

انتخاب مدار فرآوری زغال سنگ درشت‌دانه با استفاده از روش تاپسیس فازی

مستوره یوسفی^{۱*}، سید حسن طباطبایی^۱، علی احمدی^۱

۱. دانشکده مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

روش تصمیم‌گیری چند معیاره راهکار مناسبی برای بهینه‌سازی فرآیندهای غیرخطی است. این روش‌ها با در نظر گرفتن عوامل مختلف فرآیندی و غیر فرآیندی مؤثر است که منجر به بهبود فرآیندها و کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی واحدهای صنعتی می‌گردد. در این مطالعه، سه گزینه مدار فرآوری زغال سنگ شامل سیکلون واسطه سنگین، تری فلو و فرآیند ترکیبی تری فلو-بیوهیپ لیچینگ، برای انتخاب بهترین فرآیند برای فرآوری زغال سنگ درشت‌دانه طبع باهم مقایسه شدند. برخی پارامترهای مهم نظیر مزایای محیط‌زیستی، سادگی مدار، در دسترس بودن تجهیزات، هزینه سرمایه‌گذاری و عملیاتی و درآمد به ازای تن خوراک زغال انتخاب و بر اساس نظر کارشناسی و تحقیقات قبلی وزن دهی شدند. با توجه به ماهیت کیفی معیارهای انتخابی و عدم قطعیت همراه آن‌ها، برای ارزیابی مسیره‌های پیشنهادی از روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس فازی، استفاده گردید. مشاهده شد که بیشترین (۰/۳۳۶) و کمترین (۰/۲۲۵) ضرایب نزدیکی برای شستشو پذیری زغال سنگ درشت‌دانه پرگوگرد طبع به ترتیب به مدارهای ترکیبی تری فلو-بیوهیپ لیچینگ و سیکلون واسطه سنگین مربوط بود.

مشخصات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت: ۲۵ آذر ۹۳

دریافت پس از اصلاح: ۲۴ مرداد ۹۴

پذیرش نهایی: ۲۷ مرداد ۹۴

کلمات کلیدی:

زغال سنگ

شستشو پذیری

تاپسیس فازی

تری فلو

بیوهیپ لیچینگ

* عهده‌دار مکاتبات

m.usefi@mi.iut.ac.ir

حقوق ناشر محفوظ است.

۱- مقدمه

زغال سنگ یکی از سوخت‌های فسیلی و تجدید ناپذیر است که ذخایر آن از سایر سوخت‌های فسیلی بیشتر است. ناحیه طبس از نظر کمی و کیفی یکی از پهنه‌های ارزشمند زغال دار ایران است [۱].

عمده‌ترین مشکل در استفاده از زغال سنگ وجود گوگرد در آن است. بر اساس مطالعات انجام شده زغال سنگ طبس در رده زغال سنگ با گوگرد و خاکستر بالا طبقه بندی می‌شود. سوختن زغال موجب بروز مسائل زیست محیطی می‌شود که از ناخالصی‌های آن به خصوص سولفور ناشی می‌شود [۲،۳].

حذف پیریت از طرق مختلف، شامل جدایش فیزیکی (ثقلی، مغناطیسی و ...)، جدایش شیمیایی (لیچینگ)، جدایش فیزیکی-شیمیایی (فلوتاسیون) و جدایش بیولوژیکی قابل انجام است [۳،۴]. از بین روش‌های مختلف، حذف فیزیکی سولفور پیریتی قبل از سوختن با فرآیندهای فرآوری مواد معدنی به دلیل مزایای فنی، اقتصادی و محیط‌زیستی، مناسب‌ترین راه برای کاهش گوگرد موجود در زغال شناخته شده است [۵].

در این مطالعه علاوه بر روش‌های فیزیکی مورد استفاده برای حذف پیریت، در گزینه‌های مورد نظر برای انتخاب مدار مناسب فرآوری، مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ که در نوع خود یک نوآوری محسوب می‌شود، استفاده شده است [۱]؛ این مدار طوری طراحی شده که با به کارگیری میکروارگانیسم‌ها، یک روش دوستدار محیط‌زیست است. هر یک از مدارهای پیشنهاد شده در این مطالعه دارای مزایا و معایبی است که انتخاب مدار مناسب نیازمند بررسی میزان تأثیر این عوامل در کارآمدی هر یک از گزینه‌هاست. عوامل و پارامترهای مؤثر در انتخاب گزینه مناسب در مدار فرآوری ممکن است ترجیحی و کیفی و مبتنی بر نظر کارشناس باشد و یا ممکن است عوامل کمی و خارج از کنترل کارشناس باشد از این رو در این مطالعه تلاش شده از میان روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند معیاره، با استفاده از روش شباهت به گزینه ایده‌آل فازی یا روش تاپسیس فازی، گزینه برتر انتخاب و برای مدار فرآوری به کار گرفته شود.

روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره (MCDM) از زیرمجموعه‌های تحقیق در عملیات هستند که با بهره‌گیری از ابزارهای ریاضی و کامپیوتری، رشد یافته‌اند [۶،۷].

تئوری فازی اولین بار توسط لطفی عسکرزاده مشهور به زاده در سال ۱۹۶۵، برای مدل کردن عدم قطعیت در داده‌ها که در مسائل مربوط به علوم مختلف وجود دارد، مطرح گردید

