

یادداشت فنی:

انتخاب سنگ‌شکن اولیه مناسب جهت خردایش مواد معدنی با استفاده از
روش ELECTREمحمد جواد رحیم دل*^۱، محمد کارآموزیان^۲

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی معدن، دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک، دانشگاه صنعتی شاهرود

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک دانشگاه صنعتی شاهرود

(دریافت ۹ اسفند ۹۰، پذیرش اردیبهشت ۹۲)

چکیده

سنگ‌شکنی اولین مرحله خردایش مواد معدنی به جهت آزادسازی کانی‌های باارزش از گانگ است. ظرفیت، ابعاد خوراک و ابعاد محصول، مقاومت فشاری و اندیس سایش ماده معدنی، قابلیت تحرک، قابلیت استفاده در فعالیت‌های زیرزمینی و قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در خردایش مصالح حاوی رس، معیارهای انتخاب سنگ‌شکن هستند. با توجه به تنوع معیارهای موجود در انتخاب یک سنگ‌شکن از میان چندین گزینه داوطلب، انتخاب سنگ‌شکن مناسب یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است. در این تحقیق با در نظر گرفتن معیارهای مذکور و به‌کارگیری روش "تسلط تقریبی"، به انتخاب سنگ‌شکن اولیه مناسب از بین سنگ‌شکن‌های اولیه مرسوم پرداخته شده است. نتایج این بررسی نشان داده است که خردکننده سرعت پایین، ژیراتوری، ضربه‌ای، استوانه‌ای سرعت بالا، خردکننده نواری، فکی با بازوی مضاعف، فکی با بازوی ساده و چکشی به ترتیب گزینه‌های برتر هستند.

کلمات کلیدی

خردایش، سنگ‌شکن اولیه، تصمیم‌گیری چند معیاره، روش ELECTRE.

۱- مقدمه

عملیات خرد کردن مواد از ابعاد اولیه خارج شده از معدن تا به دست آوردن ابعاد مناسب برای ورود به آسیاها توسط سنگ‌شکن صورت می‌گیرد. تعداد مراحل سنگ‌شکنی بسته به ابعاد اولیه ممکن است به ۳ یا ۴ مرحله برسد. با توجه به تنوع معیارهای موجود برای انتخاب هر سنگ‌شکن، انتخاب سنگ‌شکن مناسب بدون استفاده از یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره مشکل است.

با بررسی منابع علمی موجود، انتخاب سنگ‌شکن اولیه مناسب در ایران تنها با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری تحلیلی سلسله‌مراتبی و در کارخانه سیمان شاهرود انجام شده است [۱]. با توجه به حوزه کاربری سنگ‌شکن در این مطالعه موردی (کارخانه سیمان)، گزینه‌های خردکننده سرعت پایین و خردکننده نواری در نظر گرفته نشده‌اند. علاوه بر این، قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در فعالیت‌های زیرزمینی، قابلیت تحرک سنگ‌شکن و قابلیت استفاده از سنگ‌شکن برای خردایش مواد حاوی رس، که سه معیار مهم در انتخاب یک سنگ‌شکن اولیه هستند، نیز در نظر گرفته نشده است.

در این تحقیق، سنگ‌شکن‌های ژیراتوری، فکی با بازوی ساده، فکی با بازوی مضاعف، استوانه‌ای سرعت بالا، خردکننده سرعت پایین، سنگ‌شکن ضربه‌ای، چکشی و خردکننده نواری^۱ به عنوان گزینه‌ها و معیارهای ظرفیت، اندازه خوراک ورودی، اندازه محصول خروجی، اندیس سایش سنگ، مقاومت فشاری ماده معدنی، قابلیت تحرک، قابلیت استفاده در معادن زیرزمینی و قابلیت استفاده از سنگ‌شکن برای مصالح حاوی رس، به عنوان معیارهای ارزیابی در انتخاب سنگ‌شکن اولیه در نظر گرفته شده‌اند، سپس با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند معیاره الکترونیک (Elimination Choice Translating Reality, ELECTRE) به انتخاب سنگ‌شکن اولیه مناسب پرداخته شده است.

۲- روش "تسلط تقریبی"

روش تسلط تقریبی، توسط بنایون^۲ ارائه و سپس توسط نیجکامپ و ری^۳ توسعه داده شده است. در این روش گزینه‌ها به صورت زوجی با یکدیگر مقایسه شده و پس از تعیین گزینه‌های مسلط و مغلوب، گزینه‌های ضعیف و مغلوب حذف می‌شوند [۲]. مراحل تصمیم‌گیری چند معیاره به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از روش تسلط تقریبی، شامل مراحل زیر است:

۲-۱- تشکیل ماتریس تصمیم

در صورتی که مسئله تصمیم‌گیری چندمعیاره، از n معیار و m گزینه تشکیل شده باشد، ماتریس تصمیم به صورت زیر تشکیل می‌شود [۴].

$$D = \begin{bmatrix} x_{11} & \dots & x_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{m1} & \dots & x_{mn} \end{bmatrix}$$

که در آن X_{ij} عملکرد گزینه i ام ($i=1,2,\dots,m$) در ارتباط با معیار j ام ($j=1,2,\dots,n$) است.

