نشریه علمی-پژوهشی "مهندسی معدن"
IranianJournalofMining Engineeing
(IRJME)

دوره دوازدهم،شماره۳۴، بهار ۱۳۹۶، صفحه۳۵ تا ۴۷
Vol. 12, No. 34, 2017, pp.35-47

تعیین ماشین‌آلات بارگیری و باربری معادن سطحی با استفاده از رویکرد عدم قطعیت تئوری خاکستری

عزالدین بخت‌آور*[1]؛حسن محمودی[2]

۱- دانشیار مهندسی استخراج معدن، گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، ebakhtavar@gmail.com
۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی استخراج معدن، دانشگاه صنعتی ارومیه، hassanmahmodi67@gmail.com

(دریافت۲۴آذر ۱۳۹۴، پذیرش ۷ اسفند ۱۳۹۵)

چکیده

تعیین نوع و تعداد ماشین‌آلات معدنی و به‌طور ویژه سیستم بارگیری و باربری یکی از مسایل مهم طراحی در معادن روباز است که به‌طور اساسی تاثیرپذیر از ظرفیت استخراج سالانه‌ی معدن و تاثیرگذار بر فعالیت‌های بعدی و هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌ای معدن است. در این مقاله، رویکرد تئوری خاکستری با هدف تعیین ماشین‌آلات بارگیری و باربری توسعه داده شد. با استفاده از این رویکرد که از یک ماهیت عدم‌قطعیتی پیروی می‌کند، نوع شاول و کامیون مطلوب برای معدن مس سونگون در دو مرحله‌ی مجزا تعیین شد. در تعیین نوع شاول میزان تولید روزانه، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌ی عملیاتی، زمان چرخه‌ی عملیاتی شاول، قابلیت دسترسی و تناسب جام با ابعاد کانسنگ خردشده، و در تعیین نوع کامیون میزان تولید شاول، هزینه‌ی سرمایه‌گذاری، هزینه‌ی عملیاتی، چرخه‌ی عملیاتی کامیون و تناسب ظرفیت کامیون با شاول به‌عنوان مهم‌ترین معیارهای انتخاب درنظر گرفته شدند. نتایج بررسی نشان داد برای تأمین ظرفیت استخراجی ۱۴ میلیون تن کانسنگ سالانه حداقل دو شاول ۱۲ مترمکعبی موردنیاز است، و به هر شاول باید حداقل ۹ کامیون ۹۰ تنی تخصیص یابد. در نهایت، پس از مقایسه نتایج رویکرد خاکستری با روش تحلیل سلسله مراتبی فازی مشخص شد که نتایج تئوری خاکستری مطابق با تحلیل سلسله مراتبی فازی بودند.

کلمات کلیدی

سیستم بارگیری و باربری، ماشین‌آلات معدن، تئوری خاکستری، استخراج سطحی، معدن مس سونگون.

Archive of SID

www.SID.ir

*نویسنده مسئول مکاتبات

۱- مقدمه

انتخاب سیستم بارگیری و باربری یکی از بخش‌های مهم در طراحی پروژه‌های معدنکاری است. این بخش همواره اهمیت بالایی برای مدیران دارد زیرا هزینه‌های بارگیری و باربری در معدن روباز حدود ۵۰ تا ۶۰ درصد هزینه‌های معدن‌کاری را شامل می‌شود [۱]. در بیش از ۸۰ درصد معادن روباز برای حمل و نقل از کامیون و شاول استفاده می‌شود [۲]. تعداد و ظرفیت ماشین‌آلات تاثیر زیادی بر راندمان حمل و نقل دارد. انتخاب ماشین‌آلات یکی از تصمیم‌های اصلی در معادن روباز است که اقتصادی بودن عملیات معدنکاری را تحت تاثیر قرار می‌دهد. یک انتخاب نادرست می‌تواند علاوه بر غیراقتصادی کردن عملیات معدنکاری و کاهش بهره‌وری، باعث ایجاد مشکلاتی در ارتباط با مدیریت ناوگان حمل و نقل شود. فرآیند انتخاب و تعیین ماشین‌آلات معادن یک فرآیند ثابت نیست و معیارهای زیادی بر روی این انتخاب تأثیر می‌گذارند. همین امر باعث می‌شود که این تصمیم‌گیری، یک تصمیم‌گیری پیچیده‌ی چند معیاره باشد. تاکنون از مدل‌ها و روش‌های گوناگونی برای انتخاب سیستم حمل و نقل استفاده شده است که از آن جمله می‌توان به استفاده از منطق فازی [۳]، روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره‌ی فازی [۴]، الگوریتم ژنتیک [۵]، روش تحلیل سلسله مراتبی[۱] [۶]، روش تاپسیس[۲] فازی [۷]، و روش ویکور[۳] [۸] اشاره کرد.

در بیش‌تر پژوهش‌ها، فرآیند انتخاب سیستم حمل و نقل صورت گرفته است اما همان‌طور که بیان شد با توجه به شرایط معدنکاری در معادن روباز، سیستم حمل و نقل انتخابی در غالب معادن سیستم کامیون و شاول بوده و این انتخاب گزینشی بدیهی و طبیعی محسوب می‌شده است. آن‌چه در سیستم شاول- کامیون اهمیت دارد، تعیین نوع و تعداد کامیون و شاول با توجه به معیارهای مؤثر است. در فرآیند انتخاب نوع و تعیین تعداد شاول و کامیون معمولاً ابتدا نوع شاول مناسب و تعداد آن با توجه به ویژگی‌ها و شرایط معدن انتخاب، و سپس کامیون متناسب با آن شاول گزینش می‌شود. این روند انتخاب، اولین و اساسی‌ترین گام در بهینه‌سازی حمل و نقل معادن است زیرا عدم تناسب بین شاول و کامیون انتخاب شده، موجب افزایش هزینه‌ها و کاهش راندمان می‌شود. در حل مسائل دنیای واقعی، خصوصاً فرآیندهای انتخاب به‌وسیله‌ی قضاوت‌های مبتنی بر متغیرهای کلامی تصمیم‌گیرندگان، لحاظ کردن ماهیت غیرقطعی پدیده‌ها نتایج قابل اعتمادتری را به‌دست می‌دهد. در این پژوهش برای لحاظ کردن این عدم‌قطعیت در تصمیم‌گیری از تکنیک تصمیم‌گیری چند معیاره خاکستری استفاده شده است.

۲- بررسی رویکرد پیشنهادی

۲-۱- عدم قطعیت در تصمیم‌گیری

بشر همواره در زندگی با مسائل پیچیده‌ی تصمیم‌گیری مواجه بوده است. ویژگی اصلی این‌گونه مسائل وجود معیارها و یا اهداف غیرهمگون و ناسازگار مثل هزینه، قابلیت اطمینان و بهره‌وری است. تصمیم‌گیری چند معیاره یکی از رویکردهایی است که می‌تواند در حل این‌گونه مسائل پیچیده، در حوزه‌های مختلف ازجمله علوم مهندسی و مدیریت مورد استفاده قرار گیرد. قضاوت‌های تصمیم‌گیرنده‌ها در مورد معیارها نوعاً کیفی و نامطمئن‌اند، و با مقادیر دقیق عددی قابل بیان نیستند. بنابراین، برای مواجهه با این مشکل باید از رویکردهایی نظیر فازی یا تئوری خاکستری که برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم قطعیت مناسب‌اند، استفاده کرد. در دنیای واقعی، بیش‌تر وقایع غیرقطعی‌اند و مقادیر آن‌ها غالباً تا حدودی تغییرپذیر است. تصمیم‌گیری در شرایط عدم‌قطعیت زمانی به‌وجود می‌آید که در یک مسأله تعدادی از متغیرها غیرقابل کنترل باشند و اطلاعات کافی برای پیش‌بینی آن‌ها وجود نداشته باشد [۹].

