

## شناسایی و اولویت‌بندی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه‌ی موردی فولاد آلیاژی ایران)

حسنعلی آقاجانی<sup>۱</sup>، بهزاد صفایی<sup>۲\*</sup>، امیر باصولی<sup>۳</sup>

۱- استادیار دانشگاه مازندران، گروه مدیریت صنعتی، بابلسر، ایران

۲- کارشناس ارشد مدیریت صنعتی، دانشگاه مازندران، گروه مدیریت صنعتی، بابلسر، ایران

۳- کارشناس ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه علم و فرهنگ، گروه مهندسی صنایع، تهران، ایران

رسید مقاله: ۱۰ مهر ۱۳۹۱

پذیرش مقاله: ۹ اسفند ۱۳۹۱

### چکیده

بدون تردید فولاد یکی از کالاهای مهم و استراتژیک کشور می‌باشد. با وجود انرژی و نیروی انسانی ارزان که از مزیت‌های نسبی اقتصاد ایران عنوان می‌شود؛ ولی با استفاده نادرست از منابع، از این مزیت‌ها بهره‌مندی لازم صورت نمی‌پذیرد. هدف مقاله حاضر شناسایی و اولویت‌بندی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره با مطالعه‌ی موردی فولاد آلیاژی ایران می‌باشد. لذا در این تحقیق برای ارتقای بهره‌وری انرژی، چرخه دمینگ با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیاره تلفیق شده است. در این مدل ابتدا عوامل بالا بودن شاخص مصرف تعیین گردید. در ادامه با مطالعات کتابخانه‌ای و استفاده از نظر خبرگان، معیارها و عوامل کیفی موثر در ارزیابی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت فولاد آلیاژی ایران شناسایی شد. سپس با استفاده از پرسش‌نامه، وزن معیارهای تصمیم‌گیری به روش آنتروپی محاسبه گردید. سپس راهکارهای به دست آمده، با تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره رتبه‌بندی شده است. به دلیل مشاهده نتایج مختلف، از تکنیک‌های ادغامی برای رسیدن به رتبه‌ی نهایی استفاده گردید. مهمترین راهکارها برای اجرا در فولاد آلیاژی ایران به ترتیب کنترل دمای کوره پیشگرم، پایین آوردن درجه حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم و کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی می‌باشند.

**کلمات کلیدی:** بهره‌وری انرژی، ماتریس مدیریت انرژی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، تکنیک‌های ادغامی.

### ۱ مقدمه

انسان از دیرباز در اندیشه‌ی استفاده مؤثر و مفید از توانایی‌ها، امکانات و منابعی که در اختیار داشته، بوده؛ به گونه‌ای که محدودیت منابع همراه با افزایش نیازها و خواسته‌های بشر و رقابت شدید در عرصه‌ی تولید و فروش، توجه به بهره‌وری منابع را از اهمیت خاصی برخوردار نموده است. از طرف دیگر تصمیم‌گیری، مساله‌ای است که بشر

\* عهده دار مکاتبات

آدرس الکترونیک: behzad.safaei@gmail.com

از زمان خلقتش تاکنون با آن مواجه بوده است. با گذشت زمان همراه با پیشرفت علوم و تکنولوژی نیازهای بشر هم تغییرات شگرفی نمود [۱].

از میان منابع موجود و در اختیار بشر، انرژی همواره یکی از بحث های مهم و تعیین کننده در تمامی صنایع جهان است و میزان مصرف آن به عنوان یکی از اصلی ترین فاکتورهای تعیین کننده قیمت تمام شده محسوب می شود. مثلاً قیمت فولاد در اکرین به عنوان یکی از مدعیان این صنعت در جهان همواره متأثر از قیمت گاز وارداتی از روسیه بوده است. از طرف دیگر انرژی یکی از فاکتورهای تعیین مکان سرمایه گذاری است؛ چرا که وجود انرژی و امکان در دسترس بودن آن فاکتور اصلی جهت سرمایه گذاری، صنایع مختلف است. اهمیت موضوع، زمانی مضاعف می شود که مصرف انرژی خصوصاً به صورت فسیلی دارای آلاینده گی زیست محیطی است و در کشورهای صنعتی حتی در صورت در دسترس بودن و مقرون به صرفه بودن به خاطر ایجاد آلاینده گی با محدودیت مواجه است. کشور ایران به عنوان کشوری انرژی خیز، که منابع سرشار انرژی فسیلی، خورشیدی و بادی را در اختیار دارد به مکان مناسبی برای سرمایه گذاری های مختلف تبدیل شده است. این امر در کنار شاخص های چون اشتغال زایی و نرخ رشد صنعتی شدن، باعث گردیده که در کوتاه مدت مساله ی بهره وری انرژی تحت الشعاع قرار گیرد. صنعت فولاد به عنوان یک صنعت مادر و انرژی بر، ۵ درصد مصرف کل انرژی جهان را به خود اختصاص داده که اغلب این انرژی ها هم از سوخت های فسیلی می باشد. در حال حاضر سرانه مصرف انرژی بر حسب ژول برای تولید یک تن فولاد در ایران  $30/37$  GJ/TCS است و این در حالی است که این رقم در کشور آلمان  $17/3$  GJ/TCS و ژاپن  $19$  GJ/TCS است. ضمناً این کشورها از تجهیزات انرژی زیست محیطی نظیر غبار گرد اسید استیون کوره بلند استفاده می کنند که باعث افزایش سرانه مصرف انرژی می شود. البته در ایران کمتر به این نوع تجهیزات توجه می شود و مورد استفاده قرار می گیرد [۱]. با مقایسه متوسط مصرف انرژی کشور با مصرف انرژی جهانی می توان دریافت که در هر فرآیند تولید فولاد باید تفکر عمیق همراه با راهکارهای عملی برای نزدیک کردن مصرف انرژی به مصرف جهانی ارائه شود [۱]. با توجه به اهمیت سه موضوع بهره وری، تصمیم گیری و انرژی، در این پژوهش مدلی جهت ارتقای بهره وری در انرژی با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره ارائه شده است.

