب شاخص‌ها می‌توان به روش‌های استفاده از نظرات خبرگان و آنتروپی شانون و تلفیق آن‌ها اشاره نمود [۳۵].

مراحل به‌کارگیری روش آنتروپی شانون به شرح ذیل می‌باشد [۳۵]:

پس از آنکه ماتریس تصمیم‌گیری به دست آمد؛ مقدار درایه r_{ij} (درایه‌های ماتریس تصمیم) را می‌توان به p_{ij} تبدیل کرد (رابطه ۱۴):

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^{m} r_{ij}} \quad \forall i,j \qquad (۱۴)$$

مقدار آنتروپی مشخصه‌ی jام به صورت رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌گردد:

$$E_j = -k\sum_{i=1}^{m} p_{ij} \ln p_{ij}, \quad k = \frac{1}{\ln m} \qquad (۱۵)$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

به کمک E_j مقدار d_j، برای هر مشخصه، محاسبه می‌شود:

$$d_j = ۱ - E_j ; \quad \forall j \tag{۱۶}$$

وزن w'_j مشخصه‌ی jام بدین صورت به‌دست می‌آید:

$$w'_j = \frac{d_j}{\sum_{i=۱}^{m} d_j} \tag{۱۷}$$

اگر برای یک شاخص از جانب خبرگان، یک ضریب اهمیت نظیر λ_j وجود داشته باشد؛ محاسبه وزن نهایی را می‌توان با کمک رابطه (۱۸) انجام داد:

$$w_j = \frac{\lambda_j w'_j}{\sum_{j=۱}^{n} \lambda_j w'_j} \tag{۱۸}$$

۳ مطالعه موردی

کانسار سنگ آهن سنگان در استان خراسان (شمال شرقی ایران) در فاصله ۳۰۰ کیلومتری جنوب شرقی مشهد و ۱۶ کیلومتری شمال شهر سنگان از توابع شهرستان خواف واقع شده است. کانسار سنگان با توجه به کانی‌سازی آن، از نوع سنگ آهن اسکارنی می‌باشد که قسمتی از روند شرق به غرب رشته کوه طالب را تشکیل می‌دهد. نتایج مطالعات انجام شده حاکی از آن است که ابعاد تقریبی کانسار سنگان در حدود ۲۱۰ کیلومتر مربع بوده و از سه ناحیه معدنی شرقی، مرکزی و غربی تشکیل شده است و ذخیره زمین شناسی آن در حدود ۱/۲ میلیارد تن تخمین زده می‌شود. بیش‌ترین میزان ذخایر سنگ آهن به ناحیه معدنی غربی تعلق داشته که خود به پنج آنومالی A, B, C, Aشمالی و C جنوبی تقسیم می‌گردد [۳۹]. با توجه به برنامه‌ریزی کلان سازمان توسعه و به‌دنبال آن شرکت ملی فولاد ایران جهت تولید ۲۵ میلیون تن فولاد در سال و نیاز به استفاده از منابع غنی و دست نخورده، پیش‌بینی تولید ۴/۷ میلیون تن گندله آهن و ۰/۳ میلیون تن سنگ آهن دانه‌بندی شده برای معادن سنگ آهن سنگان در نظر گرفته شده است که از این بابت در بین تمامی معادن بیش‌ترین سهم تولید به این معدن اختصاص داده شده است [۳۹]؛ با توجه به اینکه معدن روباز سنگ آهن سنگان در فاز تجهیز قرار دارد و باتوجه به این مهم که انتخاب ماشین آلات اصلی، یکی از مهم‌ترین مسایل در این مرحله است؛ بنابراین در این تحقیق با استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مناسبت‌ترین ماشین چال‌زنی با در نظر گرفتن تمامی مزایا و محدودیت‌ها برای معدن روباز سنگ آهن سنگان انتخاب شده است.

۳-۱ تعیین معیارهای کلیدی در انتخاب ماشین‌های چال‌زنی

در انتخاب ماشین چال‌زنی مناسب در معادن مشخصه‌ها و پارامترهای گوناگونی دخیل هستند اما استفاده از تمامی معیارهای موثر در انتخاب ماشین‌آلات، علاوه بر آنکه امکان مقایسه بین آن‌ها را مشکل می‌سازد؛ نیاز به وقت و

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

زمان بسیار زیادی داشته؛ ممکن است نتایج نامطلوبی به‌دنبال داشته باشد؛ بنابراین باید مهم‌ترین معیارها، انتخاب و مورد ارزیابی قرار گیرند. در این تحقیق به منظور شناسایی و انتخاب مهم‌ترین معیارهای موثر در انتخاب ماشین چال‌زنی، بر اساس نظرات خبرگان و طراحان و هم‌چنین مرور و بررسی تحقیقات انجام شده، پرسش‌نامه‌هایی تهیه شد. در ادامه با توزیع پرسش‌نامه‌ها بین کارشناسان با تجربه معدن که در این زمینه دارای اطلاعات مناسب بودند؛ از آن‌ها خواسته شد تا این پرسش‌نامه‌ها را بر اساس مقیاس ۹ کمیتی ساعتی مطابق جدول (۲) تکمیل کنند. با توجه به این مقیاس باید به معیارهای مهم امتیاز ۹ و به معیارهای کم اهمیت‌تر، امتیاز کم‌تری داده شود. همان‌طور که اشاره گردید در این پرسش‌نامه‌ها کلیه معیارهای موثر در انتخاب ماشین‌آلات معادن روباز، با توجه به منابع مختلف وجود داشتند.

جدول ۲. مقیاس ۹ کمیتی ساعتی برای امتیازدهی به معیارها

تعریف	اهمیت خیلی کم	اهمیت کم	اهمیت متوسط	اهمیت زیاد	اهمیت خیلی زیاد	اهمیت بینابین حالات فوق
امتیاز	۱	۳	۵	۷	۹	۲ و۴ و ۶ و ۸

جلسات متعدد و تکمیل و پرکردن پرسشنامه‌ها با حضور ۱۰ نفر از کارشناسان خبره، با تجربه و صاحب نظر معدن انجام شد که با توجه به نظرات این افراد، امتیاز میانگین و انحراف معیار هر کدام از معیارهای موثر در انتخاب ماشین چال‌زنی محاسبه گردید که نتایج در جدول (۳) درج شده است.