۲-۲- رویکرد تئوری خاکستری

تئوری خاکستری در سال ۱۹۸۲ توسط دنگ بر اساس مفهوم مجموعه‌های خاکستری معرفی شد. این رویکرد به‌عنوان یکی از تئوری‌های جدید ریاضی برگرفته از مجموعه خاکستری است که برای حل مسایل غیرقطعی با داده‌های گسسته و اطلاعات ناقص موثر است. این تئوری شامل پنج بخش اصلی پیش‌بینی خاکستری، تحلیل رابطه‌ای خاکستری، تصمیم خاکستری، برنامه‌ریزی خاکستری و کنترل خاکستری است. به‌طور کلی، یک سیستم خاکستری به‌صورت سیستمی بیان می‌شود که دربرگیرنده اطلاعات غیرقطعی به‌واسطه اعداد و متغیرهای خاکستری است. مفهوم کلی یک سیستم خاکستری در شکل ۱ نشان داده شده است [۹].

شکل ۱- مفهوم یک سیستم خاکستری [۹]

Archive of SID
www.SID.ir

مطابق با شکل ۱، در تئوری خاکستری تمام سیستم‌ها به سه دسته سفید، سیاه و خاکستری تقسیم می‌شوند که قسمت‌های سفید شامل اطلاعات واضح و معین، قسمت‌های سیاه شامل اطلاعات ناشناخته (نامعین) و رنگ خاکستری بیانگر اطلاعات ناکامل و یا عدم اطمینان برای سیستم است [۱۰]. در تئوری خاکستری مطابق با درجه اطلاعات، اگر اطلاعات سیستم به‌طور کامل شناخته شده باشد آن سیستم را سفید می‌گویند اما اگر اطلاعات سیستم ناشناخته باشد آن‌را سیاه می‌نامند. در حالت سوم، اگر بخشی از اطلاعات یک سیستم شناخته شده باشد آن‌را سیستم خاکستری گویند [۹].

علاوه بر تئوری خاکستری، رویکرد منطق فازی نیز در حل مسایل با شرایط عدم قطعیت کاربردهای متعدد و چه بسا بیشتری داشته است. مزیت رویکرد تئوری خاکستری (به‌عنوان نسخه توسعه‌یافته تئوری فازی) نسبت به تئوری و منطق فازی این است که می‌تواند شرایط فازی را نیز درنظر گیرد [۹]. اعداد خاکستری و فازی تا حدود زیادی مشابه هستند و تفاوت اساسی بین آن‌ها در این است که در اعداد خاکستری مقدار دقیق عدد نامشخص است اما بازه‌ای که مقدار آن عدد را دربر می‌گیرد معلوم است یا به تعبیر دیگر مقدار دقیق کران راست و چپ عدد مشخص است. در حالی‌که در عدد فازی عدد به‌صورت یک بازه تعریف می‌شود و مقدار دقیق کران چپ و راست عدد مشخص نیست و از یک تابع عضویت پیروی می‌کند. در این راستا، تعیین تابع عضویت برای کران راست و چپ عدد فازی کمی پیچیده است. بر این اساس، محاسبات با اعداد خاکستری نسبت به اعداد فازی ساده‌تر است [۱۱].

مزیت سیستم خاکستری در مقابل مدل‌های آماری متداول این است که مدل‌های خاکستری برای برآورد رفتار سیستم‌های ناشناخته نیازمند داده‌های کم و محدودی هستند [۱۲].

۲-۲-۱- اعداد خاکستری و روابط بین آن‌ها

عدد خاکستری یکی از ابداعات تئوری خاکستری است که با وجود معین بودن طیف عددی آن، بیانگر یک مقدار نامعین است [۹]. با فرض این‌که X یک مجموعه مرجع باشد، مجموعه خاکستری G از مجموعه مرجع به‌صورت زیر بیان می‌شود:

$$\begin{cases}\overline{\mu}_G(x): x \to [0,1] \\ \underline{\mu}_G(x): x \to [0,1]\end{cases}$$

بر اساس $x \in X,\ \overline{\mu}_G(x) \geq \underline{\mu}_G(x)$، $\overline{\mu}_G(x)$ و $\underline{\mu}_G(x)$ به ترتیب تابع عضویت بالا و پایین G هستند. در صورتی‌که $\overline{\mu}_G(x) = \underline{\mu}_G(x)$، مجموعه خاکستری G یک مجموعه فازی است. یک عدد خاکستری معمولاً به‌صورت زیر نشان داده می‌شود:

$$\otimes G = G\left|\begin{matrix}\overline{\mu} \\ \underline{\mu}\end{matrix}\right.$$

اگر یک عدد خاکستری هم دارای کران پایین $\underline{G}$ و هم دارای کران بالای $\overline{G}$ باشد، عدد خاکستری بازه‌ای خوانده می‌شود و آن‌را به‌صورت $\otimes G \in \left[\underline{G}, \overline{G}\right]$ نمایش می‌دهند.

طول یک عدد خاکستری که از رابطه‌ی ۱ محاسبه می‌شود بیانگر تفاضل بین کران بالا و پایین یک عدد خاکستری است که در واقع مقدار عدد نامشخص در بازه‌ای بین این دو کران قرار می‌گیرد.

$$L(\otimes G) = \overline{G} - \underline{G} \qquad (۱)$$

برای دو عدد خاکستری $\otimes G_1 \in \left[\underline{G_1}, \overline{G_1}\right]$ و $\otimes G_2 \in \left[\underline{G_2}, \overline{G_2}\right]$، درجه‌ی امکان خاکستری[۴] $P\{\otimes G_1 \leq \otimes G_2\}$ از رابطه‌ی ۲ به‌دست می‌آید.

$$P(\otimes G_1 \leq \otimes G_2) = \frac{\max(0, L^*) - \max(0, \overline{G_1} - \underline{G_2})}{L^*} \qquad (۲)$$

در این رابطه P درجه امکان خاکستری، و L^* مجموع طول دو عدد خاکستری است. درجه امکان خاکستری برای مقایسه رتبه‌بندی‌ها و اولویت‌بندی گزینه‌ها براساس اعداد خاکستری ارائه شد. تئوری خاکستری با استفاده از درجه امکان خاکستری برای حل مسایل تصمیم‌گیری گروهی در شرایط عدم قطعیت خیلی مناسب است [۹].

روابط موجود بین دو عدد خاکستری عبارتند از:

۱- اگر $\overline{G_1} = \overline{G_2}$ و $\underline{G_1} = \underline{G_2}$ باشد گفته می‌شود دو عدد خاکستری $\otimes G_1$ و $\otimes G_2$ مساوی‌اند. این رابطه به‌صورت $\otimes G_1 = \otimes G_2$ نشان داده می‌شود و در این صورت $P\{\otimes G_1 \leq \otimes G_2\} = 0.5$ است.

۲- اگر $\underline{G_2} > \overline{G_1}$ باشد گفته می‌شود عدد خاکستری $\otimes G_2$ از عدد خاکستری $\otimes G_1$ بزرگ‌تر است. و این رابطه به‌صورت $\otimes G_2 > \otimes G_1$ نشان داده می‌شود. در این صورت $P\{\otimes G_1 \leq \otimes G_2\} = 1$ است.

۳- اگر $\overline{G_2} < \underline{G_1}$ باشد گفته می‌شود عدد خاکستری $\otimes G_2$ از عدد خاکستری $\otimes G_1$ کوچک‌تر است. این رابطه به‌صورت $\otimes G_2 < \otimes G_1$ نشان داده می‌شود. در این صورت $P\{\otimes G_1 \leq \otimes G_2\} = 0$ است.

Archive of SID

www.SID.ir

۴- در صورت وجود یک قسمت مشترک در دو عدد خاکستری، اگر $P\{\otimes G_1 \le \otimes G_2\} < 0.5$ باشد، $\otimes G_2$ از $\otimes G_1$ کوچک‌تر و اگر $P\{\otimes G_1 \le \otimes G_2\} > 0.5$ باشد، $\otimes G_2$ از $\otimes G_1$ بزرگ‌تر است.

