

## شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره برای مسئله انتخاب ناوگان ترابری، مطالعه موردی

### معدن مس زاغدره

جواد ضیایی<sup>۱\*</sup>، امین منیری<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی دکتری مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی شاهرود، ۲- دکترای تخصصی معدن دانشگاه صنعتی سهند

(دریافت: ۱۳۹۹/۱۱/۰۶، پذیرش: ۱۳۹۹/۱۲/۲۳)

### چکیده

به‌طور کلی عملیات ترابری معادن به عنوان یکی از حلقه‌های اساسی در زنجیره ارزش تولید محصولات معدنی به شمار می‌رود که حدود ۵۰ درصد از هزینه‌های عملیاتی معادن روباز را شامل می‌شود. بنابراین، می‌توان به اهمیت و ضرورت تدوین الگویی جامع برای ارزیابی عملیات ترابری با توجه به شاخص‌های مؤثر بر عملیات پی‌برد. به دلیل وجود عوامل کیفی و کمی زیادی که در مسئله انتخاب تجهیزات ترابری دخیل هستند، تصمیم‌گیری در این خصوص نیازمند داشتن نگرشی جامع و نوین است. در این پژوهش، روش شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره برای مسئله انتخاب ناوگان ترابری پیشنهاد می‌شود که رویکردی ترکیبی و دو مرحله‌ای است. در مرحله اول، یک رویکرد ترکیبی مبتنی بر نظریه‌های مجموعه فازی و راف پیشنهاد می‌شود. در مرحله دوم، یک مدل شبیه‌سازی رویداد گسسته برای سیستم ترابری ساخته می‌شود و ارزیابی‌های مورد نیاز جهت تعیین ابعاد و تعداد بهینه تجهیزات انجام می‌گیرد. معدن مس زاغدره به عنوان مطالعه موردی برای ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی استفاده شد. نتایج تصمیم‌گیری چند شاخصه نشان دادند که سیستم بیل مکانیکی-کامیون بهترین سیستم ترابری برای این معدن است. سپس، شبیه‌سازی رویداد گسسته برای این سیستم ترابری توسعه داده شد و سناریوهای مختلفی با توجه به تغییرات در طول مسیر ترابری و قابلیت دسترسی ماشین‌آلات ارزیابی شد. نتایج نشان دادند که افزایش قابلیت دسترسی تجهیزات از ۸۰ درصد به ۹۰ سبب کاهش ۱ کامیون شده است که این مورد نشان دهنده اهمیت این عامل بر روی کارایی و بهره‌وری عملیات ترابری است.

**کلید واژه‌ها:** شبیه‌سازی، تصمیم‌گیری چند معیاره، ناوگان ترابری، نظریه مجموعه راف، نظریه مجموعه فازی

### ۱. مقدمه

ماشین‌آلات و پیکربندی بهینه ناوگان ترابری به عنوان یکی از فرآیندهای مهم به شمار می‌رود. در حقیقت، تعیین نوع، ابعاد و تعداد بهینه ماشین‌آلات ترابری با توجه به اهداف راهبردی و استراتژیک مطلوب معدن و در نظر گرفتن محدودیت‌ها و چالش‌های موجود در عملیات به‌عنوان یکی از عوامل ضروری در فاز طراحی معادن به شمار می‌روند. مسئله انتخاب تجهیزات فرآیندی روتین و از پیش تعریف شده نیست. دلیل این امر آن است که عوامل کیفی و کمی بسیاری در این امر دخیل هستند که می‌توانند بر فرآیند انتخاب تجهیزات اثرگذار باشند و به این دلیل، سبب پیچیدگی این مسئله می‌شوند. بنابراین، استفاده از روش‌های نوین و کارآمد برای فرموله کردن مسئله از نیازهای اساسی به شمار می‌رود.

### ۱-۱. ضرورت و اهمیت مسئله

به‌منظور دستیابی به اهداف استراتژیک مطلوب و همچنین، عارضه‌یابی و آسیب‌شناسی در صنعت معدنکاری ضروری است تا ارزیابی‌های جامع و کاملی از عملیات مورد نظر انجام گیرد. میزان بهره‌وری و کارایی تجهیزات به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در اجرای فرآیندهای عملیاتی معادن به شمار می‌روند؛ زیرا ناکارآمدی در اجرای فرآیندهای عملیاتی از یک سو سبب افت تولید می‌شود و از سوی دیگر، هزینه‌های سرمایه‌ای و عملیاتی قابل توجهی را به معادن تحمیل می‌کند. انتخاب متناسب

## ۲. پیشینه پژوهش

تاکنون رویکردهای مختلفی برای مسئله انتخاب تجهیزات ناوگان ترابری توسعه داده شد که می‌توان آنها را به چهار دسته تقسیم بندی نمود شامل: روش‌های تحلیلی و برنامه‌ریزی ریاضی، روش‌های شبیه‌سازی، سیستم‌های خبره و روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره، و روش‌های ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی و شبیه‌سازی.

روش‌های تحلیلی و برنامه‌ریزی ریاضی شامل لشگری و همکاران (کمینه‌سازی هزینه واحد عملیات ترابری) [۱۱]، چلبی<sup>۱</sup> (کمینه‌سازی هزینه) [۲]، برت<sup>۲</sup> و همکاران (یک مدل برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط را با کمینه‌سازی هزینه عملیاتی ناوگان ترابری) [۳]، ژانگ<sup>۳</sup> و همکاران [۴] و تا<sup>۴</sup> و همکاران (مدل برنامه ریزی خطی برای کمینه‌سازی تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای شاول) [۵] اشاره کرد. روش‌های شبیه‌سازی شامل سالاما<sup>۵</sup> و همکاران (انتخاب تجهیزات ترابری در معادن زیرزمینی) [۶]، بزرگ‌ابراهیمی و همکاران (شناسایی و ارزیابی برخی از پارامترهای مؤثر بر انتخاب و ابعاد تجهیزات) [۷] اشاره کرد. سیستم‌های خبره شامل کلارک و همکاران<sup>۶</sup> [۸]، کیرمانلی<sup>۷</sup> و همکاران [۹]، حایدر<sup>۸</sup> و همکاران [۱۰] می‌شوند. مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره شامل یزدانی و همکاران (ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری چند معیاره و فازی) [۱۱]، بزاز و همکاران (ترکیب مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه و فازی) [۱۲]، باستین<sup>۹</sup> (فرآیند تحلیل سلسله مراتبی) [۱۳] می‌شود. روش ترکیبی برنامه‌ریزی ریاضی و شبیه‌سازی شامل ترکمنی و همکاران [۱۴] (مرحله اول: برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط، ارائه مرحله دوم: مدل شبیه‌سازی) و فرجی [۱۵] (مرحله اول: مدل برنامه‌ریزی خطی، مرحله دوم: شبیه‌سازی) می‌شوند.

روش‌های پیشین از کاستی‌هایی برخوردارند. به عنوان مثال، امکان مدلسازی ریاضی تمامی پدیده‌ها با روش‌های برنامه‌ریزی ریاضی نیست (و یا اینکه پیچیده است). همچنین، روش‌های شبیه‌سازی نیازمند شناسایی و ارزیابی تمامی سناریوهای ممکن هستند که این مورد هم در مسائل بزرگ‌مقیاس دشوار و غیرممکن است. روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره نیز به تنهایی اطلاعات کیفی را در اختیار محققین قرار می‌دهند. بنابراین، روش‌های ترکیبی بسیار مورد توجه قرار گرفته است.

## ۱-۲. ویژگی‌ها و نوآوری‌های پژوهش

نتایج حاصل‌شده از تحقیقات پیشین [۱۴، ۱۵] نشان دادند که روش‌های ترکیبی از عملکرد بسیار خوبی نسبت به سایر روش‌ها برخوردار هستند و در مسئله انتخاب تجهیزات ترابری بسیار امید بخش ظاهر شدند. به این ترتیب، هدف از این تحقیق آن است که رویکردی ترکیبی برای مسئله انتخاب تجهیزات ترابری ارائه شود که کاستی‌های موجود در روش‌ها و تحقیقات پیشین را پوشش دهد. اولین نوآوری این پژوهش به توسعه روش ترکیبی شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره برای حل مسئله انتخاب ناوگان ترابری باز می‌گردد. دومین نوآوری این پژوهش به کاربرد مدل تصمیم‌گیری چند معیاره با استفاده از رویکرد ترکیبی مبتنی بر نظریه مجموعه راف و نظریه مجموعه فازی باز می‌گردد. این روش از مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های پیشین مانند تحلیل سلسله مراتبی فازی برای حل مسئله انتخاب تجهیزات ترابری برخوردار است. به‌طوری که قابلیت در نظر گرفتن همزمان شاخص‌های کمی و کیفی را با توجه به عدم قطعیت‌های آنها را دارا است. در رویکرد ترکیبی شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره، استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره در مرحله اول، سبب تعیین نوع سیستم ترابری می‌گردد و از این طریق، سبب کاهش تعداد سناریوهای جهت حل مسئله می‌شود و در نهایت، زمان محاسبات به صورت قابل توجهی کاهش می‌یابد.