جدول ۳. امتیاز میانگین معیارهای مختلف در مورد ماشین چال‌زنی

ردیف	معیار	امتیاز	انحراف معیار	ردیف	معیار	امتیاز	انحراف معیار
۱	میزان تولید روزانه*	۸/۳۰	۰/۶۷	۱۷	مجموع هزینه‌های عملیاتی ماشین	۵/۷۳	۱/۸۲
۲	قطر چال*	۷/۴۰	۰/۸۴	۱۸	فضای کار مورد نیاز ماشین	۵/۰۷	۱/۰۷
۳	نرخ نفوذ مته در سنگ*	۷/۳۰	۱/۳۳	۱۹	مجموع پارامترهای فنی ماشین	۵/۶	۱/۹
۴	عمق چال*	۷/۲	۱/۲	۲۰	شرایط کف	۵/۵	۱/۸۴
۵	قابلیت حفاری سنگ*	۷/۲۰	۱/۲۲	۲۱	هزینه‌ی سوخت و انرژی	۵/۵	۱/۵۸
۶	هزینه سرمایه‌ای ماشین*	۷/۱۴	۱/۰۶	۲۲	عیار متوسط	۵/۲۰	۲/۶۲
۷	ابعاد پله*	۷	۰/۸۱	۲۳	ایمنی	۵/۱۰	۲/۴۲
۸	مجموع پارامترهای عملیاتی*	۷	۰/۸۱	۲۴	سیکل کاری ماشین	۵/۱۰	۱/۱۰
۹	میزان تولید مته در ساعت*	۶/۷	۱/۶۳	۲۵	اتوماسیون	۵	۱/۸۳
۱۰	مهارت اپراتور*	۶/۵	۱/۶۴	۲۶	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری	۵	۲/۴۹
۱۱	شیب چال*	۴/۳	۱/۶۳	۲۷	هزینه‌ی تعمیرات دوره‌ای	۴/۷۰	۲/۱۱
۱۲	تعمیر و نگهداری*	۶/۱	۱/۵۲	۲۸	شرایط آب و هوا	۴/۳۰	۱/۸۳
۱۳	عمر مفید دستگاه*	۶/۱	۱/۷۲	۲۹	رطوبت	۴	۲/۴۰
۱۴	سایز خردایش مواد	۶	۱/۴۹	۳۰	هزینه روغنکاری	۴	۱/۷۰
۱۵	عمر معدن	۶	۱/۴۱	۳۱	محیط زیست	۳/۵۰	۲/۶۴
۱۶	هزینه قطعات یدکی	۵/۸۸	۲/۱۴	۳۲	هزینه‌ی لاستیک	۲/۳۰	۲/۵۸

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

پس از تجزیه و تحلیل نظرات جمع‌آوری شده از کارشناسان و جمع‌بندی داده‌ها، و بر اساس نتایج جدول (۳)، معیارهایی که دارای امتیاز میانگین بیشتر از ۶ بودند و انحراف معیار آن‌ها کمتر از ۲ بود (بر اساس نظرات خبرگان)، به عنوان معیارهای کلیدی در انتخاب ماشین‌آلات چال‌زنی شناخته شدند. این معیارها با علامت ستاره (*) در جدول (۳) نشان داده شده‌اند.

۳-۲ ماشین‌آلات پیشنهادی برای معدن سنگ آهن سنگان

با توجه به تنوع ماشین‌های چال‌زنی و هم‌چنین شرایط معدن سنگ آهن سنگان و با بهره‌گیری از معادن روباز مشابه، ماشین‌های چال‌زنی زیر به عنوان گزینه‌های مورد نظر در این معدن معرفی شدند و مشخصات گوناگون این دستگاه‌ها، مانند قطر چال قابل حفر، قدرت موتور، ابعاد دستگاه و ... در جدول (۴) آورده شده است.

جدول ٤. مشخصات دستگاه‌های چال‌زنی

	Sandvik DTH	Sandvik DTH	Sandvik DTH	Atlascopco penumatic Tophammer
نماد	A	B	C	D
مدل دستگاه	DI100	DI200	DI600	CM 348 TH
قطر چال قابل حفر	۷۰-۱۱۵	۷۰-۱۱۵	۸۹-۱۹۰	۶۴-۱۰۲
طول تیوب حفاری	۳۰۰۰	۴۰۰۰	۶۰۰۰	۴۰۰۰
قدرت موتور(KW)	۱۲۵	۱۴۶	۴۰۳	۲۵۰
وزن دستگاه(Kg)	۸۵۰۰	۱۳۰۰۰	۲۹۰۰۰	۴۶۰۰
ابعاد دستگاه (ارتفاع×عرض×طول)	۸/۶×۲/۴×۲/۹	۹×۳/۴×۳/۸	۱۲/۷×۲/۵×۳/۳	۵/۷۳×۲/۹×۲/۰۸
نیاز به کمپرسور به‌عنوان همراه	دارد	دارد	دارد	ندارد
قیمت(ریال)	۲.۵۰۰.۰۰۰.۰۰۰	۳.۵۰۰.۰۰۰.۰۰۰	۷.۵۰۰.۰۰۰.۰۰۰	۱.۴۰۰.۰۰۰.۰۰۰