## ۲ مروری بر تحقیقات مشابه

در خصوص بهره وری انرژی مطالعات مختلفی در کشورهای گوناگون و در داخل کشور انجام پذیرفته است. نادر دشتی (۱۳۸۱) به بررسی بهره وری انرژی در صنعت سیمان پرداخته است و با استفاده از سه شاخص سولو، کندریک و ترانسلوگ، بهره وری را مورد بررسی قرار داده و راهکارهایی در جهت افزایش بهره وری انرژی ارائه نموده است [۴]. راهکارهای قابل اجرا در کارخانه سیمان شمال جهت بهینه سازی مصرف انرژی الکتریکی توسط آقایان ذبیحی، موسی خانی و نصرآبادی (۱۳۸۵) ارائه شد. این راهکارها نتیجه ی انجام ممیزی انرژی در این واحد تولیدی می باشد ولی در ادامه ی ارائه راهکارها در این تحقیق، اولویت انجام آن ها مشخص نشده است [۵] شایگان و راست گفتار (۱۳۸۵) به بهبود مصرف انرژی در صنعت کاشی و سرامیک پرداخته اند. این مقاله پس از اشاره به

فرآیند تولید محصولات کاشی و سرامیک و روش‌های ساخت کاشی، به حامل‌های انرژی در بخش‌های مختلف تولید در صنعت کاشی و سرامیک و پتانسیل صرفه‌جویی انرژی کل در این صنعت پرداخته است [۶]. مرجع بعدی مورد بررسی، اطلاعات منتشر شده شرکت میدرکس است [۷] در این گزارش مصارف ویژه‌ی تولید فولاد مذاب به روش احیای سیستم، کوره بلند و سایر روش‌های جایگزین مقایسه و آمار بهترین عملکرد جهانی در روش‌ها ارائه شده است. یکی دیگر از منابع مطالعاتی مورد بررسی در تعیین شاخص‌های مصرف انرژی صنایع فولاد، گزارش‌های سازمان انرژی ایالات متحده آمریکا است [۸]. در گزارش دیگری [۹] علاوه بر تاریخچه و تشریح جزئی فرآیند، بهترین نمونه‌های عملی، پتانسیل‌های صرفه‌جویی بر مبنای تکنولوژی موجود و تکنولوژی مدرن و نتایج پروژه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی انجام گرفته در آمریکا مطرح شده است. در مطالعه‌ی دیگر گزارش ورل و همکاران [۱۰] مورد بررسی قرار گرفت. این مجموعه به عنوان مرجع اکثر مطالعات بعدی شامل مطالب جامعی در خصوص شرح و توضیح تاریخچه، فرآیندهای تولید آهن و فولاد، آخرین تحولات تکنولوژی این عرصه، تعیین شدت مصرف تئوری فرآیندها، ارائه‌ی نمونه‌های بهینه‌ی موجود و در نهایت بررسی روش‌های افزایش بهره‌وری انرژی در کوتاه مدت و بلندمدت می‌باشد. در بررسی‌های انجام شده توسط فارلا و همکارانش [۱۱] شاخص مصرف انرژی برای مقایسه‌ی بین‌المللی با استفاده از چهار منبع مختلف مقایسه گردیده. این بررسی نشان‌دهنده اشتباهات متعددی در گزارش‌دهی اطلاعات است که مقایسه‌ها را مشکل می‌کند. همچنین در نظر گرفتن مرزهای متفاوت برای واحدها و تعریف به کار رفته برای انرژی (از جمله مواد اولیه) می‌تواند به طور مضاعف مقایسه‌ها را محدودش کند. در ادامه تحقیقاتی در زمینه افزایش بهره‌وری با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره مورد بررسی قرار گرفت. سید علی میرنژاد (۱۳۸۲) در پایان‌نامه کارشناسی ارشد خود به شناسایی و اولویت‌بندی عوامل موثر بر بهره‌وری شرکت فرآورده‌های نسوز پارس یزد با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چند معیار هدر محیط فازی پرداخته است. تکنیک‌هایی که وی در تحقیق خود به کار گرفته تاپسیس، الکتراه و لینمپ می‌باشد [۱۲]. مجتبی طواری، محمد علی سوخکیان و سیدعلی میرنژاد (۱۳۸۷) عوامل موثر را بر بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره شناسایی و اولویت‌بندی کردند. ایشان در تحقیق خود از روش‌های تاپسیس، الکتراه و SAW استفاده کرده‌اند [۱۳].