۲-۲- بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم

در این مرحله سعی می‌شود معیارها با ابعاد مختلف بدون مقیاس شده و ماتریس R به صورت زیر تشکیل شود [۵].

$$R = \begin{bmatrix} r_{11} & \dots & r_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ r_{m1} & \dots & r_{mn} \end{bmatrix}$$

روش‌های متعددی به منظور بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم وجود دارد. در این تحقیق برای بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم از روش بدون مقیاس کردن فازی استفاده شده است. در این روش جهت بدون مقیاس کردن ماتریس تصمیم برای معیارهای مثبت و منفی، به ترتیب از روابط (۱) و (۲) استفاده می‌شود [۶].

$$r_{ij} = \frac{x_{ij} - \min \{x_{ij}\}}{\max \{x_{ij}\} - \min \{x_{ij}\}} \quad (1)$$

$$r_{ij} = \frac{\max \{x_{ij}\} - x_{ij}}{\max \{x_{ij}\} - \min \{x_{ij}\}} \quad (2)$$

که در این روابط، X_{ij} عملکرد گزینه i ام ($i=1,2,\dots,m$) در ارتباط با معیار j ام ($j=1,2,\dots,n$)، مؤلفه بدون مقیاس شده است.

۲-۳- تعیین ماتریس وزن معیارها

در این مرحله، ماتریس وزن معیارها که یک ماتریس سطری است، با توجه به اهمیت هر یک از معیارها به صورت ماتریس زیر تشکیل می‌شود.

$$W = [w_1, w_2, \dots, w_n]$$

۲-۴- تعیین ماتریس تصمیم بدون مقیاس شده وزن دار

ماتریس بدون مقیاس شده وزن دار، از حاصل ضرب ماتریس تصمیم بدون مقیاس شده در بردار وزن معیارها طبق رابطه (۳) به دست می‌آید.

$$v_{ij} = w_j r_{ij} \quad (3)$$

که در این رابطه، w_j ، درایه‌های ماتریس وزن و v_{ij}

$$\bar{C} = \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{e=1 \\ k \neq e}}^m \frac{C_{ke}}{m(m-1)} \quad (10)$$

هر یک از درایه‌های ماتریس تسلط موافق (F) طبق رابطه (۱۱) محاسبه می‌شود.

$$f_{ke} = \begin{cases} 1 & C_{ke} \leq \bar{C} \\ 0 & C_{ke} > \bar{C} \end{cases} \quad (11)$$

۹-۲- تشکیل ماتریس تسلط مخالف

در محاسبه ماتریس تسلط مخالف (G)، ابتدا آستانه مخالفت طبق رابطه (۱۲) محاسبه و هر یک از درایه‌های این ماتریس (g_{ke}) طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود [۲].

$$\bar{d} = \sum_{k=1}^m \sum_{\substack{e=1 \\ k \neq e}}^m \frac{d_{ke}}{m(m-1)} \quad (12)$$

$$g_{ke} = \begin{cases} 1 & d_{ke} < \bar{d} \\ 0 & d_{ke} \geq \bar{d} \end{cases} \quad (13)$$

۱۰-۲- تشکیل ماتریس تسلط نهایی و تعیین گزینه برتر

ماتریس تسلط نهایی (H) از ضرب تک‌تک درایه‌های ماتریس تسلط موافق در ماتریس تسلط مخالف، طبق رابطه (۱۳) محاسبه می‌شود.

$$h_{ke} = f_{ke} \cdot g_{ke} \quad (13)$$

اولویت‌بندی گزینه‌ها با استفاده از ماتریس تسلط نهایی صورت می‌گیرد. با توجه به ماتریس تسلط نهایی، گزینه‌ای باید انتخاب شود که بیشتر از آن که مغلوب شده باشد، تسلط یافته باشد [۲].

۳- معیارهای انتخاب سنگ‌شکن اولیه

در ادامه به ارائه معیارهای مهم در انتخاب سنگ‌شکن اولیه پرداخته شده است.

۱-۳- مقاومت فشاری

مقاومت فشاری یکی از پارامترهای مکانیکی سنگ است. اندیس کار که در محاسبه نیروی تقریبی لازم در خردایش ماده معدنی مورد استفاده قرار می‌گیرد، با استفاده از این معیار قابل محاسبه است.

۲-۳- اندیس سایش

اندیس سایش ماده معدنی می‌تواند به عنوان یک پارامتر مهم در انتخاب سنگ‌شکن مطرح شود. در جدول ۱ اندیس سایش برای برخی از مواد معدنی آورده شده است.