در این مقاله، بخش اول و دوم مربوط به ضرورت تحقیق و مطالعات پیشین می‌شوند. در بخش سوم، روش‌ها و الگوریتم‌های پیشنهادی معرفی می‌شوند. سپس، یک مطالعه موردی جهت ارزیابی عملکرد الگوریتم‌های پیشنهادی در نظر گرفته می‌شود. در بخش بعد نیز نتایج و بحث تشریح می‌شوند. در نهایت، نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

## ۳. روش تحقیق

با توجه به نوآوری‌ها و دلایل بیان شده در بخش ۱-۲، یک روش ترکیبی دو مرحله‌ای برای مسئله انتخاب ناوگان ترابری پیشنهاد می‌شود و به عنوان روش شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره نامیده می‌شود. الگوریتم پیشنهادی برای انجام کار در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده می‌شود.

<sup>1</sup> Çelebi

<sup>2</sup> Burt

<sup>3</sup> Zhang

<sup>4</sup> Ta

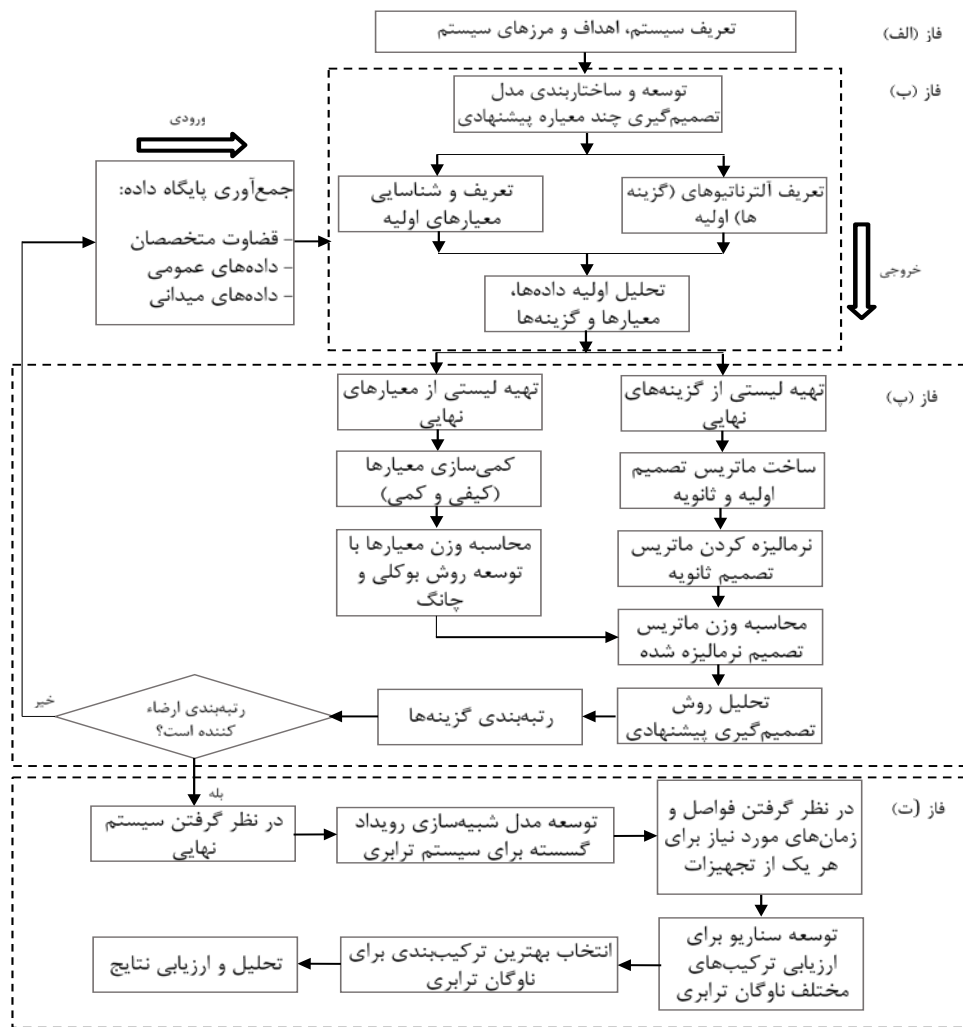
<sup>5</sup> Salama

<sup>6</sup> Clarke

<sup>7</sup> Kirmanli

<sup>8</sup> Haidar

<sup>9</sup> Bascetin



شکل (۱). الگوریتم پیشنهادی برای رویکرد شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره

سیستم را مشخص کرد و مرزهای سیستم را تعیین کرد.

فاز (ب) این الگوریتم به شناسایی و تعیین شاخص‌های اصلی به همراه جمع‌آوری داده‌های مورد نیاز از منابع مختلف باز می‌گردد. در این فاز، ابتدا شاخص‌ها و گزینه‌ها بر اساس نظرات خبرگان و مطالعات پیشین انتخاب می‌شوند. سپس، داده‌های مورد نیاز برای کمی‌سازی شاخص‌ها (کیفی و کمی) با استفاده از منابع مختلف مانند قضاوت متخصصان، داده‌های عمومی و داده‌های میدانی انجام می‌گیرد.

فاز (پ) این الگوریتم مربوط به رویکرد ترکیبی نظریه مجموعه راف و فازی برای حل مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است. این رویکرد از جمله روش‌های نوینی برای حل مسائل تصمیم‌گیری چند معیاره است که در سال ۲۰۱۶ توسعه داده شده است [۱۶]. به منظور تعریف رویکرد پیشنهادی برای حل مسئله انتخاب تجهیزات ترابری، ابتدا مجموعه‌های راف و فازی به اختصار تعریف می‌شوند.

مطابق با شکل (۱)، این الگوریتم از ۴ فاز تشکیل می‌شود. در فاز (الف)، این رویکرد به تعریف سیستم و مرزهای سیستم مورد مطالعه می‌پردازد. در گام بعد، اهداف سیستم مورد مطالعه باید تعیین شوند (مانند دستیابی به میزان تولید برنامه‌ریزی‌شده، تصمیم‌گیری در خصوص انتخاب تجهیزات با توجه به معیارهای مختلف و...). مرزهای سیستم شامل سطحی از اجزای سیستم است که مورد مطالعه قرار می‌گیرند. علاوه بر این، مرز سیستم باید با توجه به تمامی جوانب موجود در مطالعه به وضوح مشخص شود. همچنین، وظایف هر یک از این اجزاء به دقت شناسایی و تعیین شود. به عنوان مثال، سیستم ترابری مرسوم بارکننده-کامیون از چندین جزء تشکیل می‌شود که شامل بارگیری کامیون توسط بارکننده، حمل مواد توسط کامیون، تخلیه در محل سنگ شکن، دامپ باطله یا دامپ کم عیار و در نهایت، بازگشت کامیون خالی به سمت بارکننده می‌شود. در نتیجه، با توجه به اهداف مطالعه می‌توان اجزای مورد نیاز برای

حال، الگوریتم ترکیبی نظریه مجموعه راف و فازی به صورت زیر تعریف می‌شود. مطابق با این رویکرد، فرض کنید که  $A = \{A_1, A_2, \dots, A_m\}$  مجموعه گزینه‌های مربوط به تجهیزات عملیات ترابری هستند و  $C = \{C_1, \dots, C_z, C_{z+1}, \dots, C_n\}$  نیز شاخص‌های مسئله باشند. همچنین،  $z=1, \dots, z$  شامل شاخص‌های کمی و  $n=z+1, \dots, n$  شامل شاخص‌های کیفی مسئله انتخاب تجهیزات ترابری هستند. بردار وزن شاخص‌ها به صورت  $w = \{w_1, w_2, \dots, w_m\}$  که  $w_j \in [0,1]$  بیان می‌شود. گام‌های روش ترکیبی مجموعه راف و فازی به صورت زیر ارائه می‌شوند:

مرحله ۱: این مرحله مربوط به ساخت ماتریس تصمیم اولیه (R1) است. این کار با ارزیابی عملکرد گزینه‌ها نسبت به شاخص‌های کمی و کیفی ایجاد می‌شود:

$$R_1 = \begin{matrix} & C_1 & \dots & C_z & C_{z+1} & \dots & C_n \\ A_1 & r_{11} & \dots & r_{1z} & r_{1(z+1)} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots \\ A_m & r_{m1} & \dots & r_{mz} & r_{m(z+1)} & \dots & r_{mn} \end{matrix}$$

که  $r_{ij} = [r_{ij}^-, r_{ij}^+]$  برای  $z=1, \dots, z$  یک عدد راف است که با استفاده از داده‌های جمع‌آوری شده محاسبه می‌شود. عملکرد گزینه  $A_i$  با توجه به شاخص کیفی  $C_j$  ( $r_{ij}, j = z+1, \dots, n$ ) نیز توسط عبارات کلامی مشخص شده است. این عبارات کلامی در جدول (۱) بیان می‌شوند و تصمیم‌گیرندگان می‌توانند مطابق با این عبارات کلامی به کمی‌سازی شاخص‌های کیفی در مسئله بپردازند.