### ۳ سوالات و اهداف پژوهش

در این پژوهش سوالات پژوهشی به شرح زیر می‌باشند:

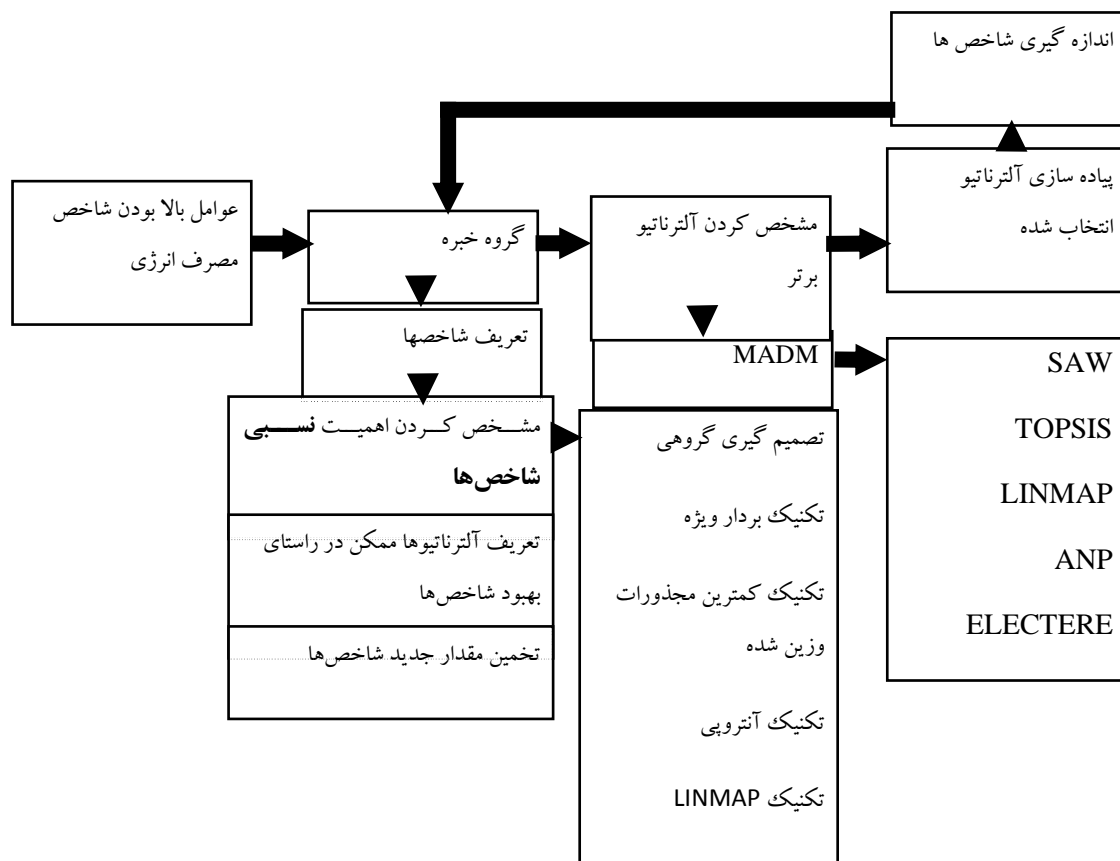
- راهکارهای بهبود مصرف انرژی از دیدگاه مدیریتی در صنعت فولاد ایران چیست؟
- راهکارهای بهبود مصرف انرژی از دیدگاه فنی در صنعت فولاد ایران چیست؟
- شاخص‌های موثر در ارزیابی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران چیست؟
- تکنیک‌های مناسب برای رتبه‌بندی راهکارهای بهبود کدامند؟
- اولویت انجام راهکارها به چه صورت می‌باشد؟

## ۴ معرفی روش و مدل تحقیق

در تحقیق حاضر با توجه به ماهیت موضوع و اهداف پژوهش از روش تحقیق (توصیفی، پیمائی) استفاده شده است. یکی از راه‌های ارتقای بهره‌وری، بهره‌گیری از مدل دمی‌نگ می‌باشد. با توجه به اهمیت تصمیم‌گیری در برنامه‌ریزی چرخه دمی‌نگ در قسمت مذکور از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره استفاده شده است. در این بررسی مدل زیر برای ارتقای بهره‌وری در یک سازمان طراحی و تعریف شده است (نمودار ۱).