درایه‌های ماتریس بدون مقیاس شده وزن دار است.

۵-۲- تشکیل مجموعه معیارهای موافق و مخالف

برای هر زوج گزینه k و e ($k, e = 1, 2, \dots, m, k \neq e$) مجموعه معیارهای $j = \{1, 2, \dots, m\}$ به دو زیرمجموعه موافق (S_{ke}) و مخالف (I_{ke}) تقسیم می‌شوند. این دو زیرمجموعه مکمل یکدیگر هستند. مجموعه معیارهای موافق برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط (۴) و (۵) محاسبه می‌شود [۲].

$$S_{ke} = \langle j | v_{kj} \geq v_{ej} \rangle \quad (4)$$

$$I_{ke} = \langle j | v_{kj} \leq v_{ej} \rangle \quad (5)$$

مجموعه معیارهای مخالف، برای معیارهای مثبت و منفی به ترتیب از روابط (۶) و (۷) محاسبه می‌شود [۲].

$$I_{ke} = \langle j | v_{kj} < v_{ej} \rangle = j - S_{ke} \quad (6)$$

$$I_{ke} = \langle j | v_{kj} > v_{ej} \rangle = j - S_{ke} \quad (7)$$

در این روابط v_{ij} ها درایه‌های ماتریس تصمیم بدون مقیاس شده وزن دار هستند که از رابطه (۳) قابل محاسبه است.

۶-۲- تشکیل ماتریس توافق

ماتریس توافق یک ماتریس مربعی است که بعد آن، برابر با تعداد گزینه‌ها است. هر یک از درایه‌های این ماتریس شاخص توافق بین دو گزینه نامیده می‌شود. مقدار شاخص توافق از جمع وزن معیارهایی که در مجموعه موافق قرار دارند، به دست می‌آید. به عبارت دیگر پس از مقایسه گزینه k نسبت به گزینه e ، شاخص توافق (C_{ke}) از جمع وزن معیارهایی که گزینه k نسبت به e برتری دارد، به صورت رابطه (۸) به دست می‌آید [۲].

$$C_{ke} = \sum_{j=S_{ke}} w_j \quad (8)$$

۷-۲- تعیین ماتریس مخالف

ماتریس مخالف یک ماتریس مربعی است که هر یک از درایه‌های آن شاخص عدم توافق بین دو گزینه است. هر یک از درایه‌های این ماتریس (d_{ke}) این ماتریس با توجه به رابطه (۹) محاسبه می‌شود.

$$d_{ke} = \frac{\max_{j \in I_{ke}} |v_{kj} - v_{ej}|}{\max_{j \in J} |v_{kj} - v_{ej}|} \quad (9)$$

۸-۲- تشکیل ماتریس تسلط موافق

در این مرحله یک مقدار معین برای شاخص توافق مشخص می‌شود که آستانه موافقت (\bar{C}) نامیده می‌شود. آستانه موافقت از میانگین‌گیری شاخص‌های توافق (درایه‌های ماتریس توافق) طبق رابطه (۱۰) به دست می‌آید [۲].

جدول ۱: طبقه‌بندی کانی‌ها بر اساس اندیس سایش سنگ‌شکن [۸].

ماده معدنی	اندیس سایش
اکسید آلومینوم	۱۴۰۰۰
ماسه سنگ	۱۳۰۰۰
کوارتز	۱۱۰۰۰
کانی طلا	۸۰۰۰
گرانیت	۷۰۰۰
سنگ آهک با سلیس بالا	۵۰۰۰
کانی تنگستن	۳۰۰۰
هماتیت	۶۰۰
سنگ آهک	۵۰۰
رس	۲۵

۳-۶- قابلیت تحرک سنگ‌شکن

تقریباً تمام سنگ‌شکن‌های اولیه قابلیت استفاده به عنوان سنگ‌شکن متحرک را دارند. سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی ساده نسبت به سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف سبک‌تر بوده و راحت‌تر جابجا می‌شوند. سنگ‌شکن‌های غلتکی با وجود دو غلتک، ماشین‌های بزرگی بوده و استفاده از آن‌ها به خردایش مصالح نرم و ساییده محدود می‌شود. سنگ‌شکن‌های ژیراتوری به دلیل ظرفیت بالا، برای طرح‌های نیمه متحرک^۴ مناسب هستند. خردکننده‌های نواری به عنوان سنگ‌شکن‌های متحرک استفاده می‌شوند، اما کاربرد محدودی دارند [۸].

۳-۷- ظرفیت سنگ‌شکن

ظرفیت، مقدار مواد معدنی است که در یک بازه زمانی مشخص با استفاده از سنگ‌شکن خردایش می‌یابد و به طور معمول بر حسب تن بر ساعت مطرح می‌شود.