جدول (۱). عبارات کلامی برای ارزیابی شاخص‌های کیفی (۱۸)

عبارات کلامی	اعداد فازی مثلثی
خیلی ضعیف	(۰،۰،۱)
ضعیف	(۰،۱،۳)
نسبتاً ضعیف	(۱،۳،۵)
متوسط	(۳،۵،۷)
نسبتاً خوب	(۵،۷،۹)
خوب	(۷،۹،۱۰)
خیلی خوب	(۹،۱۰،۱۰)

مرحله ۲: این مرحله مربوط به ساخت ماتریس ثانویه (R2) است. ماتریس ثانویه زمانی ساخته می‌شود که تمامی اعداد فازی در ماتریس تصمیم اولیه به بازه تبدیل شوند. بدین ترتیب،  $r_{ij} = [r_{ij}^-, r_{ij}^+]$  و  $i=1, \dots, m$  و  $j=1, \dots, n$  نشان دهنده حدهای بالا و پایین برای  $i$ -امین گزینه و  $j$ -امین شاخص هستند.

به منظور تبدیل عدد مثلثی فازی  $(a,b,c)$  به صورت یک مقدار بازه‌ای  $[L,U]$  می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد:

$$[L,U] = [(b-a)\alpha + a, -(c-b)\alpha + c] \quad \forall \alpha \in [0,1] \quad (۳)$$

که  $\alpha$  نشان دهنده سطح اعتماد تصمیم‌گیرندگان است.

که  $M$  و  $N$  به ترتیب، اعداد اشیاء در تقریب‌های کمتر و بیشتر از  $q_z$  هستند. همچنین،  $\underline{L}(q_z) = U\{X \in P | Q(X \leq q_z)\}$  و  $\bar{L}(q_z) = U\{X \in P | Q(X \geq q_z)\}$  اختلاف میان حدهای پایین و بالا بیان‌کننده میزان ابهام در یک کلاس است.

مجموعه راف به عنوان تقریبی از مجموعه‌های قطعی به شمار می‌رود. یک عدد راف به عنوان یک عدد بازه‌ای تعریف می‌شود که معمولاً شامل حد پایین (L) و بالا (U) و فاصله مرزی راف<sup>۱</sup> است و فقط به داده‌های اصلی وابسته است. فاصله مرزی ابهام را بیان می‌کند، به طوری که هر چه مقدار این عدد بیشتر باشد، آنگاه ابهام بیشتر است و بالعکس. فرض کنید که P فضای است شامل تمام اشیایی که در یک مجموعه اطلاعاتی ثبت می‌شوند و این اشیاء به  $k$  کلاس طبقه‌بندی می‌شوند ( $Q = \{q_1, q_2, \dots, q_k\}$ ). اگر  $k$  کلاس به فرم  $q_1 < q_2 < \dots < q_k$  مرتب شوند، آنگاه هر کلاس  $q_z$  را در فضای P می‌توان به صورت یک عدد راف  $(RN(q_z) = [LB(q_z), UB(q_z)])$  بیان کرد که هر یک از پارامترهای آن به صورت زیر تعریف می‌شوند [۱۶]:

$$LB(q_z) = \frac{1}{N} \sum Q(X) | X \in \underline{L}(q_z) \quad (۱)$$

$$UB(q_z) = \frac{1}{M} \sum Q(X) | X \in \bar{L}(q_z) \quad (۲)$$

نظریه فازی برای بیان متغیرهای کلامی و مفاهیم تقریبی به صورت کمی ارائه شد. فرض کنید X مجموعه مرجع باشد، آنگاه مجموعه فازی  $\tilde{A}$  در X به صورت مجموعه دو عضوی  $\tilde{A} = \{(x, \mu_{\tilde{A}}(x)) | x \in X\}$  بیان می‌شود که  $\mu_{\tilde{A}}(x)$  بیانگر درجه عضویت  $x$  در مجموعه فازی  $\tilde{A}$  و عددی بین صفر و یک است [۱۷]. یک عدد فازی تعمیمی از یک عدد معمولی است که دارای ویژگی‌های زیر باشد: محدب، نرمال و قطعه قطعه پیوسته باشد. دو عدد معروف فازی شامل اعداد فازی مثلثی و دوزنقه‌ای می‌شوند. به عنوان مثال، عدد فازی  $\tilde{A} = (a, b, c)$  را یک عدد فازی مثلثی می‌نامند که تابع عضویت آن در بازه  $[a,b]$  اکیداً صعودی و برابر با  $\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{x-a}{b-a}$  و در بازه  $[b,c]$  اکیداً نزولی و برابر با  $\mu_{\tilde{A}}(x) = \frac{c-x}{c-b}$  است. در این بازه،  $b$  بعد میانی و  $a$  و  $c$  به ترتیب برابر با بازه‌های چپ و راست در عدد فازی مثلثی می‌شوند. همچنین، عدد فازی  $\tilde{A} = (a, b, c, d)$  را دوزنقه‌ای می‌نامند و به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شود:

$$\mu_{\tilde{A}}(x) = \begin{cases} 0 & , x < a \\ \frac{x-a}{b-a} & , a \leq x \leq b \\ \frac{d-x}{d-c} & , b \leq x \leq d \\ 0 & , x > d \end{cases}$$

<sup>۱</sup> Rough boundary interval

مرحله ۳: نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم ثانویه ( $R'_2$ ):

مقادیر نرمال شده  $r'_{ij} = [r'_{ij}^-, r'_{ij}^+]$  برای هر بازه در ماتریس تصمیم ثانویه مطابق با رابطه زیر محاسبه می‌شوند:

$$r'_{ij}^- = \frac{r'_{ij}^-}{\max_{i=1:m} \{ |r'_{ij}^-|, |r'_{ij}^+| \}} \quad (4)$$

$$r'_{ij}^+ = \frac{r'_{ij}^+}{\max_{i=1:m} \{ |r'_{ij}^-|, |r'_{ij}^+| \}} \quad (5)$$

مرحله ۴: ساخت ماتریس تصمیم نرمال شده (K):

هر یک از درایه‌های ماتریس تصمیم نرمال شده ( $k_{ij} = [k_{ij}^-, k_{ij}^+]$ ) مطابق با رابطه زیر به دست می‌آیند:

$$k_{ij} = w_j \times r'_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n \quad (6)$$

که  $w_j$  نشان دهنده وزن  $j$ -آمین شاخص است که از روش میانگین هندسی بوکلی به دست آمده است [۱۹]. در جدول (۲)، متغیرهای کلامی برای ارزیابی شاخص‌ها توسط تصمیم‌گیرندگان تعیین می‌شود.

جدول (۲). متغیرهای زبانی و اعداد فازی متناظر آنها [۱۶]

عدد فازی	تعریف	مقیاس فازی مثلثی
۱	اهمیت یکسان	(۱،۱،۲)
۳	نسبتاً با اهمیت	(۲،۳،۴)
۵	اهمیت زیاد	(۴،۵،۶)
۷	اهمیت خیلی زیاد	(۶،۷،۸)
۹	شدیداً با اهمیت	(۸،۹،۹)
۸، ۶، ۴، ۲	ارزش بینابین در قضاوت‌ها	(۳،۴،۵)، (۱،۲،۳)، (۷،۸،۹)، (۵،۶،۷)

بدین ترتیب، ماتریس‌های مقایسه زوجی برای هر معیار و زیر معیارها ارائه می‌شود. در روش ماتریس مقایسه زوجی، تصمیم‌گیرنده ترجیحات نسبی خود را نسبت به هر یک از شاخص‌ها و در قالب ماتریس بیان می‌کند. فرآیند تحلیل سلسله مراتبی از جمله روش‌هایی است که از روش مقایسه زوجی استفاده می‌کند و بدین ترتیب، قضاوت و محاسبات را تسهیل می‌کند. هدف اصلی در این روش آن است که میزان اهمیت یک شاخص نسبت به شاخصی دیگر (بدون توجه به سایر شاخص‌ها) سنجیده شود. ماتریس مقایسات زوجی  $D_{n \times n}$ ، ماتریسی است که درایه  $X_{ij}$  آن نمایانگر ارزش  $j$ -آمین مشخصه نسبت به  $i$ -آمین مشخصه است. این ماتریس، ماتریسی مربعی با ابعاد  $n \times n$  است.