در این تحقیق برای جواب به سوالات و بهبود مصرف انرژی، دو دیدگاه مدیریتی و فنی در نظر گرفته شد. در ابتدا با برگزاری جلسات مصاحبه با مدیران بخش‌های مختلف کارخانه، ماتریس مدیریت انرژی کارخانه ترسیم شد. در این بخش سوالاتی از کارمندان در مورد وضعیت موجود کارخانه از شش دیدگاه سازماندهی انرژی، سیاست انرژی، سیستم‌های اطلاعاتی انرژی، انگیزه، پیشرفت و سرمایه‌گذاری طرح شد. با تکمیل جواب‌های کارمندان وضع موجود کارخانه فولاد مشخص گردید. سپس فرآیندهای پیشنهادی مورد نیاز برای رسیدن به وضع مطلوب ارائه شد. در ادامه برای شناسایی راهکارهای بهبود از دیدگاه فنی، نتایج ممیزی انرژی و مطالعات کتابخانه‌ای در اختیار خبرگان قرار گرفت. تکنیک مورد استفاده در این بخش، روش دلفی بود. برای نیل به این مقصود، راهکارهای پیشنهادی هر یک از خبرگان تکثیر شده؛ در اختیار دیگران قرار گرفت. هر کدام از راهکارها مورد بررسی قرار گرفته و در نهایت ۲۶ راهکار به‌عنوان راهکارهای بهبود از دید فنی معرفی شد. در ادامه، شاخص‌های ارزیابی مورد بررسی قرار گرفتند. در این مرحله از یک سو نیاز به شناسایی شاخص‌های مناسب و کلیدی جهت ارزیابی راهکارها و از سویی دیگر نیاز به تعیین وزن آن‌ها بود. بدین منظور پس از مطالعه کتاب‌ها، مقالات و تحقیقات پیشین، لیستی از انواع شاخص‌ها، در اختیار گروه خبره قرار گرفت. پرسش‌نامه شامل ۷ شاخص، زمان انجام کار، استفاده از تکنولوژی موجود برای انجام راهکار، تاثیر راهکار در میزان کاهش مصرف انرژی، هزینه اجرای راهکار، نرخ برگشت سرمایه، زیرساخت‌های مورد نیاز در اجرای راهکار و میزان از کارافتادگی خط بود. با ارائه لیست مذکور به گروه خبره چهار شاخص مورد تایید خبرگان قرار گرفت. سپس لازم بود روشی مناسب جهت تعیین وزن یا اهمیت شاخص‌ها مورد استفاده قرار گیرد. با توجه به تحقیقات صورت گرفته برای تعیین وزن شاخص‌های ارزیابی از نظر خبرگان برای اجرای تکنیک آنتروپی شانون استفاده شد. به همین دلیل پرسش‌نامه‌ای طراحی شده و در اختیار خبرگان صنعت فولاد قرار گرفت. همچنین پرسش‌نامه‌ای براساس تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره طراحی شد. که در آن میزان تاثیر هر معیار در هر راهکار پرسیده شد. این پرسش‌نامه برای تکمیل ماتریس تصمیم‌گیری مورد استفاده قرار گرفت. میزان اهمیت هر شاخص را با گزینه‌های الف) خیلی مهم ب) مهم ج) اهمیت متوسط د) کم اهمیت ه) خیلی کم اهمیت تعیین گردید. پس از گردآوری پرسش‌نامه‌ها از آنجا که پاسخ‌ها به صورت اعداد کیفی بود؛ برای تبدیل به اعداد کمی قطعی از روش مقیاس دو قطبی فاصله‌ای استفاده گردید. پس از تشکیل ماتریس تصمیم‌گیری، محاسبات مربوط به تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره انجام و رتبه‌بندی راهکارها برای هر سه روش ارائه گردید.

یکی از شرایط مهم برای اینکه آزمون وسیله‌ای مطمئن برای تعیین همبستگی بین دو متغیر باشد؛ این است که قابل اعتماد و اطمینان و دارای ثبات باشد. پایایی یکی از ویژگی‌های فنی ابزار اندازه‌گیری است. مفهوم یاد شده با این امر سر و کار دارد که ابزار اندازه‌گیری در شرایط یکسان تا چه اندازه، نتایج یکسانی به دست می‌دهد. با توجه به اینکه جامعه آماری این تحقیق را برای مصاحبه، خبرگان صنعت مشتمل بر ۵ نفر تشکیل داده‌اند؛ نیاز به مصاحبه‌ی ضریب پایایی از شیوه‌های گوناگون نمی‌باشد. مفهوم روایی با این پرسش پاسخ می‌دهد که ابزار اندازه‌گیری تا چه حد خصیصه مورد نظر را می‌سنجد. بدون آگاهی از اعتبار ابزار اندازه‌گیری نمی‌توان به دقت داده‌های حاصل از آن اطمینان داشت. در بخش اولویت‌بندی راهکارها نیز از مدل‌های استاندارد موجود در تحقیق در عملیات با توجه به نوع مسأله‌ی تصمیم‌گیری استفاده شده است.