۳-۸- انتخاب سنگ‌شکن بر اساس محتوای رس

وجود رس در مواد تحت خردایش، مشکلات فراوانی را در جریان سنگ‌شکنی فراهم می‌آورد. خردایش در سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف و فکی با بازوی ساده تحت مکانیزم ضربه صورت می‌گیرد. بنابراین اگر خوراک این سنگ‌شکن‌ها حاوی مقدار معینی رس باشد، انباشته شدن این مواد به صورت کلوخه موجب کاهش ظرفیت و توقف عملیات خردایش می‌شود. سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای و چکشی نیز به همین دلایل برای مواد حاوی رس مناسب نیستند. در مورد خردکننده نواری نیز وجود رس، موجب ایجاد کلوخه در فضای خالی بین غلتک‌های گردان می‌شود. خردکننده سرعت پایین، تنها سنگ‌شکن اولیه‌ای هستند که برای مصالح حاوی رس مناسب است. هر دو محورهای این سنگ‌شکن با سرعت پایین در خلاف جهت یکدیگر حرکت کرده و هیچ انباشتی از رس را در فضای خالی بین خود به وجود نمی‌آورد [۸].

۴- انتخاب سنگ‌شکن اولیه

۴-۱- تشکیل ماتریس تصمیم

در این تحقیق، سنگ‌شکن‌های اولیه ژیراتوری، فکی با بازوی ساده، فکی با بازوی مضاعف، استوانه‌ای سرعت بالا، خردکننده سرعت پایین، سنگ‌شکن ضربه‌ای، چکشی و خردکننده نواری به عنوان گزینه‌ها و مقاومت فشاری ماده معدنی (C₁)، اندیس سایش ماده معدنی (C₂)، اندازه خوراک

۳-۳- اندازه خوراک

"اندازه خوراک" و یا "حداکثر اندازه"، یک اصطلاح متداول است که اندازه دهانه سرندي است که ۱۰۰٪ مواد عبوری از دهانه سنگ‌شکن اطلاق می‌شود. اندازه خوراک یک عامل مهم در انتخاب سنگ‌شکن است [۳].

۳-۴- اندازه محصول

اندازه محصول خروجی، به اندازه ۸۰ درصد از محصول خروجی سنگ‌شکن اطلاق می‌گردد و یکی از معیارهای مهم در انتخاب سنگ‌شکن است.

۳-۵- قابلیت استفاده در فعالیتهای زیرزمینی

سنگ‌شکن‌هایی که برای فعالیتهای زیرزمینی استفاده می‌شوند، بایستی علاوه بر قابلیت خردایش مواد سخت و مرطوب، با محدودیت‌های فضایی تطبیق داشته باشند. سنگ‌شکن‌های ضربه‌ای و چکشی در خردایش مواد فلزی کارایی مطلوبی ندارند. سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی مضاعف و بازوی ساده در ظرفیت‌های بالا، گزینه‌های مناسبی هستند. سنگ‌شکن‌های ژیراتوری نسبت به سنگ‌شکن‌های فکی ظرفیت بیشتری داشته اما وجود مصالح فلزی عملیات خردایش این نوع سنگ‌شکن‌ها را مختل می‌سازد. با توجه به قابلیت استفاده از خردکننده نواری در خردایش مصالح مرطوب و فلزی، در معادن زیرزمینی زیادی مورد استفاده قرار گرفته است. خردکننده سرعت پایین، با توجه به قابلیت استفاده برای مصالح مرطوب و حاوی رس، گزینه مناسبی در فعالیتهای زیرزمینی است.

جدول ۲ تشکیل شده است. با بهره‌گیری از روش هوانگ و یون (جدول ۳)، معیارهای کیفی به مقادیر کمی تبدیل و در جدول ۴ آورده شده است. در نهایت با استفاده از روابط (۱) و (۲)، معیارها با ابعاد مختلف بدون مقیاس شده و در جدول ۵ آورده شده است.

(C₃)، اندازه محصول خروجی (C₄)، قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در معادن زیرزمینی (C₅)، قابلیت تحرک سنگ‌شکن (C₆)، ظرفیت سنگ‌شکن (C₇) و قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در خردایش مصالح حاوی رس (C₈)، به عنوان معیارهای مسئله در نظر گرفته شده و ماتریس تصمیم به صورت

جدول ۲: ماتریس تصمیم گزینه‌ها و معیارها [۸].

سنگ شکن	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
ژیراتوری	۶۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰	۲۲۵	خوب	خوب	۱۲۰۰۰	ضعیف
فکی با بازوی ساده	۶۰۰	۳۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	خوب	تا حدودی خوب	۱۵۰۰	ضعیف
فکی با بازوی مضاعف	۶۰۰	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	خوب	خوب	۱۵۰۰	متوسط
استوانه‌ای سرعت بالا	۱۰۰	۴۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	متوسط	تا حدودی خوب	۳۰۰۰	ضعیف
خردکننده سرعت پایین	۲۰۰	۸۰۰	۱۸۰۰	۲۲۵	خیلی خوب	خیلی خوب	۱۲۰۰۰	خیلی خوب
ضربه‌ای	۲۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۱۷۵	غیرقابل استفاده	خوب	۲۸۰۰	غیرقابل استفاده
چکشی	۲۰۰	۴۰۰	۲۵۰۰	۱۷۵	غیرقابل استفاده	خوب	۲۸۰۰	غیرقابل استفاده
خردکننده نواری	۲۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۳۲۵	خیلی خوب	خیلی خوب	۲۶۰۰	متوسط

جدول ۳: تبدیل معیارهای کمی به مقادیر کیفی [۹].