مهم‌ترین عملیات ریاضی بر روی دو عدد خاکستری بازه‌ای $\otimes G_1 \in \left[\underline{G_1}, \overline{G_1}\right]$ و $\otimes G_2 \in \left[\underline{G_2}, \overline{G_2}\right]$ به‌صورت روابط ۳ تا ۷ تعریف می‌شود [۹]:

$$\otimes G_1 + \otimes G_2 = \left[\underline{G_1} + \underline{G_2}, \overline{G_1} + \overline{G_2}\right] \quad (۳)$$

$$\otimes G_1 - \otimes G_2 = \left[\underline{G_1} - \underline{G_2}, \overline{G_1} - \overline{G_2}\right] \quad (۴)$$

$$a \times \otimes G_1 = \left[a \times \underline{G_1}, a \times \overline{G_1}\right] \quad (۵)$$

$$\otimes G_1 \div \otimes G_2 = \left[\underline{G_1}, \overline{G_1}\right] \times \left[\frac{1}{\underline{G_2}}, \frac{1}{\overline{G_2}}\right] \quad (۶)$$

$$\otimes G_1 \times \otimes G_2 = \left[\min(\underline{G_1}\,\underline{G_2}, \underline{G_1}\,\overline{G_2}, \overline{G_1}\,\underline{G_2}, \overline{G_1}\,\overline{G_2}), \max(\underline{G_1}\,\underline{G_2}, \underline{G_1}\,\overline{G_2}, \overline{G_1}\,\underline{G_2}, \overline{G_1}\,\overline{G_2})\right] \quad (۷)$$

که در این روابط a عددی ثابت است.

۲-۲-۲- مراحل اجرای روش تئوری خاکستری

مراحل اجرای روش تئوری خاکستری به‌شرح زیر است [۱۰]:

مرحله‌ی یک: تصمیم‌گیرنده نظر خود را در مورد وزن هر معیار با استفاده از متغیرهای کلامی هفت رتبه‌ای بیان می‌کند، این متغیرهای کلامی مطابق با جدول ۱، به یک عدد خاکستری بازه‌ای $\otimes W_j \left[\underline{G}, \overline{G}\right]$ تبدیل می‌شوند.

جدول ۱: مقیاس سنجش برای تعیین وزن معیارها

مقیاس	$\otimes W$
خیلی کم	[۰-۰/۱]
کم	[۰/۱-۰/۳]
تقریباً کم	[۰/۳-۰/۴]
متوسط	[۰/۴-۰/۵]
تقریباً زیاد	[۰/۵-۰/۶]
زیاد	[۰/۶-۰/۹]
خیلی زیاد	[۰/۹-۱]

مرحله‌ی دوم: تصمیم‌گیرنده نظر خود را در مورد وضعیت گزینه‌ها نسبت به هر معیار با استفاده از متغیرهای کلامی که در هفت درجه‌ی خیلی ضعیف تا خیلی خوب تعریف شده‌اند، بیان می‌کند. نتیجه‌ی این مرحله تشکیل یک ماتریس تصمیم خاکستری به‌صورت زیر است که در آن‌ها $\otimes G$ها متغیرهای کلامی هستند که با استفاده از جدول ۲ به اعداد خاکستری تبدیل شده‌اند:

$$D = \begin{bmatrix} \otimes G_{11} & \otimes G_{12} & \dots & \otimes G_{1n} \\ \otimes G_{21} & \otimes G_{22} & \dots & \otimes G_{2n} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ \otimes G_{m1} & \otimes G_{m2} & .... & \otimes G_{mn} \end{bmatrix}$$

در این ماتریس، عناصر ماتریس اعداد خاکستری هستند که به‌صورت $\otimes G_{ij} = \left[\underline{G}_{ij}, \overline{G}_{ij}\right]$ بیان می‌شوند.

جدول ۲: مقیاس ارزیابی گزینه‌ها

مقیاس	$\otimes W$
خیلی ضعیف	[۰-۱]
ضعیف	[۱-۳]
تقریباً ضعیف	[۳-۴]
متوسط	[۴-۵]
تقریباً خوب	[۵-۶]
خوب	[۶-۹]
خیلی خوب	[۹-۱۰]

مرحله‌ی سوم: نرمال‌سازی ماتریس تصمیم خاکستری (D) که در آن شاخص‌های با جنبه‌ی مثبت از روابط ۸ و ۹ محاسبه می‌شوند. در زیر ماتریس تصمیم خاکستری نرمال شده (D^*)، ارائه شده است:

$$D^* = \begin{bmatrix} \otimes G^*_{11} & \otimes G^*_{12} & \dots & \otimes G^*_{1n} \\ \otimes G^*_{21} & \otimes G^*_{22} & \dots & \otimes G^*_{2n} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ \otimes G^*_{m1} & \otimes G^*_{m2} & .... & \otimes G^*_{mn} \end{bmatrix}$$

در این ماتریس، $\otimes G^*_{ij}$ برای شاخص‌های مثبت براساس روابط ۸ و ۹ بیان می‌شود.

$$\otimes G^*_{ij} = \left[\frac{\underline{G}_{ij}}{G^{\max}_j}, \frac{\overline{G}_{ij}}{G^{\max}_j}\right] \quad (۸)$$

$$\otimes G^{\max}_j = \max_{1 \le i \le m} \left\{\underline{G}_{ij}\right\} \quad (۹)$$

برای شاخص‌های با جنبه‌ی منفی، $\otimes G^*_{ij}$ با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ محاسبه می‌شود:

$$\otimes G^*_{ij} = \left[\frac{G^{\min}_j}{\overline{G}_{ij}}, \frac{G^{\min}_j}{\underline{G}_{ij}}\right] \quad (۱۰)$$

$$\otimes G^{\min}_j = \min_{1 \le i \le m} \left\{\underline{G}_{ij}\right\} \quad (۱۱)$$

مرحله‌ی چهارم: در این مرحله ماتریس تصمیم نرمال شده (به‌هنجار) وزن‌دار[۵] ایجاد می‌شود. این ماتریس به‌صورت زیر است:

Archive of SID
www.SID.ir

$$N=\begin{bmatrix} \otimes N_{11} & \otimes N_{12} & \dots & \otimes N_{1n} \\ \otimes N_{21} & \otimes N_{22} & \dots & \otimes N_{2n} \\ . & . & . & . \\ . & . & . & . \\ \otimes N_{m1} & \otimes N_{m2} & .... & \otimes N_{mn} \end{bmatrix}$$

که در آن، N بیانگر ماتریس نرمال‌شده وزن‌دار است و تمامی عناصر این ماتریس از رابطه $\otimes N_{ij}=\otimes G_{ij}^{*}\times\otimes W_j$ محاسبه می‌شوند که بیانگر حاصل‌ضرب عناصر ماتریس تصمیم خاکستری نرمال‌شده و وزن معیارها است.

مرحله‌ی پنجم: برای مقایسه و رتبه‌بندی گزینه‌ها، باید ایده‌آل مثبت که طبق روابط ۱۲ تا ۱۴ تعریف می‌شود، تشکیل شود. در این روابط، m تعداد گزینه‌های ممکن، V^{max} ایده‌آل مثبت و α_{ij} و β_{ij} به ترتیب کران پایین و بالای عناصر ماتریس نرمال‌شده وزن‌دار (N) هستند.

$$V^{\max}=\left\{\otimes G_1^{\max},\otimes G_2^{\max},\dots,\otimes G_n^{\max}\right\} \qquad (۱۲)$$

$$V^{\max}=\left\{\left[\max_{1\le i\le m}\alpha_{i1},\max_{1\le i\le m}\beta_{i1}\right],\left[\max_{1\le i\le m}\alpha_{i2},\max_{1\le i\le m}\beta_{i2}\right],\dots,\left[\max_{1\le i\le m}\alpha_{in},\max_{1\le i\le m}\beta_{in}\right]\right\} \qquad (۱۳)$$

$$\otimes N_{ij}=\left[\alpha_{ij},\beta_{ij}\right] \qquad (۱۴)$$

مرحله‌ی ششم: درجه‌ی امکان خاکستری برای هر گزینه با استفاده از رابطه‌ی ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$P\left\{V_i\le V^{\max}\right\}=\frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}P\left\{\otimes N_{ij}\le\otimes G_j^{\max}\right\} \qquad (۱۵)$$

مرحله‌ی هفتم: در این مرحله‌ی پایانی گزینه‌ها براساس درجه‌ی امکان خاکستری رتبه‌بندی می‌شوند. مطابق با روند اصلی رویکرد تئوری خاکستری، هر چه درجه‌ی امکان خاکستری یک گزینه $P\left\{V_i\le V^{\max}\right\}$ کوچک‌تر باشد، رتبه‌ی آن (V_i) بهتر است.