شکل ۱. مدل ارتقای بهره‌وری انرژی در یک سازمان

## ۵ مبانی نظری تحقیق

### ۵-۱ ماتریس مدیریت انرژی

برنامه‌ریزی، مهم‌ترین عنصر کلیدی مدیریت انرژی و مرحله‌ای مهم‌تر از تصمیم‌گیری است که ایده و فکر صرفه‌جویی در انرژی را با توجه به محدودیت‌های سازمان تبدیل به فعالیت‌های سازمان به صورت مجموعه‌ای منسجم و مرتبط به هم دیده شوند. یکی از راه‌های تعیین وضعیت موجود هر سازمان از نظر انرژی، معین کردن جایگاه

سازمان در ماتریس مدیریت انرژی است. سطرهای این ماتریس (از سطح ۰ تا ۴) نشان‌دهنده پیچیدگی و تکامل سازمان در قبال مدیریت موثر انرژی و ستون‌های آن در ارتباط با موضوعات کلیدی مدیریت (سیاست انرژی، سازمان‌دهی انرژی، انگیزه‌ی صرفه‌جویی در میان کارکنان، سیستم‌های اطلاعاتی انرژی، پیشرفت و سرمایه‌گذاری در امر انرژی) می‌باشد. استفاده از ماتریس مدیریت انرژی به دو دلیل زیر توصیه شده است.

۱- کمک به شناخت وضع موجود مدیریت انرژی و سیاست‌های جاری مدیریت انرژی در سازمان.

۲- کمک به سازماندهی و بهبود مدیریت انرژی در سازمان.

ماتریس مدیریت انرژی روشی ساده و سریع برای معین ساختن وضع موجود سازمان از نظر مصرف انرژی است.

## ۲-۵ تکنیک‌های تصمیم‌گیری

مسائل تصمیم‌گیری چند شاخصه خصوصاً وقتی که با مسایل بزرگ و پیچیده‌ای روبه‌رو باشیم به سادگی قابل ارزیابی نیستند؛ چرا که در فضای تصمیم‌گیری واقعی اغلب شاخص‌ها در تعارض با یکدیگرند؛ یعنی ارضای کامل یکی، مانع ارضای کامل دیگری می‌شود و در عین حال تصمیم‌گیرندگان علاقه‌مندند که تمامی این شاخص‌ها را تا حد امکان ارضا نمایند.

مدل‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه به دو دسته مدل‌های غیرجبرانی و مدل‌های جبرانی تقسیم می‌شوند:

الف - مدل غیرجبرانی:

این مدل شامل روش‌هایی می‌شود که در آن‌ها مبادله‌ی بین شاخص‌ها مجاز نیست؛ یعنی نقطه ضعف موجود در یک شاخص توسط مزیت موجود از شاخص دیگر جبران نمی‌شود. بنابراین هر شاخص در این روش‌ها، به تنهایی مطرح است و مقایسه‌ها بر اساس شاخص‌ها صورت می‌گیرد. ویژگی این مدل‌ها سادگی آن‌هاست و با محدود بودن اطلاعات تطابق دارد.

ب - مدل جبرانی

این مدل شامل روش‌هایی است که در آن‌ها مبادله در بین شاخص‌ها مجاز است؛ یعنی تغییری کوچک در یک شاخص می‌تواند با تغییری مخالف در شاخص یا شاخص‌های دیگر جبران شود.

برای انتخاب مدل مناسب لازم است که هفده مدل تصمیم‌گیری با معیارهای چندگانه مورد بررسی قرار گیرد. با توجه به اینکه شاخص‌ها و معیارهای انتخاب شده برای انتخاب و اولویت‌بندی روش‌های بهبود مصرف انرژی امکان مبادله وجود دارد مدل مورد نظر باید از بین مدل‌های جبرانی انتخاب شود. مدل‌های جبرانی به سه گروه به شرح ذیل تقسیم می‌شوند:

الف: زیرگروه نمره‌گذاری و امتیازدهی ب: زیرگروه سازشی ج: زیرگروه هماهنگ

در این تحقیق با توجه به نوع مساله و جبرانی بودن معیارها از هر سه مدل روش‌های جبرانی استفاده می‌گردد. برای نیل به این منظور از زیرگروه نمره‌گذاری و امتیازدهی روش SAW، از زیرگروه سازشی روش تاپسیس و از زیرگروه هماهنگ روش الکتراه استفاده شد.

### ۱-۲-۵ مدل SAW

یکی از ساده‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه می‌باشد. با محاسبه‌ی اوزان شاخص‌ها، می‌توان به راحتی از این روش استفاده کرد. برای استفاده از این روش، مراحل زیر ضرورت دارد. در اینجا فرض می‌شود که  $m$  گزینه و  $n$  معیار وجود دارد.