مقدار کیفی	غیرقابل استفاده	ضعیف	متوسط	تا حدودی خوب	خوب	خیلی خوب
معادل کمی	۰	۱	۳	۵	۷	۹

جدول ۴: ماتریس تصمیم با توجه به مقادیر کمی

سنگ شکن	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
ژیراتوری	۶۰۰	۳۰۰۰۰	۱۵۰۰	۲۲۵	۷	۷	۱۲۰۰۰	۱
فکی با بازوی ساده	۶۰۰	۳۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	۷	۵	۱۵۰۰	۱
فکی با بازوی مضاعف	۲۰۰	۸۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	۷	۷	۱۵۰۰	۳
استوانه‌ای سرعت بالا	۱۰۰	۴۰۰	۱۵۰۰	۲۰۰	۳	۵	۳۰۰۰	۱
خردکننده سرعت پایین	۲۰۰	۸۰۰	۱۸۰۰	۲۲۵	۹	۹	۱۲۰۰۰	۹
ضربه‌ای	۲۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۱۷۵	۰	۷	۲۸۰۰	۰
چکشی	۲۰۰	۴۰۰	۲۵۰۰	۱۷۵	۰	۷	۲۸۰۰	۰
خردکننده نواری	۲۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۳۲۵	۹	۹	۲۶۰۰	۳

جدول ۵: ماتریس تصمیم بدون مقیاس شده

سنگ شکن	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
ژیراتوری	۱	۰/۹۳۷	۰	۰/۶۶۷	۰/۷۷۸	۰/۵۰۰	۱	۰/۱۱۱
فکی با بازوی ساده	۱	۱	۰	۰/۸۳۳	۰/۷۷۸	۰/۲۵۰	۰	۰/۱۱۱
فکی با بازوی مضاعف	۰/۲۰۰	۰/۰۱۶	۰	۰/۸۳۳	۰/۷۷۸	۱/۷۵۰	۰	۰/۳۳۳
استوانه‌ای سرعت بالا	۰	۰/۰۰۳	۰	۰/۸۳۳	۰/۳۳۳	۱/۱۲۵	۰/۱۴۳	۰/۱۱۱
خردکننده سرعت پایین	۰/۲۰۰	۰/۰۱۶	۰/۳۰۰	۰/۶۶۷	۱	۲/۱۸۸	۱	۱
ضربه‌ای	۰/۲۰۰	۰	۰	۱	۰	۱/۳۱۳	۰/۱۲۴	۱
چکشی	۰/۲۰۰	۰/۰۰۳	۱	۱	۰	۱/۴۶۹	۰/۱۲۴	۱
خردکننده نواری	۰/۲۰۰	۰	۰	۰	۱	۱/۷۰۳	۰/۱۰۵	۰/۳۳۳

۴-۲- تعیین وزن معیارها و تشکیل ماتریس تصمیم بدون

مقیاس شده وزن دار

تعیین وزن معیارها با تهیه پرسش‌نامه صورت گرفته است. هر یک از این پرسشنامه‌ها، با همکاری متخصصان و کارکنان واحد خردایش معدن گل‌گهر تکمیل شده است. در این پرسشنامه‌ها، اهمیت هر یک از معیارها در انتخاب سنگ‌شکن اولیه به صورت، اهمیت مطلق، اهمیت خیلی قوی، اهمیت قوی، اهمیت ضعیف و بدون اهمیت مورد پرسش قرار گرفته است. هر یک از معیارها دو به دو با یکدیگر مقایسه شده و از مقایسه آن‌ها امتیازات عددی بر اساس جدول ۶ محاسبه شده و ماتریس مقایسه زوجی تشکیل شده است (جدول ۷). وزن هر یک از معیارها با بهره‌گیری از روش میانگین هندسی

محاسبه شده است. در این روش، میانگین هندسی عناصر هر سطر از ماتریس مقایسه زوجی محاسبه می‌شود. در نهایت، با بدون مقیاس کرده بردار حاصل، ضریب اهمیت هر یک از معیارها محاسبه و در جدول ۸ آورده شده است. پس از تعیین بردار وزن معیارها، ماتریس بدون مقیاس شده وزن دار از رابطه (۳) محاسبه و در جدول ۹ آورده شده است.