۳-۳ انتخاب ماشین چال‌زنی مناسب

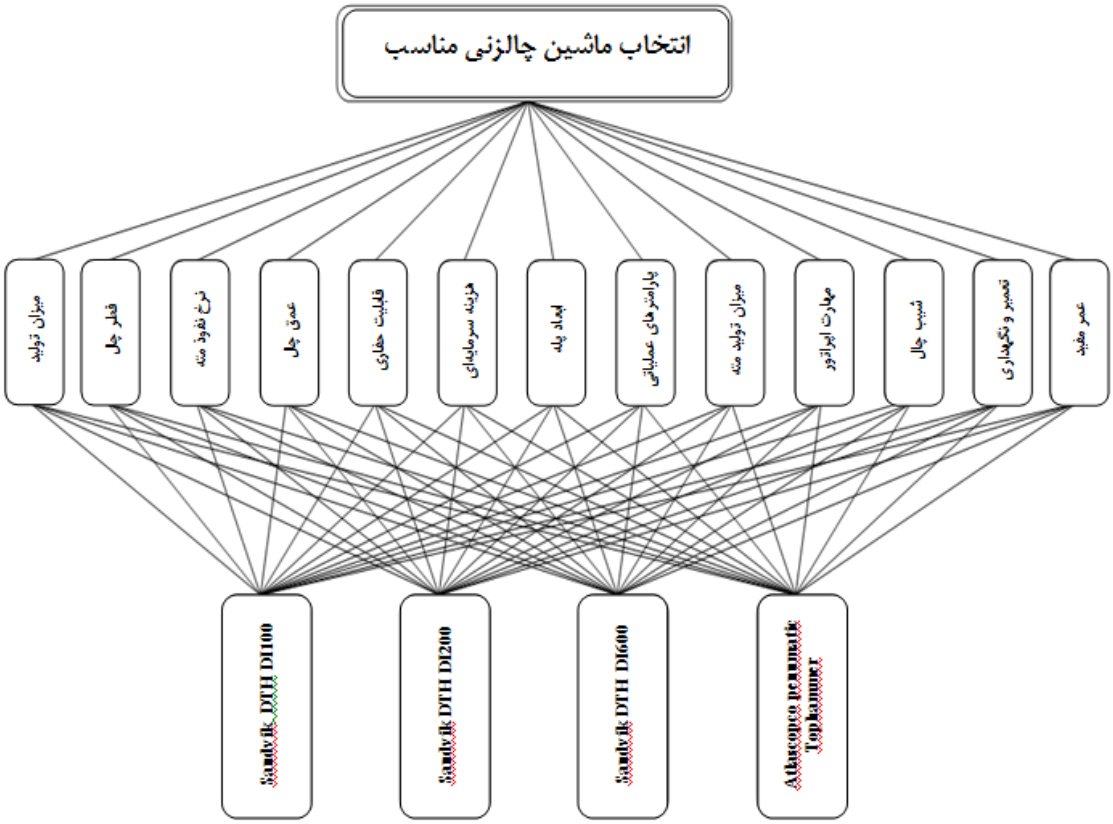
انتخاب ماشین چال‌زنی مناسب در این تحقیق شامل مراحل مختلفی است که توضیحات مربوط به این مراحل در ادامه به ترتیب ذکر شده است.

۳-۳-۱ تشکیل ماتریس تصمیم و تعیین اهمیت شاخص‌ها

در این تحقیق در فرآیند انتخاب ماشین مناسب، سیزده شاخص و چهار گزینه در نظر گرفته شده که ساختار سلسله مراتبی آن در شکل (۱) نشان داده شده است. همان‌طورکه اشاره شد انتخاب ماشین چال‌زنی مناسب بر اساس نتایج به دست آمده از تحقیقات مختلف و نیز مصاحبه‌های متعدد با مهندسین طراح، خبرگان و کارشناسانی که در امر معدن تجربه کافی داشته‌اند و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره انجام شده است. در این راستا، به منظور تعیین امتیاز نسبی هر یک از این ماشین‌آلات بر اساس هر یک از معیارهای سیزده گانه مذکور،

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

پرسش‌نامه‌هایی طراحی گردید و از کارشناسان خواسته شد تا بر اساس هر کدام از معیارها، بر اساس مقیاس ۹ کمیتی ساعتی (مطابق جدول ۲)، گزینه‌های مطرح شده به عنوان ماشین‌آلات را امتیازدهی کنند. در ادامه برای تلفیق امتیازهای داده شده بر اساس نظرات خبرگان، از روش میانگین استفاده گردیده که نتایج در جدول (۵) به عنوان ماتریس تصمیم نشان داده شده است.



شکل ۱. ساختار سلسله مراتبی مربوط به انتخاب ماشین چال‌زنی

جدول ۵. ماتریس تصمیم (امتیاز ماشین‌های مختلف با توجه به معیارها بر اساس تلفیق نظرات خبرگان)

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
A	۱۴/۶	۲۵/۷	۵/۶	۶۳/۶	۳۸/۵	۲/۵	۵	۷	۱۳/۶	۶۳/۵	۱۳/۷	۶	۵
B	۲۹/۶	۳۸/۷	۳۸/۶	۶۳/۶	۶۳/۵	۶/۵	۷۵/۶	۷۵/۶	۱۳/۶	۶۳/۶	۸۸/۶	۵/۶	۲۵/۶
C	۵/۶	۱۴/۷	۵۷/۶	۴۳/۶	۱۴/۶	۷۵/۶	۱۴/۷	۶۷/۶	۷۱/۶	۷۱/۷	۲۹/۶	۲۹/۷	۷۱/۷
D	۴۳/۶	۶۳/۵	۵۷/۶	۶	۸۸/۵	۶	۳۸/۶	۷	۷۵/۶	۶۳/۶	۶۳/۶	۶	۷

برای تعیین ضریب اهمیت شاخص‌ها بر اساس نظرات خبرگان (وزن اولیه)، با جمع‌آوری و تلفیق نظرات آن‌ها با روش میانگین، ماتریس مقایسه زوجی شاخص‌ها تشکیل و با استفاده از روش بردار ویژه، وزن هر یک از

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

شاخص‌ها به‌دست آمده که نتایج در جدول (۶) نشان داده شده است. در این تحقیق برای تعیین وزن شاخص‌ها، از روش آنتروپی شانون نیز استفاده شده است (وزن ثانویه). لذا با تلفیق وزن‌های حاصل از نظرات خبرگان (وزن اولیه) و وزن‌های حاصل از روش آنتروپی شانون (وزن ثانویه)، وزن نهایی شاخص‌ها بر اساس رابطه (۱۸) محاسبه گردیده که نتایج در جدول (۷) نشان داده شده است. لازم به ذکر است شاخص‌های میزان تولید روزانه، قطر چال، نرخ نفوذ مته در سنگ، عمق چال، قابلیت حفاری سنگ، ابعاد پله، مجموع پارامترهای عملیاتی، میزان تولید مته در ساعت، شیب چال و عمر مفید دستگاه دارای جنبه مثبت هستند به‌این معنی که هر چه امتیاز این شاخص‌ها برای یک گزینه بیش‌تر باشند باعث وضعیت بهتر آن گزینه شده؛ در رتبه بالاتری (نزدیک به یک) قرار می‌گیرد. سایر شاخص‌های هزینه‌ی سرمایه‌ای ماشین، مهارت اپراتور و تعمیر و نگهداری دارای جنبه منفی هستند و هرچه امتیاز این شاخص‌ها برای یک گزینه کم‌تر باشد؛ باعث می‌شوند که آن گزینه در رتبه بالاتری قرار گیرد. لازم به ذکر است که تمامی این شاخص‌ها از یکدیگر مستقل می‌باشند.