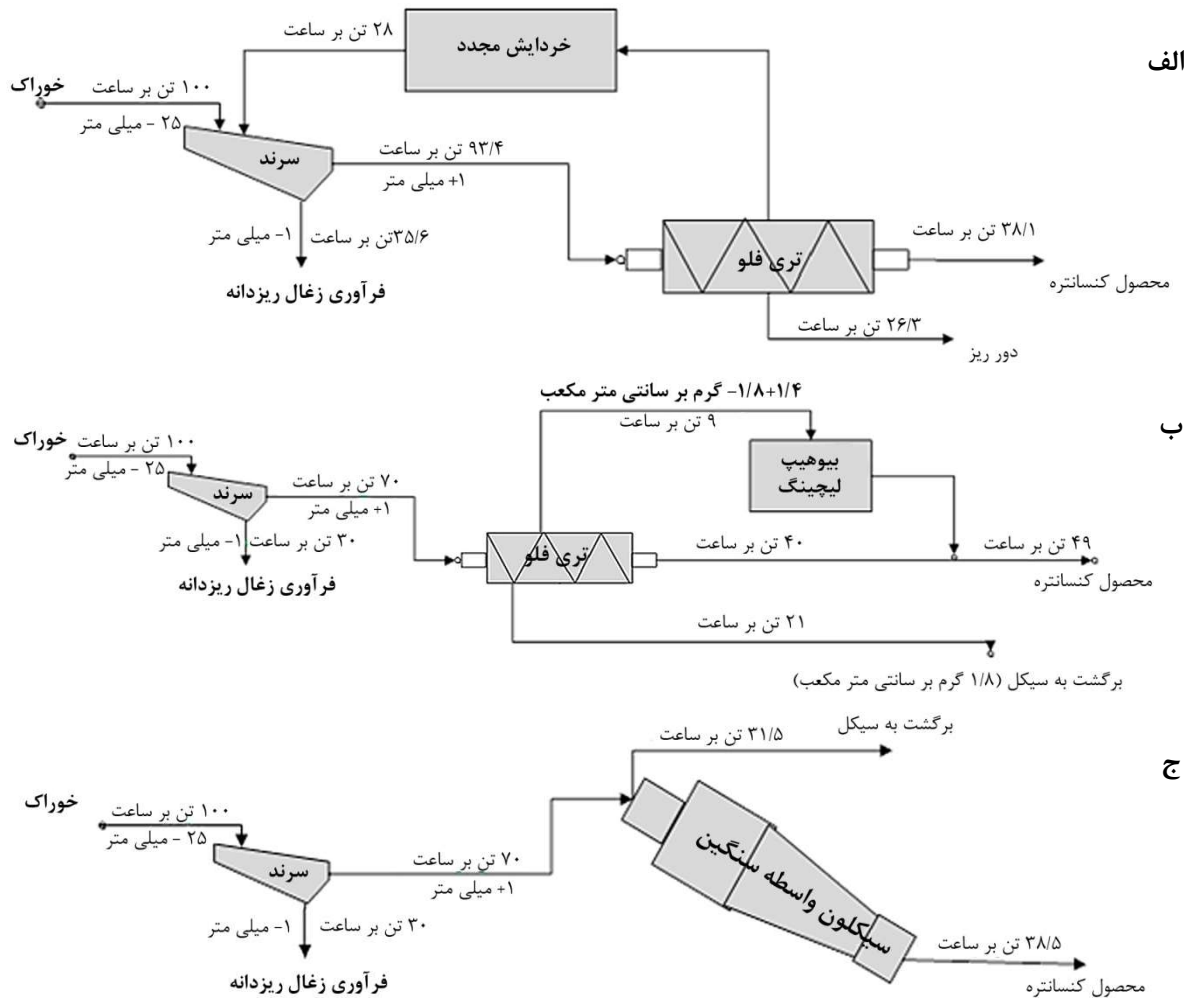
[۸]. در مواردی که داده‌ها ناکافی یا دارای ابهام‌اند و یا داده‌ها با عدم قطعیت همراه هستند، استفاده از تکنیک‌های فازی نسبت به تکنیک‌های کلاسیک و قطعی ارجحیت دارند [۹]. روش تاپسیس اولین بار توسط Hwang & Yoon در سال ۱۹۸۱ برای رتبه‌بندی یک مجموعه متناهی از گزینه‌ها مورد استفاده قرار گرفت [۱۰]. روش تاپسیس سعی دارد گزینه‌ای را انتخاب کند که کمترین فاصله را از حل ایده‌آل مثبت و بیشترین فاصله را از حل ایده‌آل منفی داشته باشد. تاپسیس با به کارگیری کامل اطلاعات موجود، گزینه‌ها را رتبه‌بندی می‌کند [۱۱]. برای استفاده از این روش، مقادیر ویژگی یا مشخصه باید عددی باشند، به طور یکنواخت افزایش یا کاهش یابند و واحد آن‌ها متناسب باشد [۱۲]. هر مشخصه می‌تواند با مقادیر کمی یا کیفی مورد ارزیابی قرار گیرد. هر کدام از دو نوع مشخصه را می‌توان با اعدادی با رنج متفاوت مانند ۱-۵، ۱-۷ و ۱-۹ نشان داد [۱۳].

روش تاپسیس فازی از زمان پایه‌گذاری تاکنون در رشته‌های متعددی استفاده شده است؛ از جمله صنایع و سیستم‌ها، محیط‌زیست، مدیریت انرژی، مدیریت منابع آب و غیره. اخیراً از روش تاپسیس برای مسائل انتخاب و رتبه‌بندی در معدن استفاده شده است.

به عنوان مثال در محیط‌زیست، Krohling & Campanharo، برای ارزیابی پیشامدهای ناشی از پخش نفت در آب دریا از روش تاپسیس فازی استفاده شده است [۱۴]. در مباحث مربوط به مدیریت انرژی، Yan, et.al از تاپسیس برای بررسی راه‌های مؤثر در کاهش آلودگی ناشی از زغال سنگ و نیز حفظ منابع انرژی استفاده نموده‌اند [۱۵]. در حوزه منابع آب، Boix et al.، به بررسی منابع آلاینده آب و طراحی بهینه شبکه این آلاینده‌ها با استفاده از روش تاپسیس پرداخته است [۱۶]. اخیراً از روش تاپسیس برای بهینه‌سازی عملیات شستشوی عناصر نادر خاکی از کانسار حاوی این عناصر استفاده شده است [۱۷]. علوی و همکاران از روش تاپسیس فازی برای انتخاب گونه‌های گیاهی مناسب به منظور احیای محیط‌زیست منطقه و اجرای طرح بازسازی معدن مس سرچشمه استفاده کرده‌اند [۱۸]. همچنین اسدی ایراد و همکاران از روش تاپسیس فازی برای انتخاب روش مناسب استخراج استفاده کرده‌اند [۱۹].

مزیت روش تاپسیس فازی، سادگی و توانایی آن در تعیین اولویت‌ها به صورت دقیق و درست است [۲۰]. با توجه به کارآمدی روش تاپسیس فازی، در این مطالعه برای رتبه‌بندی گزینه‌ها از این روش استفاده شده است.