۴-۳- تشکیل ماتریس توافق و ماتریس مخالفت

در این مرحله، پس از تشکیل مجموعه معیارهای موافق و مخالف با استفاده از روابط (۴) تا (۷) و با بهره‌گیری از روابط (۸) و (۹)، هر یک از ماتریس‌های توافق و مخالفت محاسبه و به ترتیب در جدول‌های ۱۰ و ۱۱ آورده شده است.

جدول ۶: تخصیص امتیازات عددی مربوط به مقایسه زوجی [۹].

اهمیت نسبی معیارها	اهمیت مطلق	اهمیت خیلی قوی	اهمیت قوی	اهمیت ضعیف	بدون اهمیت	ترجیحات بین فواصل
امتیاز عددی	۹	۷	۵	۶	۱	۸، ۶، ۴، ۲

جدول ۷: ماتریس مقایسه زوجی بین معیارها

	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
C ₁	۱	۱/۰۵۹	۰/۷۲۰	۱/۲۸۶	۱/۶۳۶	۱/۶۳۶	۰/۴۸۶	۱
C ₂	۰/۹۴۴	۱	۰/۶۸۰	۱/۲۱۴	۱/۵۴۵	۱/۵۴۵	۰/۴۵۹	۰/۹۴۴
C ₃	۱/۳۸۹	۱/۴۷۱	۱	۱/۷۸۶	۲/۲۷۳	۲/۲۷۳	۰/۶۷۶	۱/۳۸۹
C ₄	۰/۷۷۸	۰/۸۲۴	۰/۵۶۰	۱	۱/۲۷۳	۱/۲۷۳	۰/۳۷۸	۰/۷۷۸
C ₅	۰/۶۱۱	۰/۶۴۷	۰/۴۴۰	۰/۷۸۶	۱	۱	۰/۲۹۷	۰/۶۱۱
C ₆	۰/۶۱۱	۰/۶۴۷	۰/۴۴۰	۰/۷۸۶	۱	۱	۰/۲۹۷	۰/۶۱۱
C ₇	۲/۰۵۶	۲/۱۷۶	۱/۴۸۰	۲/۶۴۳	۳/۳۶۴	۳/۳۶۴	۱	۲/۰۵۶
C ₈	۱	۱/۰۵۹	۰/۷۲۰	۱/۲۸۶	۱/۶۳۶	۱/۶۳۶	۰/۴۸۶	۱

جدول ۸: ضریب اهمیت معیارها

معیار	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
ضریب اهمیت	۰/۱۱۹	۰/۱۱۲	۰/۱۶۶	۰/۰۹۳	۰/۰۷۳	۰/۰۷۳	۰/۲۴۵	۰/۱۱۹

جدول ۹: ماتریس بدون مقیاس شده وزن دار

سنگ‌شکن	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅	C ₆	C ₇	C ₈
ژیراتوری	۰/۱۱۹	۰/۱۰۵	۰	۰/۰۶۲	۰/۰۵۷	۰/۰۳۷	۰/۲۴۵	۰/۰۱۳
فکی با بازوی ساده	۰/۱۱۹	۰/۱۱۲	۰	۰/۰۷۸	۰/۰۵۷	۰/۰۱۸	۰	۰/۰۱۳
فکی با بازوی مضاعف	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰	۰/۰۷۸	۰/۰۵۷	۰/۱۲۸	۰	۰/۰۴۰
استوانه‌ای سرعت بالا	۰	۰	۰	۰/۰۷۸	۰/۰۲۴	۰/۰۸۲	۰/۰۳۵	۰/۰۱۳
خردکننده سرعت پایین	۰/۰۲۴	۰/۰۰۲	۰/۰۵۰	۰/۰۶۲	۰/۰۷۳	۰/۱۶۰	۰/۲۴۵	۰/۱۱۹
ضربه‌ای	۰/۰۲۴	۰	۰	۰/۰۹۳	۰	۰/۰۹۶	۰/۰۳۰	۰
چکشی	۰/۰۲۴	۰	۰/۱۶۶	۰/۰۹۳	۰	۰/۱۰۷	۰/۰۳۰	۰
خردکننده نواری	۰/۰۲۴	۰	۰	۰	۰/۰۷۳	۰/۱۲۴	۰/۰۲۶	۰/۰۴۰

۴-۴- تشکیل ماتریس‌های تسلط موافق و تسلط مخالف

محاسبه شده است. در نهایت ماتریس‌های تسلط موافق و تسلط مخالف به ترتیب به صورت جدول‌های ۱۲ و ۱۳ محاسبه شده است.