جدول ٦. ماتریس مقایسه‌ی زوجی معیارهای انتخاب ماشین چال‌زنی و تعیین وزن اولیه‌ی شاخص‌ها

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}	**وزن اولیه**
C_1	۱	۱/۱۲	۱/۱۴	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۶	۱/۱۹	۱/۱۹	۱/۲۴	۱/۲۸	۱/۳۲	۱/۳۶	۱/۳۶	۰/۰۹۲۰
C_2	۰/۸۹	۱	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۴	۱/۰۶	۱/۰۶	۱/۱۰	۱/۱۴	۱/۱۷	۱/۲۱	۱/۲۱	۰/۰۸۲۰
C_3	۰/۸۸	۰/۹۹	۱	۱/۰۱	۱/۰۱	۱/۰۲	۱/۰۴	۱/۰۴	۱/۰۹	۱/۱۲	۱/۱۶	۱/۲۰	۱/۲۰	۰/۰۸۰۸
C_4	۰/۸۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۱	۱	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۷	۱/۱۱	۱/۱۴	۱	۱/۱۸	۰/۰۷۹۸
C_5	۰/۸۷	۰/۹۷	۰/۹۹	۱	۱	۱/۰۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۱/۰۷	۱/۱۱	۱/۱۴	۱/۱۸	۱/۱۸	۰/۰۷۹۸
C_6	۰/۸۶	۰/۹۷	۰/۹۸	۰/۹۹	۰/۹۹	۱	۱/۰۲	۱/۰۲	۱/۰۷	۱/۱۰	۱/۱۳	۱/۱۷	۱/۱۷	۰/۰۷۹۲
C_7	۰/۸۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۱	۱/۰۰	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۱	۱/۱۵	۱/۱۵	۰/۰۷۷۶
C_8	۰/۸۴	۰/۹۵	۰/۹۶	۰/۹۷	۰/۹۷	۰/۹۸	۱	۱	۱/۰۴	۱/۰۸	۱/۱۱	۱/۱۵	۱/۱۵	۰/۰۷۷۶
C_9	۰/۸۱	۰/۹۱	۰/۹۲	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۴	۰/۹۶	۰/۹۶	۱	۱/۰۳	۱/۰۶	۱/۱۰	۱/۱۰	۰/۰۷۴۳
C_{10}	۰/۷۸	۰/۸۸	۰/۸۹	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۱	۰/۹۳	۰/۹۳	۰/۹۷	۱	۱/۰۳	۱/۰۷	۱/۰۷	۰/۰۷۲۰
C_{11}	۰/۷۶	۰/۸۵	۰/۸۶	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۸۸	۰/۹۰	۰/۹۰	۰/۹۴	۰/۹۷	۱	۱/۰۳	۱/۰۳	۰/۰۶۹۸
C_{12}	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۷	۱	۱	۰/۰۶۷۶
C_{13}	۰/۷۳	۰/۸۲	۰/۸۴	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۵	۰/۸۷	۰/۸۷	۰/۹۱	۰/۹۴	۰/۹۷	۱	۱	۰/۰۶۷۶

جدول ۷. محاسبه وزن نهایی هر شاخص با تلفیق نظرات خبرگان و روش آنتروپی شانون

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
E_j	۰/۹۹۹	۰/۹۹۵	۰/۹۹۱	۰/۹۹۴	۰/۹۹۳	۰/۹۹۶	۰/۹۹۳	۳/۹۹۸	۰/۹۹۲	۰/۹۹۵	۰/۹۹۲	۰/۹۹۶	۰/۹۹۱
d_j	۰/۰۰۰۱۷	۰۰۴۰۳/۰	۰۰۰۰۵/۰	۰۰۰۵۹/۰	۰۰۰۸۷/۰	۰۰۳۳۸/۰	۰۰۶۱۱/۰	۰۰۰۱۷/۰	۰۰۰۷۹/۰	۰۰۴۴۲/۰	۰۰۰۷۷/۰	۰۰۲۳۷/۰	۰۰۸۸۴/۰
W'_j	۰۰۵۲۶/۰	۱۲۳۹۱/۰	۰۰۱۵۸/۰	۰۱۷۹۸/۰	۰۲۶۷۵/۰	۱۰۳۷۷/۰	۱۸۷۸۱/۰	۰۰۵۱۵/۰	۰۲۴۱۷/۰	۱۳۵۷۱/۰	۰۲۳۶۷/۰	۰۷۲۸۶/۰	۲۷۱۳۸/۰
W_i **وزن نهایی**	۰۰۶۵۴/۰	۱۳۷۲۶/۰	۰۰۱۷۳/۰	۰۱۹۳۸/۰	۰۲۸۸۴/۰	۱۱۱۰۳/۰	۱۹۶۸۸/۰	۰۰۵۴۰/۰	۰۲۴۲۶/۰	۱۳۲۰۰/۰	۰۲۲۳۲/۰	۰۶۶۵۳/۰	۲۴۷۸۳/۰
جنبه معیار	**مثبت**	**مثبت**	**مثبت**	**مثبت**	**مثبت**	**منفی**	**مثبت**	**مثبت**	**مثبت**	**منفی**	**مثبت**	**منفی**	**مثبت**

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

همان‌گونه که اشاره شد برای انتخاب ماشین چال‌زنی مناسب، از روش‌های SAW، TOPSIS و تخصیص خطی (LA) به‌عنوان برخی از مهم‌ترین و قوی‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه، استفاده شده است که در ادامه‌ی محاسبات مربوط به استفاده از این روش‌ها آمده است.