۳- بحث و نتایج

۳-۱- بررسی معدن مس سونگون

معدن مس سونگون در شمال غربی ایران در ۱۳۰ کیلومتری شمال تبریز در طول جغرافیایی ۴۶ درجه و ۴۳ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۸ درجه و ۴۲ دقیقه شمالی قرار دارد. این معدن با روش استخراج پلکانی در حال استخراج است. حداقل و حداکثر ترازهای ماده‌ی معدنی به ترتیب ۱۶۵۰ تا ۲۳۰۰ متر و شیب توپوگرافی منطقه حدود ۳۰ تا ۴۰ درجه است. ذخیره‌ی معدن ۳۸۴ میلیون تن با متوسط عیار ۰/۶۶ درصد مس برآورد شده است. مجموع باطله‌ی برداشتی از معدن ۶۸۰ میلیون تن برآورد شده و بنابراین نسبت باطله‌برداری حدود ۱/۸۱ به ۱ است. عمر معدن ۲۱ سال پیش‌بینی شده و ارتفاع پله‌های استخراجی معدن ۱۲/۵ متر است. تولید سالیانه این معدن با سه شیفت کاری در هر روز و ۳۶۵ روز در سال، ۱۴ میلیون تن است. سنگ‌شکن این معدن در تراز ۱۹۸۷ متری نصب شده است. طول مسیرهای باربری در پله‌های با تراز ۲۲۶۲/۵ متری به ۴/۵ کیلومتر می‌رسد [۱۳]. در این مقاله فرآیند دو مرحله‌ای انتخاب شاول و کامیون برای بارگیری و باربری ماده‌ی معدنی با استفاده از اطلاعات موجود تشریح شده است. انتخاب شاول مناسب برای معدن با توجه به معیارهای مؤثر در مرحله‌ی اول، و انتخاب کامیون مناسب برای سیستم باربری معدن و بر اساس شاول انتخابی و معیارهای مؤثر دیگر در مرحله‌ی دوم انجام شده است.

۳-۲- گزینه‌ها و معیارهای مؤثر در انتخاب شاول

هزینه‌ی سرمایه‌گذاری شاول‌های هیدرولیکی نسبت به شاول‌های کابلی با ظرفیت مشابه کم‌تر است. همچنین، شاول‌های هیدرولیکی قدرت مانور و سرعت بالاتری دارند و مونتاژ آن‌ها سریع و ساده و در چند روز امکان‌پذیر است [۲]. با توجه به این موارد و سختی متوسط به بالای کانسنگ، در معدن سونگون شاول‌های هیدرولیکی که ارتفاع دسترسی جام آن‌ها با ارتفاع پله‌های معدن سونگون سازگار باشد، درنظر گرفته شده است. مشخصات برخی از این شاول‌های پیشنهادی در جدول ۳ ارایه شده است.

جدول ۳- شاول‌های پیشنهادی برای معدن مس سونگون

شاول	CAT6018 FS	CAT6020B	CAT6040FS	CAT6050FS	CAT6090FS
ظرفیت جام (m^3)	۷/۵	۱۰	۱۲	۱۶	۱۹/۵
نماد	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5

شاول‌هایی که در معادن روباز مورد استفاده قرار می‌گیرد بسیار متنوع‌اند. به‌همین دلیل برای انتخاب مناسب‌ترین شاول از نظر نوع، تعداد، ظرفیت، دسترسی، نحوه‌ی تعمیر و نگهداری و پارامترهای اقتصادی به‌منظور تأمین نیازهای تولید

Archive of SID
www.SID.ir

باید معیارهایی در نظر گرفته شود. معیارهای مختلف و بعضاً متضادی بر انتخاب شاول تاثیر دارند که از جمله‌ی مهم‌ترین این معیارها، می‌توان به دو معیار میزان تولید روزانه و قابلیت دسترسی اشاره کرد. لحاظ کردن معیار میزان تولید روزانه در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب شاول، به انتخاب شاولی با حداقل ظرفیت و کم‌ترین تعداد برای تأمین نیاز تولید روزانه‌ی معدن، منجر می‌شود. از طرف دیگر، لحاظ کردن معیار قابلیت دسترسی در فرآیند تصمیم‌گیری انتخاب شاول، به انتخاب شاول‌هایی با ظرفیت کم‌تر و تعداد بیش‌تر منجر می‌شود؛ زیرا هر چه تعداد شاول‌ها بیش‌تر باشد قابلیت دسترسی و میزان اطمینان از ارسال ماده‌ی معدنی به سنگ‌شکن بیش‌تر می‌شود [۲]. سایر معیارهای تاثیرگذار در انتخاب شاول برای معادن روباز و نحوه‌ی تاثیر آن‌ها (مثبت یا منفی) در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- معیارهای مؤثر بر انتخاب شاول

معیار	میزان تولید روزانه	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه عملیاتی	زمان چرخه‌ی کاری	قابلیت دسترسی	تناسب جام با ابعاد کانسنگ خردشده
نماد	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
تأثیر	+	-	-	-	+	+

مطابق با جدول ۴، با افزایش میزان تولید روزانه (معیار ۱)، قابلیت دسترسی (معیار ۵) و تناسب جام با ابعاد کانسنگ خردشده (معیار ۶)، مطلوبیت انتخاب یک شاول افزایش می‌یابد. بر این اساس، این سه معیار تاثیر مثبتی بر تصمیم‌گیری و انتخاب شاول دارند که به عنوان معیارهای مثبت در روند تصمیم‌گیری موثرند. اما سه معیار دیگر یعنی هزینه سرمایه‌گذاری (معیار ۲)، هزینه عملیاتی (معیار ۳) و زمان چرخه‌ی کاری (معیار ۴) در صورت افزایش منجر به کاهش مطلوبیت انتخاب یک شاول می‌شوند که این حالت بیانگر منفی بودن تاثیر این سه معیار بر روند تصمیم‌گیری است. در این میان، منظور از معیار تناسب جام با ابعاد کانسنگ خردشده به عنوان یک معیار مثبت، متناسب بودن جام شاول با ابعاد متداول کانسنگ خردشده پس از آتشباری به‌نحوی است که میزان پرشوندگی (به‌عنوان یکی از پارامترهای موثر در قابلیت شاول) مطلوب باشد و از بیشینه فضای جام شاول استفاده شود.

۳-۳- گزینه‌ها و معیارهای مؤثر در انتخاب کامیون

استفاده از کامیون‌های با ظرفیت بالا، استخراج معادن با عیار پایین را موجه می‌کند [۲]. در کنار این مسأله، بزرگ‌تر شدن کامیون به معنی کاهش تعداد آن است و کاهش تعداد به معنی پایین آمدن قابلیت اطمینان و قابلیت دسترسی سیستم باربری است. ضمن این‌که کامیون‌های بزرگ‌تر و سنگین‌تر به جاده‌های با عرض بیش‌تر و زیرسازی محکم‌تر نیازمندند و این موضوع نیز هزینه‌ها را افزایش می‌دهد. درنتیجه انتخاب کامیون با ظرفیت مناسب، متناسب با نیاز معدن می‌تواند موجب کاهش هزینه‌ها و افزایش سودآوری معدن شود. کامیون‌های پیشنهادی برای معدن مس سونگون در جدول ۵ ارایه شده است.