کمی کردن ماتریس تصمیم‌گیری

بی‌مقیاس‌سازی خطی مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری

ضرب ماتریس بی‌مقیاس شده ( $n_{ij}$ ) در اوزان شاخص‌ها ( $w_i$ )

انتخاب گزینه‌ی برتر ( $A^*$ ) با استفاده از معیار زیر

$$A^* = \left\{ A_i \mid \text{Max} \sum_{j=1}^n n_{ij} w_j \right\}$$

به بیان دیگر، در روش SAW گزینه‌ای انتخاب می‌شود که حاصل جمع مقادیر بی‌مقیاس شده‌ی وزنی آن، از بقیه گزینه‌ها بیشتر باشد.

### ۲-۲-۵ روش تاپسیس

این روش، هر گزینه را یک نقطه در فضا در نظر می‌گیرد. تاپسیس یک نقطه  $A^+$  و یک نقطه  $A^-$  در نظر می‌گیرد و فاصله‌ی اقلیدسی را تا این دو نقطه، محاسبه می‌نماید. در این روش، گزینه‌ای انتخاب می‌گردد که نزدیک‌ترین فاصله را تا  $A^+$  و دورترین را تا  $A^-$  داشته باشد. در ابتدا ماتریس تصمیم‌گیری را تشکیل داده؛ معیارهای کیفی به معیارهای کمی تبدیل می‌شوند. سپس ماتریس تصمیم‌گیری به نرمالیز تبدیل می‌گردد. وزن هر معیار در ستون مربوط به آن معیار، در ماتریس نرمالیز شده ضرب گردیده تا ماتریس  $V$  حاصل شود. سپس گزینه‌ی ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی ( $A^+$  و  $A^-$ )، به صورت زیر تعریف می‌گردند.

$$A^+ = \left\{ \left( \text{Max}_i v_{ij} \mid j \in J^+ \right), \left( \text{Min}_i v_{ij} \mid j \in J^- \right) \mid i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^+, v_2^+, \dots, v_n^+\}$$

$$A^- = \left\{ \left( \text{Min}_i v_{ij} \mid j \in J^+ \right), \left( \text{Max}_i v_{ij} \mid j \in J^- \right) \mid i = 1, 2, \dots, m \right\} = \{v_1^-, v_2^-, \dots, v_n^-\}$$

در ادامه فاصله هندسی تک تک گزینه‌ها نسبت به  $A^+$  و  $A^-$  به دست می‌آید و آن‌ها به ترتیب  $S_i^+$  فاصله گزینه  $i$  از گزینه  $A^+$  و  $S_i^-$  فاصله گزینه  $i$  از  $A^-$  نامیده می‌شوند.

$$S_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^+)^2} \quad S_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (v_{ij} - v_j^-)^2}$$

برای هر گزینه  $i$ ام شاخص  $C_i$  به ترتیب زیر ایجاد می‌شود. هرچه مقدار  $C_i$  برای گزینه‌ای بیشتر باشد؛ این گزینه رتبه بالاتری را نسبت به سایر گزینه‌ها خواهد داشت؛ زیرا در بدترین حالت،  $A_i$  بر روی  $A^-$  قرار دارد و

آقایان و بکاران، شناسایی و اولویت بندی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره (مطالعه موردی فولاد آلیاژی ایران)

$C_i = 0$  می شود. در بهترین حالت،  $A_i$  بر روی  $A^+$  قرار دارد و  $C_i = 1$  می شود.

$$C_i = \frac{S_i^-}{S_i^+ + S_i^-}$$

### ۵-۲-۳ روش الکترو

اساس این روش، "روابط ارجحیت" است؛ یعنی لزوماً به رتبه بندی گزینه ها منتهی نمی شود؛ بلکه ممکن است گزینه هایی را حذف کند. مراحل این الگوریتم به صورت زیر است. در اینجا فرض می شود که  $m$  گزینه و  $n$  معیار وجود دارد.

گام ۱: در این مرحله، مقادیر ماتریس تصمیم گیری مساله را با استفاده از نرم، بی مقیاس می گردد. این ماتریس  $N$  نامیده می شود.

$$N = [n_{ij}]_{m \times n}, n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\left[ \sum_{i=1}^m a_{ij} \right]^{\frac{1}{2}}}$$

گام ۲: در این مرحله، با استفاده از ماتریس  $W$  (اوزان معیارها) و رابطه زیر، "ماتریس بی مقیاس شده موزون" به دست می آید:

$$V = N \times W_{n \times n}$$

$V$  = ماتریس بی مقیاس شده موزون

$$W_{n \times n} = \text{ماتریس قطری وزن های به دست آمده برای معیارها}$$

گام ۳: در این مرحله تمامی گزینه ها، نسبت به تمام معیارها، مورد ارزیابی قرار می گیرد و مجموعه ی "ماتریس های هماهنگ و ناهماهنگ" تشکیل می شود.