انتخاب مدار فرآوری زغالسنگ درشت دانه با استفاده از روش تاپسیس فازی



شکل (۱) مدارهای مورد بررسی فرآوری زغال سنگ پرسولفور درشت دانه. الف) تصویر مدار تری فلو ب) تصویر مدار ترکیبی تری فلو و بیوهیپ لیچینگ ج) تصویر مدار سیکلون واسطه سنگین

۲- روش تحقیق

در این مطالعه سه مدار برای فرآیند فرآوری زغال سنگ شامل مدار سیکلون واسطه سنگین، تری فلو و مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ لیچینگ جهت زغال شویی پروده طیس مدنظر قرار گرفته است (شکل ۱). گزینش این سه مدار جهت مطالعه و بررسی به منظور انتخاب مدار مناسب، کارآمدی آنها در بخش فرآوری درشت دانه زغال سنگ، حذف گوگرد، بازدهی مناسب و صرفه اقتصادی آنها بوده است.

با توجه به تنوع پارامترهای مطلوب و نامطلوب مؤثر بر انتخاب بهترین مدار فرآوری در بخش درشت دانه زغال سنگ، همان طور که ذکر شد از روش تصمیم گیری چند معیاره تاپسیس فازی استفاده شده است.

در مقالات متعدد مراحل مختلف روش تاپسیس آورده شده است [۲۲، ۲۱]. در روش تاپسیس برای تعیین وزن معیارها و مقادیر گزینهها در ارتباط با معیارها از مقادیر قطعی

و دقیق استفاده می شود. اما تصمیم گیری هایی که بر اساس یک سری اطلاعات مبهم و توسط انسان به عنوان تصمیم گیرنده صورت می گیرد، با عدم قطعیت همراه اند. به همین دلیل روش تاپسیس فازی (FTOPSIS) که در ماتریس تصمیم آن عدم قطعیت و ابهام در داده ها در نظر گرفته شده است، استفاده بیشتری دارد [۲۳]. در این مطالعه نیز با توجه به پارامترهای محدود کننده در تصمیم گیری و با در نظر گرفتن این نکته که وزن دهی بر اساس نظر کارشناسی که خود با عدم قطعیت همراه است، صورت گرفته روش تاپسیس فازی برای رتبه بندی گزینهها و تعیین گزینه مناسب برای مدار فرآوری، استفاده شد. مراحل انجام روش تاپسیس فازی به صورت زیر خلاصه می شود [۲۷، ۲۶، ۲۵، ۲۴]. در روش تاپسیس فازی در صورتی که هدف رتبه بندی m گزینه، بر اساس n باشد، ماتریس تصمیم فازی بر اساس عملکرد گزینهها در ارتباط با معیارها تشکیل و سپس بی مقیاس می شود (\tilde{R}).

۳- ارائه نتایج و تحلیل یافته‌ها

در این مطالعه برای انتخاب بهترین مدار فرآوری در بخش درشت‌دانه فرآوری زغال، از بین سه مدار مورد بررسی سیکلون واسطه سنگین، مدار ترکیبی تری فلو- بیوهیپ لیچینگ و مدار تری فلو، از روش تاپسیس فازی استفاده گردید. معیارهای مورد توجه در این مطالعه، همان‌طور که ذکر شد، ۵ معیار شامل، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی، جنبه محیط‌زیستی، میزان سادگی فرآیند و سهولت تأمین تجهیزات و درآمد به ازای تن خوراک ورودی است که نمودار معیارها، گزینه‌ها و ارتباط بین آن‌ها در شکل ۲ آورده شده است. با توجه به ماهیت هر یک از معیارهای مذکور در بالا، نمی‌توان مقادیر کمی قطعی و مشخصی را به هر گزینه در ارتباط با معیارها نسبت داد، به همین سبب از اوزان فازی مثلثی برای بیان عدم قطعیت و ابهام در داده‌ها استفاده می‌شود. در سه مدار مورد بررسی در این مطالعه، به دلیل اینکه معیار مربوط به هزینه سرمایه‌گذاری متأثر از پارامترهای مختلفی چون نرخ تورم، تحریم‌های اقتصادی و... است، این معیار برای هر یک از گزینه‌ها به صورت فازی در نظر گرفته می‌شود. از نظر هزینه سرمایه‌گذاری، سیکلون واسطه سنگین، هزینه نسبتاً بالایی دارد، مدار تری فلو هزینه سرمایه‌گذاری کمتری نیاز دارد و مدار ترکیبی تری فلو- بیوهیپ از نظر هزینه سرمایه‌گذاری حد واسطه دو مدار قبلی است. با توجه به اینکه مدار تری فلو خردایش مجدد دارد سبب می‌شود هزینه عملیاتی بیشتری داشته باشد. مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ نیز هزینه ساخت هیپ دارد، سیکلون واسطه سنگین کمترین هزینه عملیاتی را نسبت به دو روش دیگر دارد [۱]. از نظر محیط‌زیستی نیز هر یک از دستگاه‌ها متفاوت عمل می‌کنند و چون میزان آلودگی زیست‌محیطی ناشی از هر دستگاه را به‌طور قطع نمی‌توان تعیین کرد، بنا بر نظر کارشناسی، برای نشان دادن اثرات زیست‌محیطی هر یک از گزینه‌ها نسبت به دیگری از اعداد فازی استفاده شده است. مبنای اختصاص اعداد فازی به هر یک از گزینه‌ها به این صورت است که در روش تری فلو و روش سیکلون واسطه سنگین به این دلیل که اساس این روش‌ها ثقلی است و از مواد شیمیایی و بیولوژیکی استفاده نمی‌شود، پسماندهای غیر فعال تشکیل می‌شود بنابراین آلودگی کمتری ایجاد می‌کنند و از نظر محیط‌زیستی ارجحیت دارند. درجه آزادی پیریت معیار مهمی برای جدایش پیریت از زغال سنگ در فرآیند سولفور زدایی است. مطالعات نشان می‌دهد حدود ۴۰ درصد پیریت موجود در بخش درشت‌دانه زغال سنگ طبس

$$\bar{R} = [\bar{r}_{ij}]_{mn} \quad (1)$$

مجموعه‌ای را فازی گویند که حداقل یک عضو از آن مجموعه فازی باشد [۳۱]. در حالت کلی مجموعه‌های فازی را با اعداد فازی نشان می‌دهند که این اعداد فازی می‌توانند مثلثی یا دوزنقه‌ای باشند [۲۸، ۲۶].