۳-۳-۲ اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش وزن‌دهی ساده

بدین منظور ابتدا ماتریس تصمیم با استفاده از نرم خطی (روابط ۱ و ۲) بی‌مقیاس می‌شود. ماتریس تصمیم وزن‌دار از ضرب ضریب اهمیت هر شاخص در درایه‌های مربوط در ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده به‌دست می‌آید (جدول ۸). وزن نهایی گزینه‌ها از جمع سطرهای ماتریس تصمیم وزن‌دار حاصل می‌شود که نتایج به شرح جدول (۹) می‌باشد. بر این اساس اولویت‌بندی گزینه‌ها به این صورت می‌باشد: C > B > D > A.

جدول ۸. ماتریس تصمیم وزن‌دار در روش وزن‌دهی ساده

	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
A	۰/۹۴۴۶	۰/۹۸۲۴	۰/۹۸۹۳	۱/۰۰۰۰	۰/۸۷۶۲	۱/۰۰۰۰	۰/۷۰۰۳	۱/۰۰۰۰	۰/۹۰۸۱	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۱/۰۰۰۰	۰/۶۴۸۵
B	۰/۹۶۷۷	۱/۰۰۰۰	۰/۹۷۱۱	۰۰۰۰/۱	۹۱۶۹/۰	۹۲۸۶/۰	۹۴۵۴/۰	۹۶۴۳/۰	۹۰۸۱/۰	۸۴۹۲/۰	۹۶۴۹/۰	۹۲۳۱/۰	۸۱۰۶/۰
C	۰۰۰۰/۱	۹۶۷۵/۰	۰۰۰۰/۱	۹۶۹۸/۰	۰۰۰۰/۱	۷۷۰۴/۰	۰۰۰۰/۱	۹۵۲۹/۰	۹۹۴۱/۰	۷۳۰۲/۰	۸۸۲۲/۰	۸۲۳۰/۰	۰۰۰۰/۱
D	۹۸۹۲/۰	۷۶۲۹/۰	۰۰۰۰/۱	۹۰۵۰/۰	۹۵۷۷/۰	۸۶۶۷/۰	۸۹۳۶/۰	۰۰۰۰/۱	۰۰۰۰/۱	۸۴۹۲/۰	۹۲۹۹/۰	۰۰۰۰/۱	۹۰۷۹/۰

جدول ۹. وزن نهایی گزینه‌ها بر اساس روش وزن‌دهی ساده

گزینه	A	B	C	D
وزن نهایی	۰/۸۴۵۳	۰/۹۰۳۵	۰/۹۱۹۰	۰/۸۸۴۳

۳-۳-۳ اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل

بدین منظور در ابتدا با استفاده از روابط ۵ و ۶ به ترتیب ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده؛ ماتریس تصمیم وزن‌دار تشکیل می‌شود (جدول‌های ۱۰ و ۱۱). در ادامه برای هر شاخص با استفاده از روابط ۷ و ۸ به‌ترتیب حل ایده‌آل مثبت و حل ایده‌آل منفی محاسبه شده است (جدول ۱۲). سپس فاصله گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت و منفی و در نهایت شاخص نزدیکی نسبی هر گزینه محاسبه گردیده (جدول ۱۳). بر این اساس اولویت‌بندی گزینه‌ها به صورت زیر می‌باشد:

$$C > B > D > A$$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

جدول ۱۰. ماتریس تصمیم بی‌مقیاس شده در روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل

	$C_{۱}$	$C_{۲}$	$C_{۳}$	$C_{۴}$	$C_{۵}$	$C_{۶}$	$C_{۷}$	$C_{۸}$	$C_{۹}$	$C_{۱۰}$	$C_{۱۱}$	$C_{۱۲}$	$C_{۱۳}$
A	۴۸۴۱/۰	۵۲۶۴/۰	۴۹۹۶/۰	۵۱۵۷/۰	۴۶۶۷/۰	۴۳۹۵/۰	۳۹۲۵/۰	۵۱۰۵/۰	۴۷۶۲/۰	۴۲۰۷/۰	۵۲۹۰/۰	۴۶۳۷/۰	۳۸۰۷/۰
B	۴۹۵۹/۰	۵۳۵۸/۰	۴۹۰۴/۰	۵۱۵۷/۰	۴۸۸۳/۰	۴۷۳۳/۰	۵۲۹۹/۰	۴۹۲۲/۰	۴۷۶۲/۰	۴۹۵۵/۰	۵۱۰۴/۰	۵۰۲۴/۰	۴۷۵۹/۰
C	۵۱۲۵/۰	۵۱۸۴/۰	۵۰۵۰/۰	۵۰۰۲/۰	۵۳۲۶/۰	۵۷۰۶/۰	۵۶۰۵/۰	۴۸۶۴/۰	۵۲۱۲/۰	۵۷۶۲/۰	۴۶۶۶/۰	۵۶۳۵/۰	۵۸۷۰/۰
D	۵۰۷۰/۰	۴۰۸۸/۰	۵۰۵۰/۰	۴۶۶۷/۰	۵۱۰۰/۰	۵۰۷۲/۰	۵۰۰۹/۰	۵۱۰۵/۰	۵۲۴۳/۰	۴۹۵۵/۰	۴۹۱۹/۰	۴۶۳۷/۰	۵۳۳۰/۰

جدول ۱۱. ماتریس تصمیم وزن‌دار در روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل

	$C_{۱}$	$C_{۲}$	$C_{۳}$	$C_{۴}$	$C_{۵}$	$C_{۶}$	$C_{۷}$	$C_{۸}$	$C_{۹}$	$C_{۱۰}$	$C_{۱۱}$	$C_{۱۲}$	$C_{۱۳}$
A	۰۰۳۱۷/۰	۰۷۲۲۵/۰	۰۰۰۸۶/۰	۰۱۰۰۰/۰	۰۱۳۴۶/۰	۰۴۸۸۰/۰	۰۷۷۲۸/۰	۰۰۲۷۶/۰	۰۱۱۵۵/۰	۰۵۵۵۴/۰	۰۱۱۸۱/۰	۰۳۰۸۵/۰	۰۹۴۳۵/۰
B	۰۰۳۲۴/۰	۰۷۳۵۵/۰	۰۰۰۸۵/۰	۰۱۰۰۰/۰	۰۱۴۰۸/۰	۰۵۲۵۵/۰	۱۰۴۳۳/۰	۰۰۲۶۶/۰	۰۱۱۵۵/۰	۰۶۵۴۰/۰	۰۱۱۳۹/۰	۰۳۳۴۳/۰	۱۱۷۹۳/۰
C	۰۰۳۳۵/۰	۰۷۱۱۵/۰	۰۰۰۸۷/۰	۰۰۹۷۰/۰	۰۱۵۳۶/۰	۰۶۳۳۵/۰	۱۱۰۳۶/۰	۰۰۲۶۳/۰	۰۱۲۶۵/۰	۰۷۶۰۶/۰	۰۱۰۴۱/۰	۰۳۷۴۹/۰	۱۴۵۴۸/۰
D	۰۰۳۳۲/۰	۰۵۶۱۱/۰	۰۰۰۸۷/۰	۰۰۹۰۵/۰	۰۱۴۷۱/۰	۰۵۶۳۱/۰	۰۹۸۶۱/۰	۰۰۲۷۶/۰	۰۱۲۷۲/۰	۰۶۵۴۰/۰	۰۱۰۹۸/۰	۰۳۰۸۵/۰	۱۳۲۰۸/۰

جدول ۱۲. حل ایده‌آل مثبت و حل ایده‌آل منفی برای هر شاخص

	$C_{۱}$	$C_{۲}$	$C_{۳}$	$C_{۴}$	$C_{۵}$	$C_{۶}$	$C_{۷}$	$C_{۸}$	$C_{۹}$	$C_{۱۰}$	$C_{۱۱}$	$C_{۱۲}$	$C_{۱۳}$
ایده‌آل مثبت	۰۰۳۳۵/۰	۰۷۳۵۵/۰	۰۰۰۸۷/۰	۰۱۰۰۰/۰	۰۱۵۳۶/۰	۰۴۸۸۰/۰	۱۱۰۳۶/۰	۰۰۲۷۶/۰	۰۱۲۷۲/۰	۰۵۵۵۴/۰	۰۱۱۸۱/۰	۰۳۰۸۵/۰	۱۴۵۴۸/۰
ایده‌آل منفی	۰۰۳۱۷/۰	۰۵۶۱۱/۰	۰۰۰۸۵/۰	۰۰۹۰۵/۰	۰۱۳۴۶/۰	۰۶۳۳۵/۰	۰۷۷۲۸/۰	۰۰۲۶۳/۰	۰۱۱۵۵/۰	۰۷۶۰۶/۰	۰۱۰۴۱/۰	۰۳۷۴۹/۰	۰۹۴۳۵/۰

جدول ۱۳. فاصله گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت و منفی و شاخص نزدیکی نسبی آن‌ها

گزینه	فاصله از ایده‌آل مثبت	فاصله از ایده‌آل منفی	شاخص نزدیکی نسبی
A	۰۶۰۹۶/۰	۰۳۰۶۶/۰	۳۳۴۶۷/۰
B	۰۳۰۲۷/۰	۰۴۲۹۱/۰	۵۸۶۳۱/۰
C	۰۲۶۱۶/۰	۰۶۲۷۷/۰	۷۰۵۸۵/۰
D	۰۲۷۸۸/۰	۰۴۵۷۱/۰	۶۲۱۱۵/۰

۳-۳-٤ اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از روش تخصیص خطی

بدین منظور در ابتدا با توجه به ماتریس تصمیم، رتبه هر گزینه به ازای هر یک از شاخص‌های موجود تعیین می‌شود. بر این اساس مطابق جدول (۱۴) یک ماتریس (۱۳×۱۳) که سطر آن بیان‌گر رتبه و ستون آن بیان‌گر شاخص است؛ تشکیل می‌شود. گام بعدی در روش تخصیص خطی تشکیل ماتریس تخصیص می‌باشد (جدول ۱۵) که یک ماتریس مربعی ۱۳×۱۳ بوده که سطر آن گزینه (ماشین چال‌زنی) i و ستون آن رتبه k می‌باشد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

مولفه‌های این ماتریس عبارت است از مجموع وزن شاخص‌هایی که گزینه‌ی i ام در آن‌ها دارای رتبه‌ی k ام می‌باشد. در مرحله‌ی بعد رتبه‌ی نهایی هر کدام از گزینه‌ها با حل مدل برنامه‌ریزی خطی رابطه‌ی (۱۲) در نرم‌افزار LINGO، محاسبه شده است. بر این اساس اولویت‌بندی گزینه‌ها به این صورت می‌باشد: C > B > D > A

جدول ۱٤. تعیین رتبه گزینه‌ها به ازای هر یک از شاخص‌ها

رتبه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	C_{12}	C_{13}
۱	C	B	C	A	C	A	C	A	D	A	A	A	C
۲	D	A	D	B	D	B	B	D	C	B	B	D	D
۳	B	C	A	C	B	D	D	B	A	D	D	B	B
۴	A	D	B	D	A	C	A	C	B	C	C	C	A

جدول ۱۵. ماتریس تخصیص در روش تخصیص خطی

گزینه	رتبه ۱	رتبه ۲	رتبه ۳	رتبه ۴
A	۳۵۶۷/۰	۱۳۷۳/۰	۰۲۶۰/۰	۴۸۰۱/۰
B	۱۳۷۳/۰	۴۸۱۶/۰	۳۵۵۱/۰	۰۲۶۰/۰
C	۴۸۱۸/۰	۰۲۴۳/۰	۱۵۶۶/۰	۳۳۷۳/۰
D	۰۲۴۳/۰	۳۵۶۹/۰	۴۶۲۲/۰	۱۵۶۶/۰

رتبه‌بندی گزینه‌ها (ماشین‌های چال‌زنی) بر اساس روش‌های وزن‌دهی ساده، شباهت به گزینه ایده‌آل و تخصیص خطی در سه ستون اول جدول (۱۶) ارایه شده است. برای تلفیق رتبه‌های به دست آمده از تکنیک میانگین رتبه‌ها نیز استفاده شده (ستون آخر جدول ۱۶). با توجه به نتایج به دست آمده ماشین چال‌زنی C در تمامی روش‌ها رتبه اول را کسب کرده و به این ترتیب ماشین چال‌زنی C (ماشین Sandvic مدل DI600) به عنوان ماشین مناسب و بهینه پیشنهاد می‌گردد.