جدول ۵- کامیون‌های پیشنهادی برای معدن مس سونگون

کامیون	CAT 775G	CAT 777G	CAT 785C	CAT 785C	CAT 785 D
ظرفیت (تن)	۶۴	۹۰	۱۳۵	۱۳۵	۱۴۳
نماد	A_1	A_2	A_3	A_3	A_4

از مهم‌ترین معیارهای مؤثر بر انتخاب کامیون، تناسب و سازگاری آن با شاول انتخاب شده برای بارگیری است. توصیه می‌شود ظرفیت حجمی بدنه‌ی کامیون طوری انتخاب شود که با سه تا پنج جام شاول پر شود. چرخه‌ی عملیاتی کامیون نیز در انتخاب آن مؤثر است. این چرخه به عوامل گوناگونی از جمله زمان بارگیری، زمان مانور و تخلیه، فاصله‌ی حمل و سرعت کامیون بستگی دارد. کامیونی مناسب است که با در نظر گرفتن فاصله‌ی حمل، بیش‌ترین سرعت و کم‌ترین زمان مانور و تخلیه را داشته باشد. در این صورت تعداد کامیون‌ها و به‌تبع آن هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی کم‌تر می‌شود [۲]. معیارهای مؤثر در انتخاب کامیون و تاثیر آن‌ها در جدول ۶ آمده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۶- معیارهای مؤثر بر انتخاب کامیون

معیار	میزان تولید شاول	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه عملیاتی	چرخه‌ی کامیون	تناسب ظرفیت کامیون با شاول
نماد	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5
تأثیر	+	-	-	-	+

در میان پنج معیار میزان تولید شاول، هزینه سرمایه‌گذاری، هزینه عملیاتی، چرخه‌ی کامیون و تناسب ظرفیت کامیون با شاول، دو معیار میزان تولید شاول و تناسب ظرفیت کامیون با شاول مثبت هستند. بدان مفهوم که با افزایش میزان تولید شاول و تناسب ظرفیت کامیون با شاول، مطلوبیت انتخاب یک کامیون افزایش می‌یابد. اما در ارتباط با سه معیار دیگر می‌توان گفت که با کاهش آن‌ها مطلوبیت انتخاب یک کامیون افزایش می‌یابد.

۳-۴- تعیین کامیون و شاول با رویکرد تئوری خاکستری

به‌منظور تعیین کامیون و شاول مطلوب با استفاده از رویکرد تئوری خاکستری، از نظر ۴ کارشناس متخصص در بخش استخراج معدن استفاده شده است. بر اساس نظر جمعی مشترک طی جلسه‌ای، وزن هر معیار و وزن هر گزینه نسبت به هر معیار براساس رده‌بندی تئوری خاکستری مطابق با جدول‌های ۱ و ۲ به‌صورت عبارت‌های کلامی مشخص شد. وزن‌های تعیین‌شده کارشناسی در ارتباط با معیارهای موثر در انتخاب کامیون و شاول در بخش عبارت کلامی در جدول‌های ۷، ۸، ۱۴ و ۱۵ آورده شده است.

۳-۴-۱- تعیین نوع شاول

برای انتخاب شاول با استفاده از رویکرد تئوری خاکستری ابتدا وزن هر یک از معیارهای مؤثر که براساس نظر کارشناسی به‌صورت متغیرهای کلامی بیان شده است، با توجه به مقیاس ذکر شده در جدول ۱ به اعداد خاکستری تبدیل می‌شود. این معیارها و وزن متناظر آن‌ها به‌صورت اعداد خاکستری در جدول ۷ نشان داده شده است.

جدول ۷- معیارهای مؤثر در انتخاب شاول و وزن کارشناسی هر معیار

معیار	میزان تولید روزانه	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه سوخت	زمان سیکل کاری	قابلیت دسترسی	تناسب جام با ابعاد کانسنگ خردشده
نماد	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
عبارت کلامی	زیاد	متوسط	تقریباً کم	کم	متوسط	زیاد	تقریباً زیاد
مقدار	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۵-۰/۶]

در مرحله‌ی بعد وزن گزینه‌های مختلف نسبت به هر معیار با متغیرهای کلامی بیان و ماتریس تصمیم خاکستری تشکیل می‌شود (جدول ۸). سپس متغیرهای کلامی ماتریس تصمیم خاکستری با استفاده از مقیاس‌های جدول ۲ به اعداد خاکستری تبدیل می‌شود (جدول ۹). در گام بعدی این ماتریس با استفاده از روابط ۸ و ۹ به ماتریس تصمیم به‌هنجار شده که در جدول ۱۰ نشان داده شده است، تبدیل می‌شود. برای سهولت در انجام محاسبات، معیارهای با جنبه‌ی منفی با استفاده از روابط ۱۰ و ۱۱ به جنبه‌ی مثبت تبدیل می‌شوند. برای مثال معیار "هزینه‌ی سرمایه‌گذاری" که معیاری با جنبه‌ی منفی است و کاهش آن مطلوب‌تر است، به‌صورت "مناسب بودن هزینه‌ی سرمایه‌گذاری" بیان می‌شود. نتیجه‌ی این تبدیل، ماتریس تصمیم به‌هنجار وزن‌دار است که در جدول ۱۱ دیده می‌شود. در مرحله‌ی آخر درجه‌ی امکان خاکستری هر یک از گزینه‌ها محاسبه می‌شود. هر چه درجه امکان یک گزینه کم‌تر باشد، گزینه‌ی بهتری است. درجه امکان خاکستری هر یک از گزینه‌ها و رتبه‌بندی آن‌ها در جدول ۱۲ نشان داده شده است.

Archive of SID
www.SID.ir

جدول ۸- وزن هر گزینه نسبت به هر معیار با عبارات کلامی

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_1	نسبتا خوب	خوب	خوب	خوب	نسبتا خوب	خوب	خوب
A_2	ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	خیلی خوب	خوب	خوب	نسبتا خوب
A_3	خیلی خوب	خیلی خوب	خیلی خوب	متوسط	متوسط	نسبتا ضعیف	متوسط
A_4	متوسط	متوسط	متوسط	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف
A_5	خیلی ضعیف	ضعیف	ضعیف	ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	ضعیف

جدول ۹- وزن هر گزینه نسبت به هر معیار مطابق با اعداد خاکستری

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_1	[۵-۶]	[۶-۹]	[۶-۹]	[۶-۹]	[۵-۶]	[۶-۹]	[۶-۹]
A_2	[۱-۳]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۹-۱۰]	[۶-۹]	[۶-۹]	[۵-۶]
A_3	[۹-۱۰]	[۹-۱۰]	[۹-۱۰]	[۴-۵]	[۴-۵]	[۳-۴]	[۴-۵]
A_4	[۴-۵]	[۴-۵]	[۴-۵]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۳-۴]
A_5	[۰-۱]	[۱-۳]	[۱-۳]	[۱-۳]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۱-۳]

جدول ۱۰- ماتریس تصمیم به‌هنجار شده

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_1	[۰/۵-۰/۶]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۵۶-۰/۶۷]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۶۷-۱]
A_2	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۹-۱]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۵۶-۰/۶۷]
A_3	[۰/۹-۱]	[۰/۹-۱]	[۰/۹-۱]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۴۴-۰/۵۶]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۴۴-۰/۵۶]
A_4	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]
A_5	[۰-۰/۱]	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۱۱-۰/۳۳]