در این مطالعه ۳ گزینه ($i=1,2,3$) وجود دارد که شامل مدار سیکلون واسطه سنگین، ترکیب دو مدار تری فلو- بیوهیپ لیچینگ و مدار تری فلو است. در جدول (۱) نحوه امتیازدهی به هر گزینه ارائه شده است.

بردار وزن معیارها \vec{W} ، به صورت زیر نمایش داده می‌شود که در آن w_j وزن معیار j ام است.

$$\vec{W} = [w_1, w_2, \dots, w_n] \quad (2)$$

تعداد معیارهایی که در این مطالعه در فرآیند تصمیم‌گیری تأثیرگذارند، ۵ معیار است ($j=1,2,3,4,5$)، که شامل، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های عملیاتی، جنبه محیط‌زیستی، میزان سادگی فرآیند، سهولت تأمین تجهیزات و درآمد به ازای تن خوراک ورودی است. سپس ماتریس تصمیم‌گیری مقیاس شده در بردار وزن معیارها وزن شده و ماتریس به صورت زیر وزن‌دار می‌شود.

$$\vec{V} = \bar{R} \times \vec{W} \quad (3)$$

در مرحله بعدی حل ایده‌آل فازی و حل ضد ایده‌آل از روابط زیر به دست می‌آیند.

$$A^* = \{\bar{v}_1^*, \bar{v}_2^*, \dots, \bar{v}_n^*\} \quad (4)$$

$$A^- = \{\bar{v}_1^-, \bar{v}_2^-, \dots, \bar{v}_n^-\}$$

در روابط بالا \bar{v}_1^* بهترین معیار در بین گزینه‌ها است و \bar{v}_1^- بدترین معیار در بین تمام گزینه‌هاست. سپس فاصله هر گزینه از حل ایده‌آل و ضد ایده‌آل فازی از روابط زیر قابل محاسبه است.

$$S^* = \sum_{j=1}^n d(\bar{v}_{ij}, \bar{v}_j^*) \quad i = 1, \dots, m \quad (5)$$

$$S^- = \sum_{j=1}^n d(\bar{v}_{ij}, \bar{v}_j^-) \quad i = 1, \dots, m$$

سپس شاخص شباهت بر اساس فواصل اندازه‌گیری شده به صورت زیر به دست می‌آید.

$$CC_i = \frac{S_i^-}{S_i^* + S_i^-} \quad i = 1, \dots, m \quad (6)$$

در نهایت با توجه به شاخص شباهت (ضریب نزدیکی)، گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند طوری که گزینه با شاخص شباهت بیشتر در اولویت قرار می‌گیرد.

انتخاب مدار فرآوری زغالسنگ درشت دانه با استفاده از روش تاپسیس فازی

لحاظ کردن عدم قطعیت و پارامترهای غیرقابل پیش‌بینی، ترجیح داده شد این معیار نیز با اعداد فازی بیان شود. میزان کنسانتره حاصل‌شده از هر یک از مدارها به ازای ۱۰۰ تن خوراک ورودی در یک ساعت به‌صورت زیر است (شکل ۱). در مدار تری فلو- بیوهیپ، به ازای ۱۰۰ تن بر ساعت خوراک ورودی حدوداً ۴۹ تن بر ساعت کنسانتره تولید می‌شود. در تری فلو به ازای همان مقدار خوراک ورودی ۳۸/۱ تن بر ساعت کنسانتره تولید می‌شود که این مقدار با درصدی از مواد زیر سرند که جزء محصول به‌حساب می‌آید جمعاً به مقدار ۴۱/۵ تن بر ساعت محصول به دست می‌آید، به‌علاوه در این مدار خاکستر از ۲۲ درصد به ۹ درصد کاهش پیدا می‌کند. در روش سیکلون واسطه سنگین به ازای ۱۰۰ تن بر ساعت خوراک، ۳۸/۵ تن بر ساعت کنسانتره تولید می‌شود [۱]. برای وزن‌دهی به گزینه‌ها با توجه به معیارها بر اساس نظر کارشناسی از متغیرهای زبانی استفاده شده است [۳۰، ۲۷، ۲۶]. منظور از متغیرهای زبانی متغیرهایی هستند که مقادیر آن‌ها به‌جای اعداد، با عبارات زبان طبیعی بیان می‌شوند [۳۱]، سپس این عبارات کلامی با اعدادی متناظر با آن‌ها مقداردهی می‌شوند. متغیرهای زبانی برای بیان وزن معیارها و برای رتبه‌بندی گزینه‌ها با در نظر گرفتن معیارها در روش‌های فازی نقش مهمی دارند. در جدول ۱ متغیرهای زبانی و مقادیر اعداد فازی مثلثی اختصاص داده شده به آن‌ها در این مطالعه با توجه به نظر کارشناسی برای گزینه‌ها آورده شده است.

وزن معیارها نیز با توجه به ماهیت فازی آن و عدم قطعیت اوزان، بر اساس نظر کارشناسی، مبتنی بر متغیرهای زبانی به‌صورت فازی در نظر گرفته شد، وزن معیارها با توجه به اهمیت آن در تعیین دستگاه مناسب، تعیین شد (جدول ۲).