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{n1} & \dots & x_{nn} \end{bmatrix} \quad (7)$$

پس از تشکیل ماتریس مقایسه زوجی، باید با استفاده از روش میانگین بوکلی محاسبات را برای محاسبه وزن هر شاخص انجام داد. در روش بوکلی، میانگین هندسی مقادیر مقایسه فازی هر شاخص از طریق معادله زیر تعیین می‌شود. در اینجا،  $\tilde{r}_i$  نشان دهنده مقادیر مثلثی ( $l, m, u$ ) است.

در گام بعد، وزن فازی شاخص  $i$  ( $\tilde{w}_i$ )، به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\tilde{r}_i = \left( \prod_{j=1}^n \tilde{l}_{ij}, \prod_{j=1}^n \tilde{m}_{ij}, \prod_{j=1}^n \tilde{u}_{ij} \right)^{1/n}, \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

در نهایت، مقادیر دیفازی و نرمال می‌شوند. بنابراین، وزن هر یک از شاخص‌ها محاسبه می‌شود.

سپس، نسبت سازگاری<sup>۱</sup> (CR) ماتریس مقایسه زوجی مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد. در حقیقت، نسبت سازگاری به عنوان معیاری برای ارزیابی میزان سازگاری مقایسه زوجی پارامترها است. بدین منظور، نخست هر عدد فازی مثلثی نظیر  $z = (l, m, u)$  در ماتریس مقایسه زوجی به عدد قطعی تبدیل می‌شود  $(l + 4 \times m + u) / 6$ . سپس، شاخص سازگاری<sup>۲</sup> (CI) مطابق رابطه زیر مورد بررسی و ارزیابی قرار می‌گیرد:

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (9)$$

که  $n$  ابعاد ماتریس و  $\lambda_{max}$ : بزرگترین مقدار ویژه ماتریس است.

نسبت سازگاری ماتریس به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (10)$$

که  $RI$  شاخص سازگاری تصادفی است و با استفاده از جدول ارائه شده توسط ساعتی در سال ۱۹۸۸ تعیین شده است. قضاوت تصمیم‌گیرندگان در شرایطی قابل قبول است که  $CR \leq 10\%$  باشد. در غیر اینصورت، فرآیند مقایسه زوجی باید تکرار شود.

مرحله ۵: تعیین حل ایده‌آل مثبت و حل ایده‌آل منفی:

در حالت کلی، عناصر بردار حل ایده‌آل مثبت ( $Z^+$ ) و عناصر بردار حل ایده‌آل منفی ( $Z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-)$ ) به شاخص‌ها وابسته هستند. بدین ترتیب، مقادیر بزرگتر بهتر و مقادیر کوچکتر بهتر هستند. جدول (۳) نحوه ارتباط حل ایده‌آل مثبت ( $Z^+$ ) و حل ایده‌آل منفی ( $Z^-$ ) با توجه به نوع شاخص‌ها تعیین می‌کند.

<sup>1</sup> Consistency Ratio (CR)

<sup>2</sup> Consistency index (CI)

برای هر گزینه  $[RCI_i^L, RCI_i^U]$ :

$$RCI_i^L = \frac{d_i^{N-}}{d_i^{N-} + d_i^{P+}} \quad (15)$$

$$RCI_i^U = \frac{d_i^{N+}}{d_i^{N+} + d_i^{P-}} \quad (16)$$

که  $RCI_i^L$  و  $RCI_i^U$  برابر با حدهای پایین و بالای شاخص نزدیکی نسبی مبتنی بر بازه برای هر گزینه هستند.

مرحله ۸: رتبه‌بندی گزینه‌های انتخاب تجهیزات:

برای رتبه‌بندی مورد نظر، نخست میانگین و شعاع شاخص نزدیکی نسبی مبتنی بر بازه برای هر یک از گزینه‌ها مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$RCI_i^C = \frac{RCI_i^L + RCI_i^U}{2} \quad (17)$$

$$RCI_i^W = \frac{RCI_i^U - RCI_i^L}{2} \quad (18)$$

که  $RCI_i^C$  و  $RCI_i^W$  برابر با میانگین و شعاع بازه  $RCI_i = [RCI_i^L, RCI_i^U]$  هستند. سپس، گزینه‌ها بر اساس تعریف زیر مرتب می‌شوند:

فرض کنید  $A = [aL, aU] = \langle ac, aw \rangle$  و  $B = [bL, bU] = \langle bc, bw \rangle$  آنگاه:

$$A \geq \max B \Leftrightarrow \begin{cases} a_c > b_c & \text{if } a_c \neq b_c \\ a_w \leq b_w & \text{if } a_c = b_c \end{cases} \quad (19)$$

And

$$A > \max B \Leftrightarrow A \geq \max B, \quad A \neq B$$

در نهایت، هر یک از گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند و بهترین گزینه به عنوان سیستم تجهیزات ترابری انتخاب می‌شوند. با این وجود، اگر رتبه‌بندی از نظر فنی رضایت‌بخش نبوده است، مطابق با الگوریتم شکل (۱) مسیری برای تصحیح داده‌ها و انتخاب مجدد سیستم ترابری قرار داده شده است. بدین ترتیب، بهترین سیستم انتخاب و به فاز (ت) که فاز شبیه‌سازی رویداد گسسته است، وارد می‌شود و نتایج سناریوها بررسی می‌شوند.

فاز (ت) این الگوریتم مربوط به شبیه‌سازی رویداد گسسته برای سیستم ترابری انتخابی در فاز (پ) می‌شود. عموماً، شبیه‌سازی رویداد گسسته [۲۰ و ۲۱] به‌عنوان روشی پرکاربرد در مدل‌سازی شبکه‌های صف‌بندی و فرآیندهای مربوط به عملیات مورد استفاده قرار می‌گیرد. اجزای اصلی شبیه‌سازی رویداد گسسته شامل نهادهای متمایز، فعالیت‌ها، زمان‌بندی‌ها، صف‌های انتظار، سناریوهای تصمیم‌گیری در شرایط مختلف می‌شود. علاوه بر این، هر یک از رویدادها را می‌توان به‌صورت مقادیر قطعی و یا تصادفی مدل‌سازی کرد [۲۲].

جدول (۳). بردارهای حل ایده‌آل مثبت و منفی

موارد	شاخص‌های "کوچکتر بهتر"	شاخص‌های "بزرگتر بهتر"
ماتریس وزن نرمال شده	$k_{1j} = [k_{1j}^-, k_{1j}^+]$ $k_{2j} = [k_{2j}^-, k_{2j}^+]$ $\vdots$ $k_{mj} = [k_{mj}^-, k_{mj}^+]$	$k_{1j} = [k_{1j}^-, k_{1j}^+]$ $k_{2j} = [k_{2j}^-, k_{2j}^+]$ $\vdots$ $k_{mj} = [k_{mj}^-, k_{mj}^+]$
بردار حل ایده‌آل مثبت $Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$	$z_j^+ = \text{Min}_i(k_{ij}^-)$	$z_j^+ = \text{Max}_i(k_{ij}^+)$
بردار حل ایده‌آل منفی $Z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-)$	$z_j^- = \text{Max}_i(k_{ij}^+)$	$z_j^- = \text{Min}_i(k_{ij}^-)$

مرحله ۶: محاسبه ماتریس فاصله:

ماتریس فاصله به محاسبه فاصله میان درایه‌های ماتریس وزن نرمال شده حل‌های ایده‌آل مثبت و منفی می‌پردازد.