جدول ۱۱- ماتریس تصمیم به‌هنجار وزن‌دار

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	C_7
A_1	[۰/۳-۰/۵۴]	[۰/۲۴-۰/۴۵]	[۰/۱۸-۰/۳۶]	[۰/۰۶-۰/۲۷]	[۰/۲۲-۰/۳۳]	[۰/۴-۰/۹]	[۰/۳۳-۰/۶]
A_2	[۰/۰۶-۰/۲۷]	[۰/۱۲-۰/۲]	[۰/۰۹-۰/۱۶]	[۰/۰۹-۰/۳]	[۰/۲۷-۰/۵]	[۰/۴-۰/۹]	[۰/۲۸-۰/۴]
A_3	[۰/۵۴-۰/۹]	[۰/۳۶-۰/۵]	[۰/۲۷-۰/۴]	[۰/۰۴-۰/۱۵]	[۰/۱۸-۰/۲۸]	[۰/۲-۰/۴]	[۰/۲۲-۰/۳۳]
A_4	[۰/۲۴-۰/۵۴]	[۰/۱۶-۰/۲۵]	[۰/۱۲-۰/۲]	[۰/۰۳-۰/۱۲]	[۰/۱۳-۰/۲۲]	[۰/۲-۰/۴]	[۰/۱۷-۰/۲۷]
A_5	[۰-۰/۰۹]	[۰/۰۴-۰/۱۵]	[۰/۰۳-۰/۱۲]	[۰/۰۱-۰/۰۹]	[۰/۱۳-۰/۲۲]	[۰/۲-۰/۴]	[۰/۰۶-۰/۲]

روند محاسباتی برای گزینه اول (A_1) شاول مطابق با مراحل ذکرشده در رویکرد تئوری خاکستری به‌شرح زیر است:

با توجه به رابطه ۹ درایه ۱و۱ از ماتریس تصمیم به‌هنجار تبدیل به [۰/۵-۰/۶] می‌شود که در جدول ۱۰ آورده شده

Archive of SID
www.SID.ir

است. در مرحله بعد مطابق با جدول ۱۱، ماتریس به‌هنجار وزن‌دار به‌صورت زیر به‌دست آمده است:

D*= (۰/۵-۰/۶)*(۰/۶-۰/۹) = (۰/۳-۰/۵۴)

در مرحله بعد V_{max} برای هر گزینه تعیین می‌شود:

V_{max} =
[۰/۵۴-۰/۹][۰/۳۶-۰/۵][۰/۲۷-۰/۴][۰/۰۹-۰/۳]
[۰/۲۷-۰/۵][۰/۴-۰/۹][۰/۳-۰/۶]

درنهایت، درجه امکان خاکستری برای گزینه ۱ به‌صورت زیر تعیین می‌شود که نتیجه آن در جدول ۱۲ آورده شده است.

(۱÷۷)*(۱+((۰/۳۵-(۰/۵۴-۰/۳۶)) ÷ ۰/۳۵=۰/۷۴),
۰/۷۱, ۰/۵۷, ۰/۸,۰/۵, ۰/۵) = ۰/۶۹

جدول ۱۲- رتبه‌بندی گزینه‌های شاول

گزینه	A_1	A_2	A_3	A_4	A_5
درجه امکان	۰/۶۹۰	۰/۷۱۴	۰/۶۸۱	۰/۸۹۱	۰/۹۶۴
رتبه	۲	۳	۱	۴	۵

در این تصمیم‌گیری، گزینه‌ی سوم یعنی شاول ۱۲ مترمکعبی بالاترین اولویت را دارد و انتخاب می‌شود. بعد از انتخاب نوع شاول، تعداد شاول‌های مورد نیاز محاسبه می‌شود.

با فرض انتخاب گزینه‌ی A_3 یعنی شاول با ظرفیت جام ۱۲ مترمکعب، تعداد شاول‌های موردنیاز برای پاسخ به میزان تولید سالیانه ماده‌ی معدنی، از روابط ۱۶ و ۱۷ که پارامترهای آن‌ها در جدول ۱۳ آمده است، به‌دست می‌آید [۲].

$$msph = \frac{3600ABC \times F_S \times F_f \times F_{SK} \times J_e}{C_t} \quad (16)$$

$$N_S = \frac{M}{msph \times whpy} \quad (17)$$

در روابط بالا msph میزان تولید شاول در هر ساعت، و N_S تعداد شاول موردنیاز است.

با توجه به روابط بالا و جدول ۱۳، تعداد شاول موردنیاز برای ظرفیت استخراجی ۱۴ میلیون تن کانسنگ در سال، دو شاول ۱۲ مترمکعبی به‌دست آمد.

جدول ۱۳- پارامترهای موردنیاز برای تعیین تعداد شاول

پارامتر	M	whpy	ABC	F_s	F_f	F_{sk}	J_e	C_t
تعریف پارامتر	تولید سالیانه (میلیون تن)	ساعت کار مفید در سال	ظرفیت واقعی شاول (مترمکعب)	ضریب تورم	ضریب پرشوندگی	ضریب زاویه‌ی گردش شاول	کارآیی عملیات	زمان چرخه‌ی کاری شاول (ثانیه)
مقدار	۱۴	۷۱۱۷/۵	۱۲	۰/۷۵	۰/۸	۰/۹۳	۰/۸	۴۸/۵

۳-۴-۲- تعیین نوع کامیون

معیارهای مؤثر در انتخاب کامیون در معادن روباز و وزن هر معیار در جدول ۱۴ آمده است. وزن معیارها توسط کارشناس بر اساس متغیرهای کلامی از درجه خیلی کم تا خیلی زیاد تعیین و با توجه به مقیاس‌های جدول ۱ به اعداد خاکستری تبدیل شده است.

پس از تشکیل ماتریس تصمیم وزن گزینه‌ها نسبت به هر معیار با استفاده از متغیرهای کلامی، توسط کارشناس تعیین و نتیجه در جدول ۱۵ ارایه شده است. سپس متغیرهای کلامی این جدول براساس مقیاس‌های جدول ۲ به اعداد خاکستری تبدیل و در جدول ۱۶ نشان داده شده است.

جدول ۱۴- معیارهای مؤثر بر انتخاب کامیون و وزن هر معیار

معیار	میزان تولید شاول	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه سوخت	سیکل عملیاتی کامیون	تناسب ظرفیت کامیون با شاول
نماد	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
عبارت کلامی	زیاد	تقریبا زیاد	متوسط	تقریبا کم	زیاد	متوسط
مقدار	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۵-۰/۶]	[۰/۴-۰/۵]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۴-۰/۵]

جدول ۱۵- وزن هر گزینه کامیون نسبت به هر معیار با عبارات کلامی

Archive of SID
www.SID.ir

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	خوب	خیلی خوب	خوب
A_2	خیلی خوب	نسبتا خوب	نسبتا خوب	خوب	خوب	متوسط
A_3	خوب	خوب	خوب	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف	نسبتا ضعیف
A_4	نسبتا خوب	ضعیف	ضعیف	متوسط	ضعیف	ضعیف

جدول ۱۶- وزن هر گزینه کامیون نسبت به هر معیار با اعداد خاکستری

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	[۳-۴]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۶-۹]	[۹-۱۰]	[۶-۹]
A_2	[۹-۱۰]	[۵-۶]	[۵-۶]	[۶-۹]	[۶-۹]	[۴-۵]
A_3	[۶-۹]	[۶-۹]	[۶-۹]	[۳-۴]	[۳-۴]	[۳-۴]
A_4	[۵-۶]	[۱-۳]	[۱-۳]	[۴-۵]	[۱-۳]	[۱-۳]

در گام بعدی با استفاده از روابط ۸ و ۹ ماتریس تصمیم به‌هنجار تشکیل شده است (جدول ۱۷). با تبدیل معیارهای با جنبه‌ی منفی به معیارهای با جنبه‌ی مثبت و ضرب وزن معیارها در ماتریس تصمیم به‌هنجار، ماتریس تصمیم به‌هنجار وزن‌دار مطابق جدول ۱۸ تشکیل شده است.

مرحله‌ی بعد، محاسبه‌ی درجه‌ی امکان خاکستری برای هرکدام از گزینه‌ها است، که نتیجه به‌همراه رتبه‌بندی گزینه‌ها از کم‌ترین به بیش‌ترین درجه امکان خاکستری در جدول ۱۹ دیده می‌شود. با توجه به جدول ۱۹، کامیون ۹۰ تنی به عنوان بهترین گزینه انتخاب شده است. در مرحله‌ی آخر تعداد کامیون موردنیاز برای معدن مشخص می‌شود.