جدول (۲) عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر با آن‌ها برای معیارها

متغیرهای کلامی و مقادیر فازی متناظر	
خیلی کم (VL)	(۰, ۰/۰۵, ۰/۱)
کم (L)	(۰/۰۵, ۰/۱, ۰/۲)
نسبتاً کم (ML)	(۰/۲, ۰/۳, ۰/۴)
متوسط (M)	(۰/۳, ۰/۴, ۰/۵)
نسبتاً زیاد (MH)	(۰/۵, ۰/۶, ۰/۷)
زیاد (H)	(۰/۷, ۰/۸, ۰/۹)
خیلی زیاد (VH)	(۰/۹, ۱, ۱)

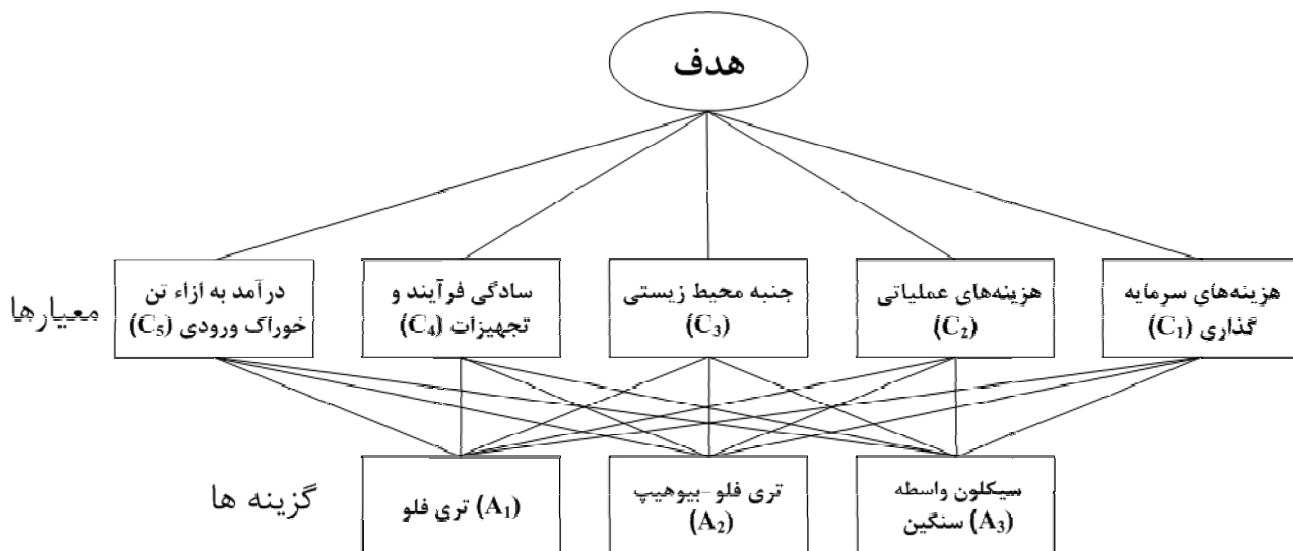
به‌صورت آزاد بوده و چون وزن مخصوص بالایی دارد، می‌توان با روش‌های فیزیکی آن را از زغال حذف نمود [۲].

باید این مسئله را در نظر داشت که در روش تری فلو در طی فرآیند زغال شویی، خردایش مجدد انجام می‌شود و این سبب می‌شود که پیریت ثانویه تولید شود، در واقع انحلال پیریت در این روش نسبت به روش واسطه سنگین بیشتر و در نتیجه نسبت به روش سیکلون واسطه سنگین اثرات نامطلوب بیشتری بر محیط‌زیست خواهد داشت. در مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ، در بخش بیوهیپ، از باکتری‌ها به‌منظور سولفورزدایی استفاده می‌شود. درجایی که پیریت به‌صورت ریزدانه و پراکنده در زغال حضورداشته باشد، استفاده از باکتری‌ها به‌منظور گوگردزدایی نسبت به فرآیندهای فیزیکی و شیمیایی مناسب‌تر است [۲]. مطالعات نشان می‌دهد روش بیولیچینگ در کاهش مقدار خاکستر و نیز گوگردزدایی در زغال‌سنگ طبس، کارایی خوبی داشته است [۲۸]، در این روش واکنش‌های شیمیایی رخ می‌دهد و مرتب در طی فرآیند اسید تولید می‌شود که باید از محیط خارج شود، به همین سبب از نظر محیط‌زیستی به‌اندازه روش‌های ثقیل مطلوب نیست، اما دیگر مزیت‌های استفاده از میکرواورگانیسم‌ها از جمله افزایش سرعت فرآیند، به‌کارگیری این روش به‌عنوان بخشی از مدار فرآوری زغال‌سنگ طبس را توجیه‌پذیر می‌کند [۲۹].

از نظر سادگی فرآیند و تجهیزات، مدار تری فلو و نیز مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ نسبت به سیکلون واسطه سنگین برتری دارند لذا وزن‌های فازی بر این اساس تخصیص یافته‌اند. در معیار درآمد به ازای ۱۰۰ تن خوراک ورودی، با توجه به عملکرد دستگاه‌ها می‌توان از اعداد قطعی برای درآمد حاصل از کنسانتره استفاده کرد اما بنا بر نظر کارشناس، به‌منظور

جدول (۱) عبارات کلامی و اعداد فازی متناظر با آن‌ها برای گزینه‌ها

متغیرهای کلامی برای گزینه‌ها	
خیلی ضعیف (VP)	(۱, ۰, ۰)
ضعیف (P)	(۰, ۰, ۳)
نسبتاً ضعیف (MP)	(۱, ۳, ۵)
متوسط (F)	(۳, ۵, ۷)
نسبتاً خوب (MG)	(۵, ۷, ۹)
خوب (G)	(۷, ۹, ۱۰)
خیلی خوب (VG)	(۹, ۱۰, ۱۰)



شکل (۲) نمودار ارتباط بین معیارها و گزینه‌ها

جدول (۳) ارزیابی گزینه‌ها با در نظر گرفتن معیارها

معیار	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
گزینه / نوع معیار	منفی	منفی	مثبت	مثبت	مثبت
A ₁	(۳،۵،۷)	(۷،۹،۱۰)	(۵،۷،۹)	(۷،۹،۱۰)	(۳،۵،۷)
A ₂	(۵،۷،۹)	(۵،۷،۹)	(۳،۵،۷)	(۷،۹،۱۰)	(۹،۱۰،۱۰)
A ₃	(۷،۹،۱۰)	(۳،۵،۷)	(۷،۹،۱۰)	(۵،۷،۹)	(۱،۳،۵)
وزن معیار	(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴)	(۰/۲، ۰/۳، ۰/۴)	(۰/۵، ۰/۱، ۰/۲)	(۰/۳، ۰/۴، ۰/۵)	(۰/۹، ۰/۱، ۰/۱)

روند انجام تاپسیس فازی برای انتخاب دستگاه مطلوب در فرآیند فرآوری زغال شامل مراحل زیر است.