فرض کنید  $L$  و  $S$  به ترتیب، مجموعه‌های مربوط به شاخص‌های "بزرگتر بهتر" و "کوچکتر بهتر" هستند و  $d(A, B)$  به معنی فاصله بین دو عدد بازه‌ای  $A$  و  $B$  است. فواصل بازه‌ای  $d_{ij}^p = [d_{ij}^{p-}, d_{ij}^{p+}]$  ( $j=1, \dots, n$  و  $i=1, \dots, m$ ) بین بازه‌ها در ماتریس وزن نرمال شده  $(k_{ij} = [k_{ij}^-, k_{ij}^+])$  و مقادیر حل ایده‌آل مثبت  $Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$  و مقادیر حل ایده‌آل منفی  $Z^- = (z_1^-, z_2^-, \dots, z_n^-)$  مطابق زیر محاسبه می‌شوند:

فواصل بازه‌ای  $d_{ij}^p = [d_{ij}^{p-}, d_{ij}^{p+}]$  ( $j=1, \dots, n$  و  $i=1, \dots, m$ ) بین بازه‌ها در ماتریس وزن نرمال شده  $(k_{ij} = [k_{ij}^-, k_{ij}^+])$  و مقادیر حل ایده‌آل مثبت  $Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$  مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$d_i^{p-} = \sqrt{\sum_{j \in S} (k_{ij}^- - z_j^+)^2 + \sum_{j \in L} (k_{ij}^+ - z_j^+)^2} \quad (11)$$

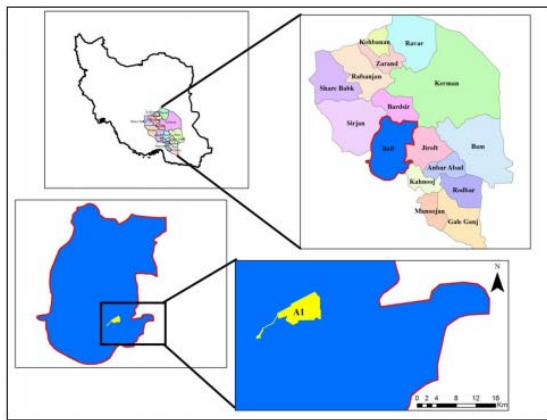
$$d_i^{p+} = \sqrt{\sum_{j \in S} (k_{ij}^+ - z_j^+)^2 + \sum_{j \in L} (k_{ij}^- - z_j^+)^2} \quad (12)$$

فواصل بالا و پایین  $d_{ij}^N = [d_{ij}^{N-}, d_{ij}^{N+}]$  ( $j=1, \dots, n$  و  $i=1, \dots, m$ ) بین بازه‌ها در ماتریس وزن نرمال شده  $(k_{ij} = [k_{ij}^-, k_{ij}^+])$  و حل ایده‌آل منفی  $Z^+ = (z_1^+, z_2^+, \dots, z_n^+)$  مطابق روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$d_i^{N-} = \sqrt{\sum_{j \in S} (k_{ij}^+ - z_j^-)^2 + \sum_{j \in L} (k_{ij}^- - z_j^-)^2} \quad (13)$$

$$d_i^{N+} = \sqrt{\sum_{j \in S} (k_{ij}^- - z_j^-)^2 + \sum_{j \in L} (k_{ij}^+ - z_j^-)^2} \quad (14)$$

مرحله ۷: به دست آوردن شاخص نزدیکی نسبی مبتنی بر بازه



شکل (۲). موقعیت جغرافیایی معدن زاغدره در استان کرمان

میزان ذخیره معدن ۵۹۳۲۴۵۰ تن برآورد شده است. مدت زمان بهره‌برداری از معدن ۱۰ سال تخمین زده شده است. ارتفاع پله های معدن ۵ متر و شیب پله‌های کاری برابر با ۷۰ درجه انتخاب شده است.

#### ۴-۱- شناسایی شاخص‌ها برای انتخاب سیستم ترابری

در این مقاله، شاخص‌ها بر اساس نظرات فنی متخصصان و مطالعات پیشین انتخاب شدند. شکل (۳) این شاخص‌ها را معرفی و طبقه‌بندی می‌کند.



شکل (۳). شاخص‌های انتخابی برای تعیین سیستم ترابری معدن

مطابق با شکل، سه شاخص اصلی برای انتخاب نوع سیستم ترابری در نظر گرفته شده است که شامل شاخص‌های اقتصادی، شرایط عملیاتی و خصوصیات ماشین است. سپس، هر یک از شاخص‌های اصلی به تعدادی زیر شاخص تقسیم‌بندی می‌شوند.

در سیستم مرسوم شاول-کامیون، معمولاً کامیون‌ها به‌عنوان نهاد، بارکننده‌ها به‌عنوان منابع و فعالیت‌ها شامل بارگیری، باربری و تخلیه مواد می‌شوند. سناریوهای تصمیم‌گیری بر پایه انتخاب مقصدهای مختلف مانند دامپ‌های باطله، سنگ‌شکن‌های مواد معدنی و تخصیص به پله‌های کاری و سینه‌کارهای مناسب است. متغیرها و پارامترهای مورد نیاز به‌منظور مدلسازی و فرموله کردن سیستم مرسوم شاول-کامیون از طریق شبیه‌سازی رویداد گسسته شامل نرخ ورود کامیون‌ها پای بارکننده‌ها (زمان بین ورود متوالی دو کامیون و عموماً به‌صورت توابع توزیع احتمالی مشخص می‌گردد)، ظرفیت سیستم (محدودیت مربوط به تعداد کامیون‌های در صف انتظار یا در کل عملیات ترابری)، انتظام صف‌ها (قوانین مربوط به اولویت خروج کامیون‌ها از صف‌های انتظار و معمولاً انتظام صف به‌صورت FIFO است (کامیونی که زودتر به سیستم وارد می‌شود در اولویت سرویس‌دهی قرار دارد)، نرخ سرویس‌دهی بارکننده (این متغیر به‌صورت توابع توزیع احتمالی مشخص می‌گردد) و زمان‌های مربوط به باربری، تخلیه مواد در مقصد (کمی‌سازی با توابع توزیع احتمالی) می‌شوند.

مدت زمان بین دو ورود متوالی کامیون و مدت زمان سرویس‌دهی بارکننده با توابع توزیع احتمالی کمی‌سازی می‌شوند. مقادیر متوسط این دو متغیر به صورت زیر فرمول‌بندی می‌شوند:

$$\bar{\mu} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i}{m} \quad (20)$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^m \lambda_i}{m} \quad (21)$$

که  $\bar{\mu}$  متوسط زمان سرویس‌دهی بارکننده،  $\bar{\lambda}$  مدت زمان بین دو ورود متوالی کامیون،  $\mu_i$  زمان سرویس‌دهی در هر رویداد،  $\lambda_i$  زمان بین دو ورود متوالی کامیون و  $m$  تعداد کل رویدادها هستند.

#### ۴. مطالعه موردی

در این بخش، یک مطالعه موردی جهت ارزیابی عملکرد روش‌ها و مدل‌ها ارائه شده است. بدین منظور، انتخاب تجهیزات ترابری در معدن مس زاغدره مورد بررسی قرار گرفت.

معدن مس زاغدره در استان کرمان، در فاصله ۱۶۰ کیلومتری جنوب شرقی شهرستان بافت و بخش بافت مرکزی و ارزوئیه در مجاورت روستاهای دولت‌آباد، آبدشت و صوغان واقع است. موقعیت جغرافیایی معدن در شکل (۲) مشخص شده است.

جدول (۵). ماتریس مقایسه زوجی برای زیرشاخص‌های اقتصادی

شاخص‌ها	هزینه‌های عملیاتی	هزینه سرمایه‌ای	هزینه نگهداری و تعمیرات
هزینه عملیاتی	(۱،۱)	(۲/۷۱، ۳/۷۲، ۴/۷۳)	(۱/۳۲، ۲، ۳/۰۸)
هزینه سرمایه‌ای	(۰/۳۷، ۰/۳۷، ۰/۳۷)	(۱،۱)	(۰/۲۷، ۰/۳۹، ۰/۵)
هزینه نگهداری و تعمیرات	(۰/۳۲، ۰/۵، ۰/۷۶)	(۲، ۳/۵۹، ۴/۷۳)	(۱،۱)

جدول (۶). ماتریس مقایسه زوجی زیرشاخص‌های خصوصیات ماشین

شاخص‌ها	عمر مفید ماشین	قابلیت دسترسی	ایمنی	پیوستگی عملیات	تحرک
عمر مفید ماشین	(۱، ۱)	(۴، ۵، ۶)	(۰/۵، ۰/۵۸، ۱)	(۲، ۳، ۴)	(۱، ۱/۳، ۲)
قابلیت دسترسی	(۰/۳۳، ۰/۵۲، ۰/۶۸)	(۱، ۱، ۱)	(۰/۱۸، ۰/۳۲، ۰/۴۹)	(۰/۵۴، ۰/۶۷، ۱)	(۰/۳۲، ۰/۴۵، ۰/۶۴)
ایمنی	(۰/۳۳، ۰/۶۴، ۰/۸)	(۳/۴۶، ۴/۵۳، ۵/۵۷)	(۱، ۱، ۱)	(۳/۹۹، ۴/۰۵، ۵/۰۹)	(۳/۹۹، ۴/۰۵، ۵/۰۹)
پیوستگی عملیات معدنکاری	(۰/۳۹، ۰/۴، ۰/۷۱)	(۱، ۱/۵، ۱/۸۶)	(۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۳۳)	(۱، ۱، ۱)	(۱/۳۸، ۱/۷۳، ۲/۲۱)
تحرک	(۰/۳۴، ۰/۴۲، ۰/۷۱)	(۱/۵۷، ۲/۲۱، ۳/۱۶)	(۰/۲، ۰/۳۵، ۰/۳۳)	(۰/۴۵، ۰/۵۸، ۰/۷۸)	(۱، ۱، ۱)

## ۲-۴. شناسایی گزینه‌ها برای انتخاب سیستم ترابری

با توجه به شرایط معدن مس زاغدره چهار سناریو برای سیستم ترابری در نظر گرفته شده است. این ترکیب‌بندی‌ها شامل (الف) سیستم شاول-کامیون، (ب) سیستم لودر-کامیون، (پ) سیستم بیل مکانیکی-کامیون و (ت) سیستم بارکننده-کامیون-سنگ شکن متحرک و نوار نقاله می‌شوند.