مجموعه ی هماهنگ از گزینه های  $k$  و  $l$  که با  $S_{k,l}$  نشان داده می شود؛ مشتمل بر کلیه معیارهایی خواهد بود که در آن ها، گزینه ی  $A_k$  بر گزینه ی  $A_l$  به ازای آن معیارها مطلوبیت بیشتری داشته باشد. برای یافتن این مطلوبیت، باید به نوع معیارهای تصمیم گیری، از نظر داشتن جنبه مثبت یا منفی توجه شود.

یعنی:

اگر معیار مورد نظر، دارای جنبه مثبت باشد:

$$A_{k,l} = \{j \mid v_{kj} \geq v_{lj}\}, j = 1, \dots, n$$

اگر معیار، دارای جنبه منفی باشد:

$$A_{k,l} = \{j \mid v_{kj} \leq v_{lj}\}, j = 1, \dots, n$$

مجموعه ناهماهنگ  $D_{k,l}$  نیز شامل معیارهایی است که در آن ها، گزینه ی  $A_k$ ، نسبت به گزینه ی  $A_l$  مطلوبیت کمتری داشته باشد؛ یعنی:

$$D_{k,l} = \{j \mid v_{kj} < v_{lj}\}, j = 1, \dots, n$$

این فرمول، برای معیارهای مثبت است و برای معیارهای منفی به صورت زیر می‌باشد:

$$D_{k,l} = \{j \mid v_{kj} > v_{lj}\}, j = 1, \dots, n$$

گام ۴: در این مرحله، از اطلاعات فوق ماتریس هماهنگی (I) به دست می‌آید. این ماتریس، یک ماتریس مربع  $m \times m$  است که قطر اصلی آن، فاقد عنصر است. سایر عناصر این ماتریس نیز از جمع اوزان معیارهای متعلق به مجموعه هماهنگی حاصل می‌شود؛ یعنی:

$$I_{kl} = \sum_{j \in A_{k,l}} w_j$$

این معیار ( $I_{kl}$ )، بیان‌کننده اهمیت نسبی گزینه‌ی  $A_k$  نسبت به  $A_l$  است. مقدار این معیار، عددی بین صفر و یک است و هرچه این مقدار بیشتر باشد؛ بیانگر آن است که  $A_k$ ، ارجحیت بیشتری بر  $A_l$  دارد و برعکس.

گام ۵: در این مرحله "ماتریس ناهماهنگی" محاسبه گردد. این ماتریس با NI نشان‌داده می‌شود و مانند ماتریس هماهنگی، ماتریسی  $m \times m$  است. قطر اصلی این ماتریس، عنصری ندارد و سایر عناصر این ماتریس، از ماتریس بی‌مقیاس شده موزون طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند:

$$NI_{kl} = \frac{\text{Max} \mid v_{kj} - v_{lj} \mid, j \in D_{k,l}}{\text{Max} \mid v_{kj} - v_{lj} \mid, j \in J}$$

این معیار، نسبت عدم مطلوبیت مجموعه ناهماهنگی  $k$  و  $l$  را به کل ناهماهنگی در معیارها، اندازه‌گیری می‌کند.

گام ۶: در این مرحله، "ماتریس هماهنگی مؤثر" محاسبه گردد. این ماتریس با H نشان داده می‌شود. برای ایجاد این ماتریس، ابتدا باید یک حد آستانه‌ای تعیین کرد که اگر هر عنصر ماتریس I بزرگ‌تر یا مساوی آن باشد؛ آن مؤلفه در ماتریس H، مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر به خود می‌گیرد. برای تعیین حد آستانه ( $\bar{I}$ )، می‌توان از اطلاعات گذشته و نظر تصمیم‌گیرنده استفاده کرد. یک معیار عمومی برای مشخص شدن این حد، عبارت است از میانگین مقادیر ماتریس I (یعنی  $\bar{I}$ ):

$$\bar{I} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m I_{k,l} / m(m-1)$$

سپس:

$$H_{kl} = 1 \quad \leftarrow I_{kl} \geq \bar{I}$$

آقایان و همکاران، شناسایی و اولویت بندی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت با استفاده از تکنیک‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره (مطالعه موردی فولاد آلیاژی ایران)

$$H_{kl} = 0 \leftarrow I_{kl} < \bar{I}$$

این ماتریس، نشان‌دهنده‌ی ارجحیت یک گزینه بر گزینه‌ی دیگر از دید ماتریس هماهنگی موثر است. به این ترتیب که اگر  $H_{kl} = 1$  باشد؛ گزینه‌ی  $k$  برتر از  $l$  و در غیر این صورت گزینه‌ی  $l$  بهتر از  $k$  است.

گام ۷: در این مرحله نیز "ماتریس ناهماهنگی مؤثر" که با  $G$  نشان داده می‌شود؛ مانند ماتریس هماهنگی مؤثر به دست می‌آید.