۳-۱- تعیین ماتریس تصمیم فازی

نتایج ارزیابی گزینه‌ها با معیارها که با توجه به عبارات کلامی و بر اساس نظر کارشناسی و (جدول ۱) وزن‌دهی شده‌اند در جدول ۳ آورده شده است. در این موارد انتخاب بر اساس تجربه و ارجحیت موردی بر مورد دیگر است. این وزن‌ها ممکن است اهمیت اقتصادی واضحی در تصمیم‌گیری‌های چند معیاره نداشته باشند، اما به کمک آن‌ها جنبه‌های مختلف تصمیم‌گیری لحاظ می‌شود؛ اگر تعداد معیارها زیاد باشد، در نظر گرفتن جزئی‌ترین اولویت‌ها و ارجحیت‌ها در تعیین برتری صحیح گزینه‌ها نسبت به هم مؤثر واقع می‌شود. باید توجه داشت که معیارهای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و هزینه‌های عملیاتی، جنبه منفی دارند، یعنی مقادیر کمتر آن‌ها مطلوب‌تر است.

۳-۲- تشکیل ماتریس تصمیم فازی بی‌مقیاس شده

در این مرحله ماتریس تصمیم فازی (جدول ۳)، بی‌مقیاس شد و جدول (۴) به دست آمد. این امر به آن دلیل است که ممکن است دامنه تغییرات و منابع داده‌های ماتریس تصمیم متفاوت باشند و از این‌رو نرمالیزه کردن ماتریس تصمیم آن را به یک ماتریس بی‌بعد تبدیل می‌کند تا معیارهای مختلف، قابل مقایسه شوند.

۳-۳- تعیین ماتریس وزن دار بی‌مقیاس فازی

در این مرحله ماتریس وزن دار بی‌مقیاس فازی از ضرب ماتریس حاصل شده از مرحله قبل در وزن معیارها به دست می‌آید.

این مرحله تأثیر معیارها با توجه به اهمیت و وزن هر یک از آن‌ها در فرآیند تصمیم‌گیری اعمال می‌شود. در جدول ۵ این ماتریس آورده شده است.

انتخاب مدار فرآوری زغالسنگ درشت دانه با استفاده از روش تاپسیس فازی

جدول (۴) ماتریس تصمیم بی‌مقیاس فازی

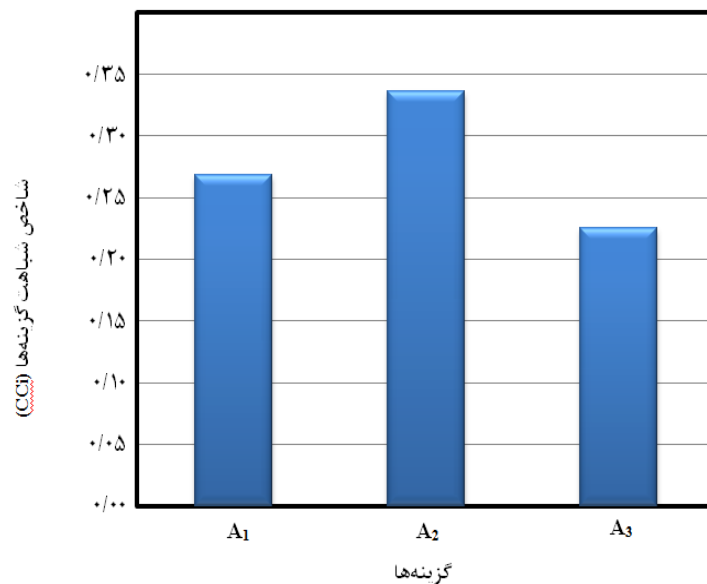
گزینه/معیار	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
A ₁	(۰/۴۲۹، ۰/۱۶، ۰/۱)	(۰/۳، ۰/۳۳۳، ۰/۴۲۹)	(۰/۵، ۰/۷، ۰/۹)	(۰/۷، ۰/۹، ۰/۱)	(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)
A ₂	(۰/۳۳۳، ۰/۴۲۹، ۰/۱۶)	(۰/۳۳۳، ۰/۴۲۹، ۰/۱۶)	(۰/۳، ۰/۵، ۰/۷)	(۰/۷، ۰/۹، ۰/۱)	(۰/۹، ۰/۱، ۰/۱)
A ₃	(۰/۳، ۰/۳۳۳، ۰/۴۲۹)	(۰/۴۲۹، ۰/۱۶، ۰/۱)	(۰/۷، ۰/۹، ۰/۱)	(۰/۵، ۰/۷، ۰/۹)	(۰/۱، ۰/۳، ۰/۵)

جدول (۵) ماتریس تصمیم بی‌مقیاس وزن دار فازی

گزینه/معیار	C ₁	C ₂	C ₃	C ₄	C ₅
A ₁	(۰/۰۸۶، ۰/۱۸، ۰/۴)	(۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۷۱)	(۰/۰۲۵، ۰/۰۷، ۰/۱۸)	(۰/۲۱، ۰/۳۶، ۰/۵)	(۰/۲۷، ۰/۵، ۰/۷)
A ₂	(۰/۰۶۷، ۰/۱۲۹، ۰/۲۴)	(۰/۰۶۷، ۰/۱۲۹، ۰/۲۴)	(۰/۰۱۵، ۰/۰۵، ۰/۱۴)	(۰/۲۱، ۰/۳۶، ۰/۵)	(۰/۸۱، ۰/۱، ۰/۱)
A ₃	(۰/۰۶، ۰/۱، ۰/۱۷۱)	(۰/۰۸۶، ۰/۱۸، ۰/۴)	(۰/۰۳۵، ۰/۰۹، ۰/۲)	(۰/۱۵، ۰/۲۸، ۰/۴۵)	(۰/۰۹، ۰/۳، ۰/۵)

جدول (۶) رتبه‌بندی نهایی گزینه‌ها بر اساس شاخص شباهت

رتبه	CC _i	فاصله تا ایده‌آل منفی	فاصله تا ایده‌آل مثبت	گزینه‌ها	ردیف
۲	۰/۲۶۸	۱/۳۸۷	۳/۷۸۴	A ₁	۱
۱	۰/۳۳۶	۱/۷۲۷	۳/۴۱۳	A ₂	۲
۳	۰/۲۲۵	۱/۱۶۵	۴/۰۱۴	A ₃	۳