## ۳-۴. تشکیل ماتریس مقایسه زوجی برای وزن‌دهی

## به شاخص‌ها

در این بخش، وزن هر یک از شاخص‌ها با استفاده از روش بهبود یافته تحلیل سلسله مراتبی فازی (روش میانگین هندسی بوکلی) محاسبه می‌شود. بدین منظور، پرسشنامه‌ای بر اساس شاخص‌های شناسایی شده آماده گردید و در اختیار متخصصان قرار داده شد تا هر یک از شاخص‌ها با استفاده از ماتریس مقایسات زوجی مقایسه شوند. در این پژوهش، تعداد ۸ متخصص برای ارزیابی ماتریس مقایسات زوجی انتخاب شدند. ماتریس مقایسات زوجی برای هر یک از شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها در جداول (۴) تا (۷) ارائه شده است. جدول (۸) نیز وزن نهایی شاخص‌ها و زیرشاخص‌ها را با استفاده از روابط (۷) و (۸) ارائه می‌کند.

جدول (۴). ماتریس مقایسه زوجی برای شاخص‌های اصلی

شاخص‌ها	اقتصادی	شرایط عملیاتی	خصوصیات ماشین
اقتصادی	(۱،۱)	(۰/۳۴، ۰/۳۲، ۰/۵)	(۱/۸۶، ۲/۹۱، ۳/۹۴)
شرایط عملیاتی	(۲، ۳/۰۸، ۴/۱۲)	(۱،۱)	(۴/۱۲، ۵/۱۴، ۶/۱۶)
خصوصیات ماشین	(۰/۵۴، ۰/۳۴، ۰/۴۵)	(۰/۳۴، ۰/۱۹، ۰/۱۶)	(۱،۱)



جدول (۸). وزن نهایی محاسبه شده برای شاخص‌ها

شاخص‌ها	وزن	وزن نهایی زیرشاخص
اقتصادی	۰/۲۵۶۰	-
شرایط عملیاتی	۰/۶۳۷۶	-
خصوصیات ماشین	۰/۱۰۶۴	-
هزینه سرمایه‌ای	۰/۱۳۲۴	۰/۰۳۳۴
هزینه‌های عملیاتی	۰/۵۵۳۵	۰/۱۴۱۷
هزینه نگهداری و تعمیرات	۰/۳۱۴۰	۰/۰۸۰۴
میزان تولید	۰/۲۱۸۲	۰/۱۳۹۱
ابعاد مواد	۰/۱۵۸۴	۰/۱۰۱۰
شرایط آب و هوایی	۰/۰۷۱۶	۰/۰۴۵۷
فاصله حمل	۰/۰۸۹۲	۰/۰۵۶۹
وضعیت جاده ترابری	۰/۱۰۳۵	۰/۰۶۶۰
کارایی	۰/۱۴۵۲	۰/۰۹۲۶
شرایط زمین	۰/۲۱۳۹	۰/۱۳۶۴
عمر مفید ماشین	۰/۲۹۴۸	۰/۰۳۱۴
قابلیت دسترسی	۰/۰۸۹۶	۰/۰۰۹۵
ایمنی	۰/۳۶۴۲	۰/۰۳۸۸
پیوستگی عملیات معدنکاری	۰/۱۳۲۸	۰/۰۱۴۱
تحرك	۰/۱۱۸۶	۰/۰۱۲۶

سپس، شاخص سازگاری مطابق با جدول (۹) و با کمک روابط (۹) و (۱۰) محاسبه می‌شود. این شاخص نشان دهنده آن است که قضاوت‌های خبرگان سازگار هستند.

جدول (۹). نرخ سازگاری محاسبه شده برای تمامی ماتریس‌های

مقایسه زوجی

ماتریس مقایسه زوجی	نرخ سازگاری
ماتریس شاخص‌های اصلی	۰/۰۶۹۵
ماتریس زیرشاخص‌های اقتصادی	۰/۰۶۵۶
ماتریس زیرشاخص‌های شرایط عملیاتی	۰/۰۹۵۰
ماتریس زیرشاخص‌های خصوصیات ماشین	۰/۰۸۱۲

در گام بعد، به منظور رتبه‌بندی گزینه‌ها باید ماتریس تصمیم اولیه برای شاخص‌های کمی و کیفی و بر اساس چهار سیستم ترابری پیشنهاد شده در این مطالعه، ساخته شود. این ماتریس در جدول (۱۰) ارائه شده است.

جدول (۷). ماتریس مقایسه زوجی زیرشاخص‌های شرایط عملیاتی

شاخص	میزان تولید	ابعاد مواد	شرایط آب و هوایی	فاصله حمل	وضعیت جاده ترابری	کارایی	شرایط زمین
میزان تولید	(۱، ۱)	(۱/۸۶، ۲/۴۵، ۳/۹۹)	(۳/۶۳، ۳/۱۶، ۳/۶۶)	(۲، ۲/۵۹، ۳/۱۳)	(۱/۶۸، ۲/۷۸، ۲/۹۱)	(۰/۹۳، ۱/۳۸، ۱/۶۵)	(۰/۷۶، ۰/۵۴، ۰/۴۷)
ابعاد مواد	(۰/۳۳، ۰/۴۱، ۰/۵۴)	(۱، ۱)	(۱/۸۶، ۲/۴۵، ۳/۹۹)	(۳/۳۱، ۲/۷۸، ۳/۳۱)	(۱/۶۸، ۲/۷۸، ۲/۸۳)	(۰/۸۴، ۱، ۱/۴۱)	(۰/۷۱، ۰/۵۸، ۰/۴۲)
شرایط آب و هوایی	(۰/۳۷، ۰/۳۲، ۰/۳۸)	(۰/۳۳، ۰/۴۱، ۰/۵۴)	(۱، ۱)	(۰/۵۴، ۰/۴۱، ۰/۵۴)	(۰/۵۵، ۰/۵۸، ۰/۸۴)	(۰/۳۲، ۰/۳۹، ۰/۵)	(۰/۴۱، ۰/۴۱، ۰/۸۴)
فاصله حمل	(۰/۳۲، ۰/۳۹، ۰/۵)	(۰/۳، ۰/۳۶، ۰/۴۵)	(۱/۸۶، ۲/۴۵، ۳/۹۹)	(۱، ۱)	(۰/۳۲، ۰/۳۸، ۰/۴۹)	(۰/۸۴، ۱/۱۹، ۱/۵۷)	(۰/۵۴، ۰/۴۱، ۰/۳۳)
وضعیت جاده ترابری	(۰/۳۴، ۰/۴۳، ۰/۵۹)	(۰/۳۵، ۰/۴۴، ۰/۵۹)	(۱/۱۹، ۱/۳۳، ۲)	(۲/۰۶، ۲/۶۳، ۳/۱۶)	(۱، ۱)	(۰/۴۵، ۰/۶۴، ۰/۸۴)	(۰/۴۲، ۰/۳۴، ۰/۳۹)
کارایی	(۰/۱۶، ۰/۷۸، ۱/۰۷)	(۰/۷۸، ۱، ۱/۱۹)	(۰/۷۸، ۱، ۱/۱۹)	(۰/۶۴، ۰/۸۴، ۱/۱۹)	(۱/۱۹، ۱/۵۷، ۱/۳۱)	(۱، ۱)	(۰/۹، ۰/۷۱، ۰/۵۶)
شرایط زمین	(۱/۳۲، ۱/۸۶، ۲/۱۱)	(۱/۴۱، ۱/۷۳، ۲/۳۸)	(۰/۷۸، ۱، ۱/۱۹)	(۱/۸۶، ۲/۴۵، ۳/۹۹)	(۲/۳۸، ۲/۹۴، ۳/۴۶)	(۱/۱۱، ۱/۴۱، ۱/۷۸)	(۱، ۱)