جدول ۱٦. رتبه‌بندی ماشین‌های چال‌زنی و انتخاب مناسب‌ترین ماشین

گزینه‌ها	رتبه‌بندی با روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه			میانگین رتبه‌ها
	وزن‌دهی ساده	شباهت به گزینه ایده‌آل	تخصیص خطی	
A	۴	۴	۴	۴
B	۲	۳	۲	۲
C	۱	۱	۱	۱
D	۳	۲	۳	۳

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

لازم به یادآوری است ضمن جدید بودن رویکرد این تحقیق در استفاده هم‌زمان از چندین روش تصمیم‌گیری در حوزه معدن، باید اذعان داشت که هر چند روش‌های تخصیص خطی، تاپسیس و وزن‌دهی ساده هر یک از ویژگی‌های خاصی تبعیت می‌کنند و رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس این ویژگی‌ها صورت می‌گیرد اما استفاده از چندین روش به‌طور هم‌زمان باعث شده که نقاط قوّت روش‌های مختلف تصمیم‌گیری در اخذ نتایج لحاظ شده و نتیجه به‌دست آمده، نقاط قوّت روش‌های مختلف را دارا باشد. هم‌چنین هر سه روش مورد استفاده در این تحقیق (تخصیص خطی، تاپسیس و وزن‌دهی ساده)، گزینه A را به عنوان گزینه‌ی مناسب (رتبه اول) معرفی کرده‌اند که نشان‌دهنده‌ی هم‌خوانی و تایید نتایج به‌دست آمده می‌باشد. هم‌چنین همان‌طورکه بیان شد هدف اصلی در این تحقیق انتخاب گزینه‌ی مناسب بوده که تمامی روش‌ها گزینه‌ی یکسانی را (گزینه A) به‌عنوان ماشین مناسب چال‌زنی انتخاب کرده‌اند و رتبه‌بندی سایر گزینه‌ها برای ما اهمیت چندانی ندارد.

٤ نتیجه‌گیری

انتخاب ماشین‌آلات یکی از پارامترهای اصلی طراحی معادن روباز می‌باشد. تعداد و ظرفیت ماشین‌آلات تاثیر زیادی بر روی هزینه‌های معدن‌کاری دارد. انتخاب ماشین‌آلات یکی از تصمیم‌گیری‌های اصلی معادن روباز می‌باشد که بر روی اقتصادی بودن عملیات معدن‌کاری تاثیر قابل ملاحظه‌ای دارد. پروسه انتخاب ماشین‌آلات معمولاً با شروع مرحله آماده‌سازی آغاز می‌شود. در بیشتر فعالیت‌های معدن‌کاری، هزینه‌های بارگیری مواد یکی از اجزای اصلی هزینه‌های عملیاتی معدن‌کاری را شامل می‌شود و از این رو مساله‌ی انتخاب ماشین‌آلات یکی از چالش‌های اساسی مدیران معدن می‌باشد. محققین مختلف برای انتخاب مناسب ماشین‌آلات در معادن، مشخصه‌ها و پارامترهای گوناگونی را از قبیل شرایط کانسار و وضعیت اقلیمی منطقه تا هزینه‌های تعمیر و نگهداری ماشین‌آلات، را به‌عنوان عوامل تاثیرگذار در نظر گرفته‌اند. ولی در عمل برخی از مشخصه‌ها نقش حساس و تعیین کننده‌ای در انتخاب ماشین‌آلات دارند که باید توجه اصلی را روی آن‌ها متمرکز کرد. برای دست‌یابی به یک انتخاب مناسب در زمینه‌ی ماشین‌آلات معدنی، جمع‌آوری اطلاعات در مورد شرایط مختلف معدن و ماشین‌آلات موجود و هم‌چنین تعیین عوامل تاثیرگذار در انتخاب ماشین‌آلات امری ضروری است. پروسه انتخاب ماشین‌آلات حفاری معمولاً با شروع مرحله‌ی آماده سازی آغاز می‌شود. استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه در مسایل مهندسی بسیار راه‌گشا بوده؛ منجر به اتخاذ تصمیمات علمی و انتخاب مناسب و بهینه می‌شوند لذا در این تحقیق با استفاده از روش وزن دهی ساده، روش شباهت به گزینه‌ی ایده‌آل و روش تخصیص خطی ماشین چال‌زنی مناسب در معدن سنگان با توجه به پارامترهای موثر انتخاب گردید.

منابع

[۳۵]. اصغرپور، م. ج.، (۱۳۷۷). تصمیم‌گیری‌های چندمعیاره، تهران: انتشارات دانشگاه تهران.

[۳۷]. آذر، ع.، رجب‌زاده، ع.، (۱۳۸۷). تصمیم‌گیری کاربردی، تهران: نگاه دانش.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

[۳۹]. شرکت ملی فولاد ایران، (۱۳۸۶). گزارش پیشرفت طرح آماده‌سازی معدن سنگ آهن سنگان.

[1] Liqun, Z., Shihui, L., Lianfu, Z., Lianming, J., (1995). The analysis and practice of multi objective decision making technique for selecting a mining plan. Proceedings APCOM XXV Conference., Brisbane, 9–14 July, 255–259.

[2] Bascetin, A., Kesimal, B., (1999). The study of a fuzzy set theory for the selection of an optimum coal transportation system from pit to the power plant. International journal of surface mining reclamation and environmental, 13, 97-101.

[3] Karadogan, A., Bascetin, A., Kahriman, A., Gorgun, S., (2001). A new approach in selection of underground mining method. Proceedings of the International Conference Modern Management of Mine Producing, Geology and Environment Protection, 171– 183.

[4] Dessureault, S., Scoble, M. J., (2000). Capital investment appraisal for the integration of new technology into mining systems. Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy (Section A: Mining Technology)., January–April, 109, A30-A40.

[5] Elevli, B., Demirci, A., Dayi, O., (2002). Underground haulage selection: shaft or ramp for a small-scale underground mine. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy., 102, 255–260.

[6] Kesimal, A., Bascetin, A., (2002). Application of fuzzy multiple attribute decision making in mining operations. Mineral Resource Engineering, 11, 59–72.