در این مرحله، مقدار آستانه موافقت و آستانه مخالفت با استفاده از روابط (۱۰) و (۱۱)، به ترتیب $0/609$ و $0/736$

جدول ۱۰: ماتریس توافق

خردکننده نواری	چکشی	ضربه‌ای	خردکننده سرعت پایین	استوانه‌ای سرعت بالا	فکی با بازوی مضاعف	فکی با بازوی ساده	ژیراتوری
۰/۶۴۲	۰/۸۳۴	۰/۹۲۷	۰/۶۶۹	۰/۹۲۷	۰/۸۰۸	۰/۸۸۸	-
۰/۳۹۷	۰/۵۱۶	۰/۵۱۶	۰/۲۳۱	۰/۶۸۲	۰/۸۰۸	-	۰/۵۸۹
۰/۵۸۹	۰/۵۸۹	۰/۷۵۵	۰/۲۳۱	۰/۷۵۵	-	۰/۶۰۳	۰/۴۳۱
۰/۵۲۳	۰/۶۴۲	۰/۸۰۸	۰	-	۰/۵۰۴	۰/۶۹۶	۰/۶۰۲
۰/۹۰۷	۰/۸۳۴	۱	-	۱	۰/۷۵۵	۰/۷۶۹	۰/۷۶۹
۰/۶۴۲	۰/۷۶۱	-	۰/۱۱۹	۰/۴۷۰	۰/۵۳۰	۰/۲۳۹	۰/۲۳۹
۰/۶۴۲	-	۱	۰/۲۸۵	۰/۴۷۰	۰/۵۳۰	۰/۴۸۴	۰/۲۳۹
-	۰/۵۸۹	۰/۶۳۶	۰/۲۸۵	۰/۷۵۵	۰/۸۱۵	۰/۶۹۶	۰/۵۲۴

جدول ۱۱: ماتریس مخالف

خردکننده نواری	چکشی	ضربه‌ای	خردکننده سرعت پایین	استوانه‌ای سرعت بالا	فکی با بازوی مضاعف	فکی با بازوی ساده	ژیراتوری
۰/۴۰۲	۰/۷۷۲	۰/۶۷۴	۱	۰/۲۱۹	۰/۳۷۱	۰/۰۲۹	-
۰/۹۴۶	۱	۰/۶۹۶	۱	۰/۵۳۸	۱	-	۱
۱	۱	۰/۵۲۶	۱	۰/۷۶۱	-	۱	۱
۰/۲۱۴	۰/۶۹۸	۰/۲۸۳	۱	-	۰/۲۵	۱	۱
۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱
۱	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱
۰/۵۶۰	-	۰	۱	۰/۱۴۵	۰/۳۴۳	۰/۹۶۶	۱
-	۱	۰/۴۳۰	۱	۰/۱۱۵	۰/۰۳۸	۱	۱

جدول ۱۲: ماتریس تسلط موافق

خردکننده نواری	چکشی	ضربه‌ای	خردکننده سرعت پایین	استوانه‌ای سرعت بالا	فکی با بازوی مضاعف	فکی با بازوی ساده	ژیراتوری
۱	۱	۱	۱	۱	۱	۱	-
۰	۰	۰	۰	۱	۱	-	۰
۰	۰	۱	۰	۱	-	۰	۰
۰	۱	۱	۰	-	۰	۱	۰
۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱
۱	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰
۱	-	۱	۰	۰	۰	۰	۰
-	۰	۱	۰	۱	۱	۱	۰

جدول ۱۳: ماتریس تسلط مخالف

خردکننده نواری	چکشی	ضربه‌ای	خردکننده سرعت پایین	استوانه‌ای سرعت بالا	فکی با بازوی مضاعف	فکی با بازوی ساده	ژیراتوری
۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	-
۱	۱	۰	۱	۰	۱	-	۱
۱	۱	۰	۱	۱	-	۱	۱
۰	۰	۰	۱	-	۰	۱	۱
۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱
۱	۱	-	۱	۱	۱	۱	۱
۰	-	۰	۱	۰	۰	۱	۱
-	۱	۰	۱	۰	۰	۱	۱

۵- ارائه یافته‌ها و انتخاب سنگ‌شکن مناسب

۶- نتیجه‌گیری

ماتریس تسلط نهائی با استفاده از رابطه (۱۳) محاسبه شده و در جدول ۱۴ آورده شده است. رتبه‌بندی سنگ‌شکن‌ها با هر نظر گرفتن تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن برای هر سنگ‌شکن محاسبه شده و در جدول ۱۵ آورده شده است. با توجه به جدول ۱۵، بیش‌ترین اختلاف بین تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن، برای خردکننده سرعت پایین محاسبه و بنابراین این سنگ‌شکن به عنوان مناسب‌ترین سنگ‌شکن اولیه معرفی شده است. علاوه بر این، سنگ‌شکن‌های ژیراتوری و ضربه‌ای به ترتیب در اولویت‌های دوم و سوم قرار می‌گیرند. خردکننده نواری، سنگ‌شکن‌های استوانه‌ای سرعت بالا و فکی با بازوی مضاعف دارای اختلاف یکسان در تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن بوده و بنابراین در اولویت چهارم انتخاب قرار می‌گیرند. به همین ترتیب، سنگ‌شکن‌های فکی با بازوی ساده و چکشی به ترتیب در اولویت‌های پنجم و ششم قرار می‌گیرند.