جدول (۱۰). تشکیل ماتریس تصمیم اولیه

بیل مکانیکی - کامیون	بارکننده - کامیون - سنگ شکن متحرک و نوار	لودر - کامیون	شاول - کامیون	
[۳۳.۵۶]	[۱۳۰.۱۷۰]	[۱۸.۳۰]	[۷۶.۱۰۰]	هزینه سرمایه‌های (دلار) $\times 10^4$
[۱۸.۳۰]	[۸۱.۱۰۹]	[۱۲.۳۴]	[۶۰.۷۹]	هزینه نگهداری و تعمیرات (دلار)
[۸۱.۸۸]	[۹۷.۹۸]	[۸۰.۹۵]	[۷۹.۹۰]	قابلیت دسترسی
[۴۳۳.۶۳۳.۸۳۳]	[۱۳۳.۳.۵]	[۶۳۳.۸۳۳.۹۶۷]	[۰.۰.۳۳.۱۶۷]	هزینه‌های عملیاتی
[۵۷.۸۶۷]	[۶۳۳.۸.۹]	[۵.۷.۸۶۷]	[۰.۰۱۶۷.۲۳۳]	میزان تولید
[۳۶۷.۵۶۷.۸۶۷]	[۲۳۳.۴۳۳.۶۳۳]	[۵.۷.۸۶۷]	[۳.۵.۷]	ابعاد مواد
[۳۶۷.۵۶۷.۸۶۷]	[۰.۱۶۷.۲۳۳.۴۳۳]	[۳۶۷.۵۶۷.۸۶۷]	[۵.۷.۸۶۷]	شرایط آب و هوایی
[۴۳۳.۶۳۳.۸۳۳]	[۰.۳۳.۱۶۷.۳۶۷]	[۵.۷.۸۶۷]	[۲.۳۶۷.۵۶۷]	فاصله حمل
[۶۳۳.۸۳۳.۹۶۷]	[۳.۵.۷]	[۳۶۷.۵۶۷.۸۶۷]	[۲.۳۶۷.۵۶۷]	وضعیت جاده ترابری

کارایی	[۰.۰.۳۳.۱۶۷]	[۵۱۶۷.۸۶۷.۹۳۳]	[۲.۳۳.۵]	[۷.۸۶۷.۹۶۷]
شرایط زمین	[۱۳۳.۳.۵]	[۲۳۳.۴۳۳.۶۳۳]	[۱۳۳.۳.۵]	[۵۱۶۷.۸۶۷.۹۰]
عمر مفید ماشین	[۴۳۳.۶۳۳.۸۳۳]	[۵.۷.۸۶۷]	[۴۳۳.۶۳۳.۸۰]	[۵۱۶۷.۸۶۷.۹۳۳]
ایمنی	[۳.۵.۷]	[۵.۷.۸۶۷]	[۴۳۳.۶۳۳.۲۳۳]	[۵.۷.۸۶۷]
پیوستگی عملیات معدنکاری	[۱.۲.۳۶۷]	[۴۳۳.۶۳۳.۸۳۳]	[۶۳۳.۸.۹]	[۵.۷.۸۶۷]
تحرک	[۰.۳۳.۱۳۳.۳]	[۸۳۳.۹۶۷.۱۰]	[۰.۰۱۶۷.۲۳۳]	[۴.۵۳۳.۶۱۶۷]

مطابق با جدول (۱۰)، سه شاخص اول کمی هستند و به صورت اعداد راف بیان شدند و بقیه شاخص‌ها کیفی هستند و با اعداد فازی بیان شدند. هزینه‌های سرمایه‌ای و نگهداری و تعمیرات با استفاده از تجزیه و تحلیل هزینه در محیط نرم افزار تخمین‌گر هزینه تجهیزات اینفوماین به دست آمدند [۲۳]. مقادیر قابلیت دسترسی نیز از بررسی (تعداد ماشین) ماشین آلات به دست آمدند [۲۴]. متغیرهای کیفی نیز با استفاده از نظرات خبرگان به دست آمدند.

بنابراین، رتبه‌بندی چهار گزینه پیشنهادی برای انتخاب نوع سیستم ترابری معدن مس زاغ‌دره با استفاده از رویکرد ترکیبی مجموعه راف و فازی در جدول (۱۱) نشان داده شده است. محاسبات این جدول، با توجه به طی مسیر گام به گام الگوریتم ارائه شده و روابط موجود انجام گرفت و نتایج در این جدول ارائه شد.

با توجه به نتایج جدول، ابعاد بهینه برای جام بیل مکانیکی عبارت از ۱/۸۰ متر مکعب است. این بیل مکانیکی قابلیت پر کردن کامیون را با ۵ مرتبه فرآیند بارگیری دارا است و اهداف تولید را ارضا می‌کند.

### ۵. نتایج و بحث

از آنجا که طول مسیر ترابری تأثیر بسزایی در تعداد کامیون‌های مورد نیاز برای دستیابی به اهداف تولید برنامه‌ریزی شده دارد، در این بخش سناریوهای مختلفی ارزیابی می‌شود و تعداد مورد نیاز کامیون‌ها برای بازه‌های مختلفی از طول مسیر ترابری مشخص می‌شود. این سناریوها در جدول (۱۳) ارائه شدند.

**جدول (۱۳).** ارزیابی خروجی‌های شبیه‌سازی با تغییرات در طول مسیر ترابری

تعریف سناریو	تغییرات	خروجی شبیه‌سازی	
		تولید سالیانه	تعداد بهینه کامیون
	طول مسیر (متر)	(تن)	
سناریو ۱	۲۰۰	۷۳۰۶۴۷	۲
سناریو ۲	۳۰۰	۶۹۳۰۳۶	۲
سناریو ۳	۷۰۰	۸۴۵۹۳۰	۳
سناریو ۴	۹۰۰	۷۸۵۹۵۹	۳
سناریو ۵	۱۵۰۰	۶۴۸۶۳۳	۳
سناریو ۶	۱۸۰۰	۶۰۲۸۱۷	۳
سناریو ۷	۱۹۰۰	۷۶۲۶۵۱	۴
سناریو ۸	۲۳۰۰	۷۴۹۹۹۰	۴
سناریو ۹	۳۰۰۰	۶۰۰۰۲۱	۴

در جدول (۱۳)، تعداد ۹ سناریو تعریف و ارزیابی شده است. این سناریوها با در نظر گرفتن طول‌های متفاوتی از مسیر ترابری مورد ارزیابی قرار گرفتند. به عنوان مثال، تا زمانی که مجموع طول مسیر کمتر از ۶۰۰ متر است، آنگاه تعداد ۲ کامیون برای مسیر ترابری کافی است (سناریو شماره ۲). در حالی که در سناریو شماره ۳ که مجموع این طول ۷۰۰ متر می‌شود، آنگاه تعداد ۳ کامیون برای دستیابی به اهداف برنامه تولید مورد نیاز است.

همچنین، میزان قابلیت دسترسی ماشین‌آلات در سناریوهای مختلف ارزیابی می‌شود (جدول (۱۴)) و با حالت قبل مقایسه می‌گردد.

**جدول (۱۱).** رتبه‌بندی گزینه‌های سیستم ترابری برای معدن مس زاغ

گزینه‌های سیستم ترابری	میانگین	انحراف از معیار
شاول-کامیون	۰/۴۴۷۱	۰/۰۵۷۱
لودر-کامیون	۰/۵۴۲۸	۰/۰۸۲۴
بارکننده-کامیون-سنگ شکن متحرک و نوار نقاله	۰/۴۳۲۷	۰/۱۰۳۹
بیل مکانیکی-کامیون	۰/۶۳۸۰	۰/۰۹۱۱

مطابق با جدول، بهترین سیستم ترابری شامل بیل مکانیکی-کامیون است و پس از آن به ترتیب، لودر-کامیون، شاول-کامیون و بارکننده-کامیون-سنگ شکن متحرک و نوار نقاله هستند.

سپس، شبیه‌سازی سیستم ترابری در نرم افزار تالپک [۲۵] انجام می‌گیرد. ورودی‌های مدل شبیه‌سازی عبارتند از:

تولید برنامه‌ریزی شده: ۵۹۳۲۴۵ تن در سال

تعداد شیفت‌ها در روز: ۲ و مدت زمان: ۱۲ ساعت

تعداد روزهای عملیات در سال: ۳۵۰ روز

کامیون: ۱۵ تنی (کامیون در نظر گرفته شده از طرف شرکت برای این مطالعه موردی)

قابلیت دسترسی بیل مکانیکی: ۸۰ درصد

شیب مسیر: ۱۰ درصد

قابلیت دسترسی کامیون: ۸۰ درصد

حداکثر سرعت کامیون: ۲۰ کیلومتر بر ساعت

کل مسیر شامل کف پله: ۴۰ متر، طول مسیر باربری: ۴۵۰ متر، محدوده دامپ: ۶۰ متر

برای محاسبه ابعاد جام بیل مکانیکی ۴ سناریو در جدول (۱۲) تعریف شده است.