جدول ۱۷- ماتریس تصمیم به‌هنجار شده

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۹-۱]	[۰/۴۴-۰/۵۶]
A_2	[۰/۹-۱]	[۰/۵۶-۰/۶۷]	[۰/۵۶-۰/۶۷]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۵۶-۰/۶۷]
A_3	[۰/۶-۰/۹]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۶۷-۱]	[۰/۳۳-۰/۴۴]	[۰/۳-۰/۴]	[۰/۱۱-۰/۳۳]
A_4	[۰/۵-۰/۶]	[۰/۱۱-۰/۳۳]	[۰/۱۱-۰/۳۳]	[۰/۴۴-۰/۵۶]	[۰/۱-۰/۳]	[۰/۶۷-۱]

جدول ۱۸- ماتریس تصمیم به‌هنجار وزن‌دار

معیار / گزینه	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
A_1	[۰/۱۸-۰/۳۶]	[۰/۱۷-۰/۲۷]	[۰/۱۳-۰/۲۲]	[۰/۲-۰/۴]	[۰/۵۴-۰/۹]	[۰/۲۷-۰/۵]
A_2	[۰/۵۴-۰/۹]	[۰/۲۸-۰/۴]	[۰/۲۲-۰/۳۳]	[۰/۲-۰/۴]	[۰/۳۶-۰/۸۱]	[۰/۱۸-۰/۲۸]
A_3	[۰/۳۶-۰/۸۱]	[۰/۳۳-۰/۶]	[۰/۲۷-۰/۵]	[۰/۱-۰/۱۸]	[۰/۱۸-۰/۳۶]	[۰/۱۳-۰/۲۲]
A_4	[۰/۳-۰/۵۴]	[۰/۰۶-۰/۲]	[۰/۰۴-۰/۱۷]	[۰/۱۳-۰/۲۲]	[۰/۰۶-۰/۲۷]	[۰/۰۴-۰/۱۷]

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۱۹- رتبه‌بندی گزینه‌های کامیون

گزینه	A_1	A_2	A_3	A_4
درجه امکان	۰/۷۵۰	۰/۴۶۹	۰/۶	۰/۸۶۳
رتبه	۳	۱	۲	۴

با فرض انتخاب گزینه‌ی A_2 یعنی کامیون ۹۰ تنی برای حمل کانسنگ استخراجی در معدن سونگون، حداقل تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای هر شاول از روابط ۱۸ تا ۲۰ و داده‌های جدول ۲۰ محاسبه می‌شود. با این روش حداقل تعداد کامیون مورد نیاز برای رسیدن به تولید مورد نیاز، با این فرض که هیچ کامیونی منتظر شاول و هیچ شاولی منتظر کامیون نماند، به‌دست می‌آید. در این‌جا تأخیرهای ثابت و متغیر صفر فرض شده است [۲].

$$TLT = \frac{TC}{BC} \times \frac{C_T}{60} \quad (۱۸)$$

$$TCT = \frac{HD}{V_1} + \frac{HD}{V_2} + TLT + M_T + D_T \quad (۱۹)$$

$$N_T = \frac{TCT}{TLT} \quad (۲۰)$$

در روابط بالا N_T تعداد شاول موردنیاز است.

جدول ۲۰- پارامترهای موردنیاز برای تعیین تعداد کامیون

پارامتر	TC	BC	C_T	HD	V_1	V_2	M_T+D_T	TLT	TCT
تعریف پارامتر	ظرفیت کامیون (تن)	ظرفیت شاول (تن)	زمان چرخه‌ی عملیاتی شاول (ثانیه)	فاصله‌ی حمل (km)	سرعت رفت (km/h)	سرعت برگشت (km/h)	زمان مانور و تخلیه (دقیقه)	زمان باربرداری کامیون (دقیقه)	سیکل کاری کامیون (دقیقه)
مقدار	۹۰	۳۰	۴۸/۵	۴/۵	۳۰	۳۵	۱/۳	۲/۴۵	۲۰/۴۵

با توجه به روابط بالا و جدول ۲۰، حداقل تعداد کامیون موردنیاز برای هر شاول ۹ دستگاه و برای دو شاول موجود برای کل ماده‌ی معدنی ۱۸ دستگاه به‌دست آمد. برای این‌که در صورت توقف کامیون برای تعمیر و نگهداری عملیات باربری با وقفه مواجه نشود، معمولاً ۱۰ درصد کامیون رزرو در نظر گرفته می‌شود، که برای این معدن نیز ۲ کامیون رزرو در نظر گرفته شد.

۴- اعتبارسنجی نتایج

در این بخش به‌منظور اعتبارسنجی نتایج حاصل از رویکرد تئوری خاکستری، مقایسه‌ای با نتایج روش تحلیل سلسله مراتبی فازی به‌عنوان یکی از متداول‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری انجام شده است. بدین منظور، مطابق با مراحل رویکرد تحلیلی سلسله مراتبی فازی، گزینه‌های درنظر گرفته شده از نوع شاول و کامیون مطابق با جدول‌های ۳ و ۵ با توجه به تاثیر معیارها (جدول‌های ۴ و ۶) اولویت‌بندی شده‌اند.

بر این اساس، نخست، برای انتخاب مطلوب‌ترین شاول و کامیون از میان گزینه‌های جدول‌های ۳ و ۵، ماتریس مقایسات زوجی معیار به معیار شاول (مطابق با جدول ۲۱) و کامیون (مطابق با جدول ۲۲) با نظر مشترک چهار کارشناس اشاره‌شده در این تحقیق تشکیل شد. سپس، همان‌طور که در جدول‌های ۲۱ و ۲۲ آمده است، وزن معیارهای شاول و کامیون براساس روند تحلیل سلسله مراتبی تعیین شده است.

در مرحله بعد، مقایسات زوجی گزینه‌ها با گزینه‌ها با توجه به تاثیر هر معیار برای هر دو مورد شاول و کامیون به‌طور مجزا انجام شد و در ادامه تکمیل این مرحله وزن هر گزینه به‌دست آمد. نتایج وزن گزینه‌های حاصل از این مرحله به‌ترتیب برای شاول و کامیون در جدول‌های ۲۳ و ۲۴ آورده شده است. لازم به‌ذکر است پس از بررسی مشخص شد که نرخ ناسازگاری تمامی مقایسات زوجی از حد مبنای ۰/۱ کم‌تر بوده و از این‌رو مقایسات زوجی سازگار بوده است.

Archive of SID

www.SID.ir

جدول ۲۱- ماتریس مقایسات زوجی معیار به معیار و وزن معیارها برای شاول

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	وزن معیار
C1	(۱.۱.۱)	(۱.۲.۴)	(۱.۳.۵)	(۱.۲.۴)	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۱)	۰/۲۱۸
C2	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۱.۱.۱)	(۱.۳.۵)	(۱.۱.۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	۰/۱۳۹
C3	(۰/۲,۰/۳۳,۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۰/۲,۰/۳۳,۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	۰/۱۰۸
C4	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۳)	(۱.۱.۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	۰/۱۳۹
C5	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۲)	(۱.۳.۵)	(۱.۲.۴)	(۱.۱.۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	۰/۲۱۸
C6	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	(۱.۲.۴)	(۱.۱.۳)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	۰/۱۷۸

جدول ۲۲- مقایسات زوجی معیار به معیار و وزن معیارها برای کامیون

	C1	C2	C3	C4	C5	وزن معیار
C1	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۳)	(۱.۲.۴)	(۱.۱.۱)	(۱.۲.۴)	۰/۲۵۱
C2	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۳)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۳)	۰/۲۰۸
C3	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۱.۱.۱)	۰/۱۴۵
C4	(۱.۱.۱)	(۱.۱.۳)	(۱.۲.۴)	(۱.۱.۱)	(۱.۲.۴)	۰/۲۵۱
C5	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۰/۳۳,۱,۱)	(۱.۱.۱)	(۰/۲۵,۰/۵,۱)	(۱.۱.۱)	۰/۱۴۵