[7] Samanta, B., Sarkar, B., Murherjee, S. K., (2002). Selection of opencast mining equipment by a multi criteria decision-making process. Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A), 111, 136–142.

[8] Vieira, F. M. C. C., (2003). Utility-based framework for optimal mine layout selection, subject to multiple attribute decision criteria. Proceedings of the 31st International Symposium on Application of Computers and Operations Research in the Minerals Industries, Cape Town, 14–16 May. 133–149.

[9] Bascetin, A., (2004). An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine. Mining Technology (Trans. Inst. Min. Metall. A)., 113, A192-A199.

[10] Elevli, B., Demirci, A., (2004). Multi criteria choice of ore transport system for an underground mine: application of PROMETHEE methods. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy, 56, 251–256.

[11] Bitarafan, M. R., Ataei, M., (2004)., Mining method selection by multiple criteria decision making tools. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy., 104(9), 493–498.

[12] Kazakidis, V. N., Mayer, Z., Scoble, M. J., (2004). Decision making using the analytic hierarchy process in mining engineering, Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy. Mining Technology., 113, A30–A42.

[13] Vieira, F. M. C. C., (2004). Rock engineering-based evaluation of mining layouts applicable to ultra-deep, gold bearing. tabular deposits. PhD Thesis, University of the Witwatersrand, Johannesburg.

[14] Vieira, F. M. C. C., (2005). An integrated, multi-disciplinary evaluation of ultra-deep layouts. Proceedings Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry (APCOM), Tucson, USA, 30 March-1 April, 655–665.

[15] Ataei, M., (2005). Multicriteria selection for an alumina-cement plant location in East Azerbaijan province of Iran. The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy., 105(8), 507–513.

[16] De Almeida, A. T., Alencar, L. H., De Miranda, C. M. G., (2005). Mining methods selection based on multi criteria models. Proceedings of the Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry, Dessureault, Ganguli, Kecojevic and Dwyer (eds), Taylor and Francis Group, London, 19–24.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

[17] Bottero, M., Peila, D., (2005). The use of the Analytic Hierarchy Process for the comparison between micro tunneling and trench excavation. Tunnelling and Underground Space Technology., 20(6), 501–513.

[18] Uysal, Ö., Demirci, A., (2006). Shortwall stoping versus sub-level longwall caving-retreat in Eli coal Fields. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy., 106(6), 425–432.

[19] Bascetin, A., Oztas, O., Kanli A. I., (2006). EQS: a computer software using fuzzy logic for equipment selection in mining engineering. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 106, 63–70.

[20] Acaroglu, O., Ergin, H., Eskikaya, S., (2006a). Analytical hierarchy process for selection of road headers. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 106, 569–575.

[21] Acaroglu, O., Feridunoglu, C., Tumac, D., (2006b). Selection of road headers by fuzzy multiple attribute decision making method. Trans. Inst. Min. Metall., A 115, A91–A98.

[22] Wu, H., Yuan, J., Zhang, Y., Song, S., (2007). The evaluation of the core competition of the Wugang Mining Cooperation using the Analytic Hierarchy Process. The International Journal of Mineral Resources Engineering., 12(2), 119–126.

[23] Aghajani, A., Osanloo, M., (2007). Application of AHP-TOPSIS Method for Loading-Haulage Equipment Selection in Open pit Mines. XXVII international Mining Convention, Mexico.

[24] Musingwini, C., Minnitt, R. C. A., (2008). Ranking the efficieny of selected platinum mining methods using the analytic hierarchy process (AHP). Third International Platinum Conference 'Platinum in Transformation, The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. 319-326.

[25] Ataei, M., Sereshki, F., Jamshidi, M., Jalali S. M. E., (2008). Suitable mining method for the Golbini No.8 deposit in Jajarm (Iran) by using TOPSIS method. Mining Technology: Transactions of the Institute of Mining & Metallurgy, 117(1), 1-5.

[26] Ataei, M., Sereshki, F., Jamshidi, M., Jalali S. M. E., (2008). Mining method selection by AHP approach. Journal of the south African institute of mining and metallurgy (SAIMM), 108(2), 741-749.

[27] Zare Naghadehi, M., Mikaeil, R., Ataei, M., (2008). The application of fuzzy analytic hierarchy process (FAHP) approach to selection of optimum underground mining method for Jajarm Bauxite Mine, Iran. Expert Systems with Applications., doi:10.1016/j.eswa.2008.10.006

[28] Yavuz, M., Iphar, M., Once, G., (2008). The optimum support design selection by using AHP method for the main haulage road in WLC Tuncbilek colliery. Tunneling and Underground Space Technology, 23(1), 111–119.

[29] Karadogan, A., Kahriman, A., Ozer, U., (2008). Application of fuzzy set theory in the selection of underground mining method. The Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 108(2), 73–79.

[30] Aghajani Bazzazi, A., Osanloo, M., Soltanmohamadi, H., (2008). Loading- haulage equipment selection in open pit mines based of fuzzy- Topsis method. international symposium on mine planning & equipment, 3, 246-254.

[31] Alpay, S., Yavuz, M., (2009). Underground mining method selection by decision making tools. Tunneling and Underground Space Technology, 24(1), 173–184.

[32] Oraee, K., Hosseini, N., Gholinejad, M., (2009). A New Approach for Determination of Tunnel Supporting System Using Analytical Hierarchy Process (AHP). Proceeding of 2009 Coal Operators' Conference, The AusIMM Illawarra Branch. University of Wollongong, 78- 89.

[33] Azadeh, A., Osanloo, M., Ataei, M., (2009). A new approach to mining method selection based on modifying the Nicholas technique, Applied Soft Computing, 110(8), 481-490.

[34] Safari, M., Ataei, M., Khalokakaei, R., Karamozian, M., (2010). Mineral processing plant location using the analytic hierarchy process- a case study: The Sangan iron ore mine (Phase 1). Mining Science and Technology (China), 20(5), 691-695.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]

[36] Saaty, T. L., Vargas, L. G., (2006). Decision making with the analytic network process: economic, political, social and technological applications with benefits, opportunities, costs and risks, New York: Springer.

[38] Hwang, C., Yoon, K., (1981). Multiple attribute decision making methods and applications: a state of the art survey, New York: Verlag.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-01]