با توجه به تنوع معیارهای موجود در انتخاب یک سنگ‌شکن از میان چندین گزینه، انتخاب سنگ‌شکن مناسب یک مسئله تصمیم‌گیری چند معیاره است. سنگ‌شکن‌های ژیراتوری، فکی با بازوی ساده، فکی با بازوی مضاعف، استوانه‌ای سرعت بالا، خردکننده سرعت پایین، سنگ‌شکن ضربه‌ای، چکشی و خردکننده نواری از متداول‌ترین سنگ‌شکن‌های اولیه در معدنکاری هستند. در این تحقیق، پس از معرفی معیارهای ظرفیت، اندازه خوراک ورودی و اندازه محصول خروجی، اندیس سایش و مقاومت فشاری ماده معدنی، قابلیت تحرک، قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در فعالیتهای زیرزمینی و قابلیت استفاده از سنگ‌شکن در خردایش مواد حاوی رس، با بهره‌گیری از روش تصمیم‌گیری تسلط تقریبی به انتخاب سنگ‌شکن اولیه مناسب پرداخته شد. نتایج خردکننده سرعت پایین را به عنوان گزینه برتر ارائه داده است.

جدول ۱۴: ماتریس تسلط نهائی

خردکننده نواری	چکشی	ضربه‌ای	خردکننده سرعت پایین	استوانه‌ای سرعت بالا	فکی با بازوی مضاعف	فکی با بازوی ساده	ژیراتوری
۰	۱	۱	۱	۰	۰	۰	-
۰	۰	۰	۰	۰	۱	-	۰
۰	۰	۰	۰	۱	-	۰	۰
۰	۰	۰	۰	-	۰	۱	۰
۱	۱	۱	-	۱	۱	۱	۱
۱	۱	-	۰	۰	۰	۰	۰
۰	-	۰	۰	۰	۰	۰	۰
-	۰	۰	۰	۰	۰	۱	۰

جدول ۱۵: رتبه‌بندی سنگ‌شکن‌ها با در نظر گرفتن تعداد مسلط شدن و تعداد مغلوب شدن

سنگ‌شکن	تعداد مسلط شدن	تعداد مغلوب شدن	اختلاف
ژیراتوری	۳	۱	۲
فکی با بازوی ساده	۱	۳	-۲
فکی با بازوی مضاعف	۱	۲	-۱
استوانه‌ای سرعت بالا	۱	۲	-۱
خردکننده سرعت پایین	۷	۰	۷
ضربه‌ای	۲	۱	۱
چکشی	۰	۳	-۳
خردکننده نواری	۱	۲	-۱

et guide d'utilisariion, Universitie de Paris-Dauphine, Paris.

[7] Hokkanen J. and Salminen; 1997; *Chosing a solid waste management System Using MultiCriteria Decision Analysis*, European Journal of Operational Research, No. 98, pp. 19-36.

[8] Ronald W.; 2002; *Selection and Sizing of Primary Crusher*, Mineral Processing plant design, Practice, and Control, Vol. 1, Published by the SME.

[9] Hwang C. L. and Yoon K.; 1981; *Multiple Attributes Decision Making Methods and Applications*, Springer, Berlin., Germany.

[10] Wu M. and Chen T.; 2009; *The ELECTRE multi criteria analysis approach based on intuitionist fuzzy sets*, in Proceedings of the IEEE International Conference on Fuzzy Systems (Fuzz- IEEE'09), pp.2-3.

-
1. Feeder breaker
 2. Benayoum
 3. Nijkamp and Roy
 4. Semi-Mobile

۷- مراجع

[۱] بحری، زهرا؛ عطایی، محمد؛ کارآموزیان، محمد، ۱۳۹۰، "انتخاب سنگ‌شکن اولیه با استفاده از روش تحلیل سلسله مراتبی (AHP) برای کارخانه سیمان شاهرود"، هشتمین کنفرانس دانشجویی مهندسی معدن، تهران.

[۲] عطایی، محمد؛ ۱۳۸۹، "تصمیم‌گیری چند معیاره"، انتشارات دانشگاه صنعتی شاهرود.

[۳] نعمت‌اللهی، حسین، ۱۳۷۵، "کانه آرایی"، جلد اول، انتشارات دانشگاه تهران.

[4] Antón J.M. Grau J.B. Andina D.; 2004; *Electre and AHP MCDM Method and the Official choice applied to High-Speed Railway Layout alternative election*, W.S.E.A.S. transactions on business and economics, Issue 1, Vol.1, Jan., pp. 64-69.

[5] Roy B.; 1990; *the Outranking Approach and the Foundations of ELECTRE Methods*, In: Bana e Costa C.A., (ed). *Readings in Multiple Criteria Decision Aid*, Springer-Verlang, Berlin, pp. 155-183.

[6] Roy B; 1985; *ELECTRE IS, Aspect Methodologies*