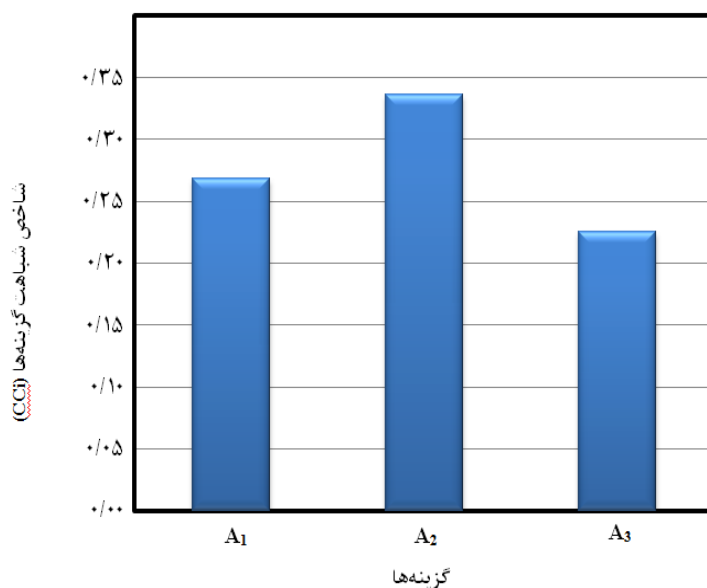


شکل (۳) مقایسه گزینه‌ها بر اساس شاخص شباهت

۳-۴- رتبه‌بندی و انتخاب روش

هدف این مرحله مشخص نمودن حل ایده‌آل مثبت فازی (FPIS, A⁺) و ایده‌آل منفی فازی (FPIS, A⁻) برای معیارها و تعیین فاصله هر یک از گزینه‌ها از ایده‌آل مثبت فازی و ایده‌آل منفی فازی و در نهایت رتبه‌بندی گزینه‌ها بر اساس نزدیکی نسبی گزینه‌ها با توجه به شاخص شباهت (CC_i) به حل ایده‌آل است که در جدول ۶ نتایج این مقایسه نشان داده شده است. نتایج حاصل از رتبه‌بندی گزینه‌ها با تکنیک تاپسیس

فازی حاکی از آن است که گزینه مربوط به مدار ترکیبی تری فلو- بیوهیپ لیچینگ که دارای مزیت‌های هر دو مدار می‌باشد، نسبت به سایر گزینه‌ها در جدول ۶ شاخص شباهت بزرگ‌تری دارد و دارای برتری است. مدار تری فلو در اولویت بعدی و مدار سیکلون واسطه سنگین در مقایسه با دو مدار دیگر کارایی پایین‌تری را نشان می‌دهد. در شکل ۳ مقایسه نهایی گزینه‌ها بر اساس شاخص شباهت نشان داده شده است که برتری گزینه ۲ نسبت به دو گزینه دیگر به‌وضوح دیده می‌شود.



شکل (۳) مقایسه گزینه‌ها بر اساس شاخص شباهت

منابع

- [۱] ع. احمدی، (۱۳۹۲) "حذف گوگرد معدنی در کارخانه فرآوری زغال سنگ پرورده طیس"، شرکت فرآوری زغال سنگ پرورده طیس.
- [2] A. Ahmadi (2015) "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", *Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research*, 2, 457-466.
- [۳] م. عبدالمی، ب. شهبازی، (۱۳۸۳) "بررسی پارامترهای مؤثر در حذف مغناطیسی پیریت از زغال طیس با استفاده از طراحی آزمایش‌ها"، کنفرانس مهندسی معدن.
- [۴] ب. رضایی (۱۳۸۰) "تکنولوژی زغال شویی"، انتشارات دانشگاه تهران.
- [5] M. Kiani, A. Ahmadi, and H. Zilouei (2014) "Biological removal of sulphur and ash from fine-grained high pyritic sulphur coals using a mixed culture of mesophilic microorganisms", *Fuel*, 131, 89-95.
- [6] F. A. Lootsma (1999) *Multi-criteria decision analysis via ratio and difference judgement*, Springer.
- [7] E. Triantaphyllou, B. Shu, S. N. Sanchez, and T. Ray (1998) "Multi-criteria decision making: an operations research approach", *Encyclopedia of electrical and electronics engineering*, 15, 175-186.
- [8] L. A. Zadeh (1965) "Fuzzy sets", *Information and control*, 8, 338-353.

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق از روش تاپسیس فازی برای انتخاب مدار مناسب فرآوری زغال سنگ‌های پرگوگرد استفاده گردید. نتایج نشان داد که مدار ترکیبی تری فلو-بیوهیپ لیچینگ دارای بیشترین شاخص شباهت است و برای استفاده در مدار فرآوری درشت‌دانه از کارایی بالایی برخوردار است و نسبت به دو گزینه دیگر، برای استفاده گزینه مناسب‌تری است.

نتایج حاکی از آن است که روش تصمیم‌گیری چند معیاره تاپسیس فازی در این مطالعه توانست به‌خوبی تأثیر معیارهای مختلف در انتخاب مدار مطلوب برای قرارگیری در مدار فرآوری زغال را در نظر گرفته و می‌تواند راهکار مناسبی برای یافتن مدار فرآوری بهینه در سیستم‌های پیچیده باشد. این مطالعه نشان می‌دهد روش تاپسیس فازی در تصمیم‌گیری‌هایی که داده‌ها دارای ابهام بوده و مبتنی بر نظر اشخاص متخصص که خود با عدم قطعیت همراه است، بسیار کارا است و استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره در کاهش هزینه‌ها و بهینه کردن روند اجرای فعالیت‌ها مؤثر واقع می‌شود.

تشکر و قدردانی

شایسته است از شرکت فرآوری زغال سنگ پرورده طیس بابت همکاری و در اختیار گذاشتن اطلاعات لازم برای این تحقیق قدردانی شود.