جدول ۲۳- وزن گزینه‌ها نسبت به هر معیار و جمع امتیازها گزینه‌ها برای شاول

وزن معیار	C1	C2	C3	C4	C5	C6	جمع امتیازها
	۰/۲۱۸	۰/۱۳۹	۰/۱۰۸	۰/۱۳۹	۰/۲۱۸	۰/۱۷۸	
A1	۰/۳۰۵	۰/۳۱۷	۰/۲۶۸	۰/۲۵۰	۰/۳۱۴	۰/۰۹۹	۰/۲۶۰
A2	۰/۰	۰/۰۸۲	۰/۱۷۶	۰/۲۹۲	۰/۳۱۴	۰/۱۵۵	۰/۱۶۷
A3	۰/۴۸۶	۰/۴۳۱	۰/۳۱۸	۰/۱۹۷	۰/۱۲۴	۰/۲۰۵	۰.۲۹۱
A4	۰/۲۰۹	۰/۱۷۰	۰/۱۷۵	۰/۱۳۱	۰/۱۲۴	۰/۲۵۲	۰/۱۷۸
A5	۰/۰	۰/۰	۰/۰۶۴	۰/۱۳۱	۰/۱۲۴	۰/۲۸۹	۰/۱۰۴

جدول ۲۴- وزن گزینه‌ها نسبت به هر معیار و مجموع امتیاز گزینه‌های کامیون

وزن معیار	C1	C2	C3	C4	C5	جمع امتیازها
	۰/۲۵۱	۰/۲۰۸	۰/۱۴۵	۰/۲۵۱	۰/۱۴۵	
A1	۰/۰۴۰	۰/۱۹۷	۰/۲۵۲	۰/۴۴۶	۰/۴۰۶	۰/۲۵۸
A2	۰/۳۹۲	۰/۳۲۳	۰/۳۱۹	۰/۳۹۸	۰/۲۷۷	۰/۳۵۲
A3	۰/۳۴۹	۰/۳۶۴	۰/۲۷۹	۰/۱۵۳	۰/۲۰۶	۰/۲۷۲
A4	۰/۲۱۹	۰/۱۱۶	۰/۱۵۹	۰/۰۰۳	۰/۱۱۲	۰/۱۱۹

در ادامه روند تحلیل سلسله مراتبی فازی، گزینه‌های شاول و کامیون رتبه‌بندی شده‌اند که نتایج برای شاول و کامیون به‌ترتیب در جدول‌های ۲۵ و ۲۶ آورده شده است.

جدول ۲۵- رتبه‌بندی گزینه‌های شاول

گزینه‌ها	A1	A2	A3	A4	A5
امتیاز	۰/۲۶۰	۰/۱۶۷	۰/۲۹۱	۰/۱۷۸	۰/۱۰۴
رتبه	۲	۴	۱	۳	۵

جدول ۲۶- رتبه‌بندی گزینه‌های کامیون

گزینه‌ها	A1	A2	A3	A4
امتیاز	۰/۲۵۸	۰/۳۵۲	۰/۲۷۲	۰/۱۱۹
رتبه	۳	۱	۲	۴

با مقایسه نتایج حاصل از رویکرد تئوری خاکستری و رویکرد تحلیل سلسله مراتبی فازی مشخص است که در هر دو

Archive of SID
www.SID.ir

رویکرد گزینه A_3 یعنی شاول ۱۲ مترمکعبی به‌عنوان مطلوب‌ترین گزینه تعیین شده است. همچنین، در ارتباط با کامیون‌ها نیز در هر دو رویکرد گزینه A_2 یعنی کامیون ۹۰ تنی برای این معدن مناسب تشخیص داده شده است. مطابقت نتایج رویکرد خاکستری با تحلیل سلسله مراتبی فازی بیانگر تایید نتایج حاصله و اعتبار نتایج رویکرد خاکستری است.

۵- نتیجه‌گیری

انتخاب ماشین‌آلات سیستم حمل و نقل یک معدن که نقشی تعیین‌کننده در سودآوری پروژه‌های معدنی دارد، به عوامل فنی و اقتصادی زیادی بستگی دارد و برای تصمیم‌گیری مناسب لحاظ کردن تأثیر این عوامل ضروری است. لحاظ کردن این عوامل که برخی از آن‌ها کمی و برخی دیگر کیفی‌اند، نیازمند به‌کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است. یکی از این روش‌ها تصمیم‌گیری چند معیاره خاکستری است که رویکردی برای تصمیم‌گیری در شرایط عدم‌قطعیت و روشی مناسب برای لحاظ کردن متغیرهای کلامی و کیفی می‌باشد. در این مقاله با استفاده از این رویکرد در دو مرحله، ماشین‌آلات بارگیری و باربری برای معدن مس سونگون انتخاب شد. نتیجه‌ی کار، انتخاب گزینه‌ی A_3 یعنی شاول ۱۲ مترمکعبی در مرحله‌ی اول، و انتخاب گزینه‌ی A_2 یعنی کامیون ۹۰ تنی در مرحله‌ی دوم بود. پس از انتخاب نوع شاول و کامیون، تعداد دستگاه‌های بارگیری و باربری موردنیاز برای تحقق تولید مورد انتظار در طول عمر معدن نیز محاسبه شد. در ادامه به‌منظور اعتبارسنجی و تعیین صحت نتایج حاصل از رویکرد خاکستری، نتایج آن با نتایج حاصل از رویکرد سلسله مراتبی فازی مقایسه شد که در این رویکرد نیز همان نتایج خاکستری حاصل شد. مطابقت نتایج این دو رویکرد بیانگر اعتبار نتایج حاصل رویکرد خاکستری است.

منابع:

[1] B. A, Kennedy; (1990); "*Surface mining*", 2nd Edition, Society for Mining, Metalurgy and Exploration.

[۲] اصانلو، مرتضی، (۱۳۸۹)، **"کتاب روش‌های استخراج معادن سطحی"**، جلد۲ ، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، دانشگاه امیرکبیر.

[3] A. Basçetin, O. ztas, A. I. Kanli; (2006); "*A computer software using fuzzy logic for equipment selection in mining engineering*", Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy 106, pp. 63-70.

[4] A. Yazdani, SH. Shariati; (2013); *"Selection of material handling equipment system for surface mines by using a combination of fuzzy MCDM models*", International Research Journal of Applied and Basic Sciences 5, pp. 1501-1511.

[5] P. Valli, C.A. Jeyaseher; (2012); "*Genetic algorithm based equipment selection method for construction project using matlab tool*", international journal of optimization in civil engineering 2, pp. 235-246.

[6] A. Bascetin; (2003); "*A decision support system for optimal equipment selection in open pit mining*", Analytical Hierarchy Process 16, pp. 1-16.

[7] A. Aghajani, M. Osanloo, H. Soltanmohammadi; (2008); "*Loading-haulage equipment selection in open pit mines based on fuzzy-TOPSIS method*", Gospodarka Surowcami Mineralnymi, 24, pp. 87-102.

[8] A. Aghajani, M. Osanloo, B. Karimi; (2011); "*Deriving preference order of open pit mines equipment through MADM methods: Application of modified VIKOR method*", Expert Systems with Applications 38, pp. 2550-2256.

[9] G.D. Li, D. Yamaguchi, M. Nagai; (2006); "*A grey-based decision – making approach to the supplier selection problem*", Mathematical and Computer Modeling 46, pp. 573-581.

[10] J.L, Deng; (1989); "*The introduction of grey system*", The Journal of Grey System 1, pp. 1-24.

[11] J.C, Huang; (2011); "*Application of grey system theory in telecare*", Computers in Biology and Medicine 41(5), pp. 302-306.

[۱۲] شرکت بین‌المللی ایتوک ایران، ۱۳۷۸ ، طرح بهره‌برداری معدن مس سونگون.

[13] A.S. Khuman Y. Yang, R. John; (2014); "*A commentary on some of the intrinsic differences between grey systems and fuzzy systems*", 2014 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics (SMC), pp. 2032-2037.

پی‌نوشت

1- AHP
2- Topsis
3- Vikor
4- Grey possibility degree
5- Weighted normalized decision matrix

Archive of SID
www.SID.ir