**جدول (۱۲).** تعیین ابعاد جام بارکننده

تعریف سناریو	ابعاد جام (مترمکعب)	خروجی شبیه‌سازی		
		تولید سالیانه (تن)	متوسط تعداد جام برای پر کردن کامیون	تعداد بهینه کامیون
سناریو ۱	۱/۳۰	۵۶۶۲۰۵	۷	۲
سناریو ۲	۱/۵۹	۶۰۱۱۶۳	۵/۹۶	۲
سناریو ۳	۱/۸۰	۶۵۱۹۰۰	۵	۲
سناریو ۴	۲/۰۶	۶۳۵۷۴۳	۴/۷۱	۲

جدول (۱۴). ارزیابی خروجی‌های شبیه‌سازی با تغییرات در قابلیت دسترسی کامیون و بیل مکانیکی

تعریف سناریو	طول مسیر	تغییرات		خروجی شبیه‌سازی	
		قابلیت دسترسی کامیون، قابلیت دسترسی بیل مکانیکی (درصد)	تولید سالیانه (تن)	تعداد بهینه کامیون	تعداد بهینه کامیون
سناریو ۱	۴۵۰	۸۵ - ۸۵	۷۳۵۳۰۷	۲	۲
سناریو ۲	۴۵۰	۹۰ - ۹۰	۸۲۵۲۴۱	۲	۲
سناریو ۳	۷۰۰	۹۰ - ۹۰	۷۲۷۰۳۹	۲	۲
سناریو ۵	۱۱۰۰	۸۵ - ۸۵	۶۶۳۹۵۳	۳	۳

مرحله اول با استفاده از تصمیم‌گیری چند شاخصه تعداد سناریوهای شبیه‌سازی را به حداقل می‌رساند و در مرحله دوم، تعداد بهینه کامیون‌ها با استفاده از مدل شبیه‌سازی تعیین می‌شود. کاربرد چنین رویکردی در مسائل بزرگ مقیاس با تعداد سناریوهای زیاد از اهمیت بسیاری برخوردار است.

به منظور ارزیابی الگوریتم، یک مطالعه موردی (معدن مس زاغدره) در نظر گرفته شد که نتایج حاصل از انتخاب نوع سیستم ترابری عبارت از سیستم بیل مکانیکی-کامیون است. در گام بعد سناریوهای مختلفی با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته توسعه و ارزیابی شده است. در این سناریوها، ابعاد و تعداد بهینه ماشین‌آلات مشخص شدند. ابعاد جام بییل مکانیکی (۱/۸۰ متر مکعب) که با ۵ جام بارگیری کامیون ۱۵ تنی را انجام می‌دهد. نتایج نشان دهنده عملکرد مناسب و منطقی الگوریتم در حل مسئله انتخاب تجهیزات ترابری معادن روباز است.

## ۷. مراجع

1. A. Lashgari, A. Sayadi, and M. Yavari, "Development of a shovel-truck fleet selection for minimizing haulage operation unit cost", *Mining Engineering Journal*, vol. 9, pp. 109-117, 2015 (In Persian).
2. N. E. Çelebi, "An equipment selection and cost analysis system for openpit coal mines," *International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment*, vol. 12, pp. 181-187, 1998.
3. C. Burt, L. Caccetta, and P. Welgama, "Models for Mining Equipment Selection," presented at the International Congress on Modelling and Simulation, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand: Canberra, 2005.
4. L. Zhang and X. Xia, "An integer programming approach for truck-shovel dispatching problem in open-pit mines," *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 1779-1784, 2015.
5. C. H. Ta, A. Ingolfsson, and J. Doucette, "A linear model for surface mining haul truck allocation incorporating shovel idle probabilities," *European Journal of Operational Research*, vol. 231, pp. 770-778, 2013.
6. A. Salama, J. Greberg, and H. Schunnesson, "The use of discrete event simulation for underground haulage mining equipment selection," *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 5, pp. 256-271, 2014.
7. E. Bozorgebrahimi, R. Hall, and G. Blackwell, "Sizing equipment for open pit mining—a review of critical parameters," *Mining Technology*, vol. 112, pp. 171-179, 2003.
8. M. Clarke, B. Denby, and D. Schofield, "Decision making tools for surface mine equipment selection," *Mining Science and Technology*, vol. 10, pp. 323-335, 1990.
9. C. Kirmanli and S. Ercelebi, "An expert system for hydraulic excavator and truck selection in surface mining," *Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 109, pp. 727-738, 2009.
10. A. Haidar, S. Naoum, R. Howes, and J. Tah, "Genetic algorithms application and testing for equipment selection," *Journal of Construction Engineering and Management*, vol. 125, pp. 32-38, 1999.

در این جدول، قابلیت دسترسی کامیون‌ها و بیل مکانیکی تغییر کرده است و اثر این تغییرات برای طول‌های مختلفی از مسیر نشان داده شده است. نتایج این جدول را می‌توان با جدول قبل مقایسه نمود. به عنوان مثال، تعداد بهینه کامیون‌ها در سناریو ۳ از جدول (۱۳) برابر با ۳ است؛ در حالی که تعداد بهینه کامیون‌ها در سناریو ۳ از جدول (۱۴) برابر با ۲ است. بنابراین، بهبود خصوصیات فنی ماشین‌آلات و استفاده از ماشین‌آلات با کیفیت‌تر سبب افزایش قابلیت دسترسی ماشین‌آلات و در نتیجه، کاهش تعداد کامیون‌ها مورد نیاز برای دستیابی به اهداف برنامه تولید شده است. بنابراین، در انتخاب و خرید ماشین‌آلات باید دقت قابل توجهی داشت.

## ۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، رویکرد شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره پیشنهاد شده است. مدل تصمیم‌گیری چند شاخصه پیشنهادی به صورت ترکیبی از نظریه مجموعه راف و نظریه مجموعه فازی است. این رویکرد ترکیبی از مزایای قابل توجهی نسبت به روش‌های پیشین برای حل مسئله انتخاب تجهیزات ترابری برخوردار است. این مزایا شامل در نظر گرفتن همزمان عوامل کیفی و کمی و همچنین، در نظر گرفتن عدم قطعیت‌ها می‌شود. علاوه بر این، تعداد بهینه تجهیزات با استفاده از شبیه‌سازی رویداد گسسته عملیات ترابری تعیین می‌شود. در حقیقت، الگوریتم شبیه‌سازی مبتنی بر تصمیم‌گیری چند معیاره در

18. I. Mahdavi, N. Mahdavi-Amiri, A. Heidarzade, and R. Nourifar, "Designing a model of fuzzy TOPSIS in multiple criteria decision making," *Applied Mathematics and Computation*, vol. 206, pp. 607-617, 2008.
19. C. Kahraman, U. Cebeci, and D. Ruan, "Multi-attribute comparison of catering service companies using fuzzy AHP: The case of Turkey," *International journal of production economics*, vol. 87, pp. 171-184, 2004.
20. G. S. Fishman, *Discrete-event simulation: modeling, programming, and analysis*: Springer Science & Business Media, 2013.
21. T. Altiok and B. Melamed, "Simulation modeling and analysis with Arena," Academic press, 2010.
22. S. Brailsford and N. Hilton, "A comparison of discrete event simulation and system dynamics for modelling health care systems," 2001.
23. InfoMine. "Mine and Mill Equipment Cost Calculator", <http://calc.costs.infomine.com>, 2020.
24. R. Ritter, "Contribution to the capacity determination of semi-mobile in-pit crushing and conveying systems," Technische Universität Bergakademie Freiberg, 2016.
25. RPM Global, "Talpac Software Package", <https://www.rpmglobal.com/software/talpac-hl-desktop/>, 2020.
11. A. Chamzini-Y and S. Shariati, "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*, vol. 5, pp. 1501-1511, 2013.
12. A. A. Bazzazi, M. Osanloo, and B. Karimi, "Optimal open pit mining equipment selection using fuzzy multiple attribute decision making approach," *Archives of Mining Sciences*, vol. 54, pp. 301-320, 2009.
13. A. Başçetin, "An application of the analytic hierarchy process in equipment selection at Orhaneli open pit coal mine," *Mining Technology*, vol. 113, pp. 192-199, 2004.
14. E. Torkamani and H. Askari-Nasab, "A linkage of truck-and-shovel operations to short-term mine plans using discrete-event simulation," *International Journal of Mining and Mineral Engineering*, vol. 6, pp. 97-118, 2015.
15. R. Faraji, "A comparison between linear programming and simulation models for a dispatching system in open pit mines," *École Polytechnique de Montréal*, 2013.
16. H. Shidpour, C. Da Cunha, and A. Bernard, "Group multi-criteria design concept evaluation using combined rough set theory and fuzzy set theory," *Expert Systems with Applications*, vol. 64, pp. 633-644, 2016.
17. M. H. Arman, J. Salehi Sadaghiyani, S. Mojdehi, and A. Nazarli, "Measuring pair wise comparisons matrix inconsistency ratio in fuzzy hierarchical structure", *Industrial Management Studies*, vol. 10, pp. 94-117, 2012 (In Persian).