- [20] P. Sen and J.-B. Yang (1998) *Multiple criteria decision support in engineering design*, Springer Verlag, Berlin.
- [21] X. Zhu, F. Wang, H. Wang, C. Liang, R. Tang, X. Sun, et al. (2013) "TOPSIS method for quality credit evaluation: A case of air-conditioning market in China", *Journal of Computational Science*.
- [22] H. Li, H. Adeli, J. Sun, and J.-G. Han (2011) "Hybridizing principles of TOPSIS with case-based reasoning for business failure prediction", *Computers & Operations Research*, 38, 409-419.
- [23] C.-T. Chen (2000) "Extensions of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment", *Fuzzy sets and systems*, 114, 1-9.
- [24] G. R. Jahanshahloo, F. H. Lotfi, and M. Izadikhah (2006) "Extension of the TOPSIS method for decision-making problems with fuzzy data", *Applied Mathematics and Computation*, 181, 1544-1551.
- [25] Y. T. İç and M. Yurdakul (2010) "Development of a quick credibility scoring decision support system using fuzzy TOPSIS", *Expert Systems with Applications*, 37, 567-574.
- [26] I. Mahdavi, N. Mahdavi-Amiri, A. Heidarzade, and R. Nourifar (2008) "Designing a model of fuzzy TOPSIS in multiple criteria decision making", *Applied Mathematics and Computation*, 206, 607-617.
- [27] C.-T. Chen, C.-T. Lin, and S.-F. Huang (2006) "A fuzzy approach for supplier evaluation and selection in supply chain management", *International journal of production economics*, 102, 289-301.
- [28] ع. احمدی، ح. کیانی، ح. زیلویی، م. خضری، (۱۳۹۳) "کاهش بیولوژیکی گوگرد معدنی از بخش دانسیته متوسط زغالسنگهای طبس"، دومین کنگره ملی زغال سنگ ایران، دانشگاه صنعتی شاهرود.
- [29] A. Ali (2015) "Characterization and Washability of Pyrite in High Sulphur Coals from Tabas, Iran", *Journal of Chemical Engineering and Chemistry Research*, 2, 457-466.
- [30] C.-H. Cheng and Y. Lin (2002) "Evaluating the best main battle tank using fuzzy decision theory with linguistic criteria evaluation", *European Journal of Operational Research*, 142, 174-186.
- [31] L. A. Zadeh (1975) "The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning—I", *Information sciences*, 8, 199-249.
- [9] L. Rintala, K. Lillkung, and J. Aromaa (2011) "The use of decision and optimization methods in selection of hydrometallurgical unit process alternatives", *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, 46, 229-242.
- [10] Y. J. Lai, T. Y. Liu, C. L. Hwang (1981) "Topsis for MODM", *European Journal of Operational Research*, 76, 3, 486-500.
- [11] K. P. Yoon and C. L. Hwang (1995) *Multiple attribute decision making, an introduction*, Vol 104, Sage publications.
- [12] M. Behzadian, S. Khanmohammadi Otaghsara, M. Yazdani, and J. Ignatius (2012) "A state-of-the-art survey of TOPSIS applications", *Expert Systems with Applications*, 39, 13051-13069.
- [13] P. V. Rao and S. S. Baral (2011) "Attribute based specification, comparison and selection of feed stock for anaerobic digestion using MADM approach", *Journal of hazardous materials*, 186, 2009-2016.
- [14] R. A. Krohling and V. C. Campanharo (2011) "Fuzzy TOPSIS for group decision making: A case study for accidents with oil spill in the sea", *Expert Systems with Applications*, 38, 4190-4197.
- [15] G. Yan, Z. Ling, and Z. Dequn (2011) "Performance evaluation of coal enterprises energy conservation and reduction of pollutant emissions base on GRD-TOPSIS", *Energy Procedia*, 5, 535-539.
- [16] M. Boix, L. Montastruc, L. Pibouleau, C. Azzaro-Pantel, and S. Domenech (2011) "A multiobjective optimization framework for multicontaminant industrial water network design", *Journal of environmental management*, 92, 1802-1808.
- [17] S. Baral, K. R. Shekar, M. Sharma, and P. Rao (2014) "Optimization of leaching parameters for the extraction of rare earth metal using decision making method", *Hydrometallurgy*, 143, 60-67.
- [۱۸] ا. علوی، ا. اکبری، م. عطایی، ه. کیادلیری (۱۳۹۰) "مقایسه روشهای TOPSIS و AHP فازی برای انتخاب و کاشت گونه های گیاهی بومی فازی (مطالعه موردی: منطقه معدنی مس سرچشمه"، مجله تحقیقات منابع طبیعی تجدید شونده، سال دوم، شماره سوم، پیاپی پنجم.
- [۱۹] ف. ا. ایراد، س. ر. ترابی، م. یاری (۱۳۹۱) "ارائه مدلی برای انتخاب روش استخراج معادن با استفاده از روشهای تصمیم گیری چند معیاره"، اولین کنگره ملی زغال سنگ.

Selection of coarse coal processing circuit using Fuzzy TOPSIS method

Mastoreh. Yousefi^{1,*}, Sayed Hasan Tabatabaei¹, Ali Ahmadi¹

1. Department of Mining Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran

ABSTRACT

Multi Criteria Decision Making (MCDM) is a suitable approach for optimizing non-linear processes. Considering various effective variables, these methods usually improve process and non-process efficiency and reduce capital and operating costs of industrial units. In this study, three coal processing circuit options including Heavy Medium Cyclone (HMC), Tri-Flow (TF) and the combined process of Tri-Flow and Bioheap leaching (CTBL) were compared to select the most suitable process for treating Tabas coarse-coals. Some critical parameters namely environmental advantages, circuit simplicity, equipment availability, capital cost, operating cost and income per ton of coal feed were chosen and weighted based on expert point of view and previous investigations. Regarding to qualitative nature of the selected criteria and their associated uncertainty, fuzzy TOPSIS multi-criteria decision-making method was used to evaluate the proposed options. It was found that the highest (0.336) and lowest (0.225) closeness coefficients for the washability of high-sulfur coarse coals of Tabas were related to the CTBL and the HMC circuits, respectively.

ARTICLE INFO

Article history:

Received in: Dec. 16, 2014

Revised from: Aug. 15, 2015

Accepted: Aug. 18, 2015

Key words:

Coal

Washability

Fuzzy TOPSIS

Tri-Flow

Bioheap Leaching

All right reserved.

* Corresponding author
m.usefi@mi.iut.ac.ir