حد آستانه برای این ماتریس، به صورت زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{NI} = \sum_{l=1}^m \sum_{k=1}^m NI_{kl} / m(m-1)$$

عناصر ماتریس نیز به این صورت به دست می‌آید:

$$G_{kl} = 0 \leftarrow NI_{kl} > \bar{NI}$$

$$G_{kl} = 1 \leftarrow NI_{kl} \leq \bar{NI}$$

گام ۸: در این مرحله، با ترکیب ماتریس هماهنگی مؤثر ( $H$ ) و ماتریس ناهماهنگی مؤثر ( $G$ )، "ماتریس کلی مؤثر" ( $F$ ) به دست می‌آید. محاسبه این ماتریس به صورت زیر است:

$$G_{kl} \times H_{kl} = F_{kl}$$

این ماتریس، نشان‌دهنده‌ی ترتیب برتری راهکارهای مختلف، نسبت به یکدیگر می‌باشد.

### ۳-۵ تکنیک‌های ادغام

اگر در یک مسأله‌ی واقعی، از روش‌های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه استفاده شود و این روش‌ها، رتبه بندی واحدی برای آن مسأله ارایه نکنند؛ از «روش‌های ادغام» استفاده می‌گردد. این روش‌ها عبارتند از روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش گپ‌لند.

#### ۳-۵-۱ روش بُردا

این روش، بر اساس «قاعدۀ اکثریت» استوار است و نتایج به‌دست آمده از تکنیک‌های مختلف، دوبه‌دو با هم مقایسه می‌شوند. اگر در مقایسه‌ی زوجی، رأی اکثریت وجود نداشت یا آرا با هم مساوی بود؛ درایه با  $X$  کدگذاری و در غیر این صورت با  $M$  نمایش داده می‌شود.  $M$  به منزله‌ی آن است که سطر به ستون و  $X$  نشانگر آنکه ستون بر سطر ارجحیت دارد. هر مقایسه زوجی به صورت جداگانه مورد بررسی قرار می‌گیرد. تعداد مقایسات، برابر  $\frac{m(m-1)}{2}$  است که  $m$  تعداد گزینه است. معیار اولویت در این روش، آن است که در چند دفعه، «بُردهای» گزینه (یعنی  $M$ ) در سطر دارای اکثریت است.

### ۵-۳-۲ روش کپلند

این روش، با پایان روش بُردا شروع می‌شود. و نه فقط تعداد «بُردها» بلکه تعداد «باخت‌ها» را هم برای هر گزینه محاسبه می‌کند. امتیازی که کپلند به هر گزینه می‌دهد؛ با کم کردن تعداد باخت‌ها ( $\sum R$ ) از تعداد بردها ( $\sum C$ ) محاسبه می‌شود.

### ۵-۴ روش آنتروپی

آنتروپی در نظریه اطلاعات یک معیار عدم اطمینان است که به وسیله توزیع احتمال مشخص  $P_i$  بیان می‌شود. اندازه گیری این عدم اطمینان به وسیله شانون به صورت ذیل بیان شده است:

$$E_i = S(P_1, P_2, \dots, P_n) = -M \sum_{i=1}^n P_i \ln P_i, \quad i = 1, 2, \dots, n$$

در این رابطه  $M$  یک مقدار ثابت است. از آنجا که رابطه‌ی فوق در محاسبات آماری مورد استفاده است؛ به نام آنتروپی توزیع احتمال  $P_{ij}$  نامیده می‌شود. واژه‌های آنتروپی و عدم اطمینان در یک مفهوم به کار می‌روند. زمانی که  $P_i$  با یکدیگر مساوی باشند (برای تمام مقادیر  $i$  و  $j$ ) در این صورت  $P_i = \frac{1}{n}$ .

در یک ماتریس تصمیم‌گیری،  $P_{ij}$  می‌تواند برای ارزیابی گزینه‌های مختلف به کار رود. در ماتریس تصمیم‌گیری  $n$  گزینه و  $k$  شاخص وجود دارد. نتایج این ماتریس برای شاخص  $j$ ام به شرح ذیل است:

$$P_{ij} = \frac{f_j(a_i)}{\sum_{i=1}^n f_j(a_i)}, \quad j = 1, 2, \dots, n.$$

آنتروپی  $E_j$  به این صورت محاسبه می‌شود:

$$E_j = -M \sum_{i=1}^n P_{ij} \ln P_{ij}, \quad \forall j$$

و  $M$  به عنوان مقدار ثابت به این ترتیب محاسبه می‌گردد:

$$M = \frac{1}{\ln n}$$

که مقدار  $E_j$  را بین صفر و یک نگه می‌دارد.

در ادامه مقدار درجه انحراف ( $d_j$ ) محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص  $j$ ام چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم‌گیری در اختیار تصمیم‌گیرنده قرار می‌دهد. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده شاخصی به یکدیگر نزدیک‌تر باشد؛ نشان‌دهنده‌ی آن است که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند؛ لذا نقش آن شاخص در تصمیم‌گیری باید به همان اندازه کاهش یابد بنابراین:

$$d_j = 1 - E_j, \quad \forall j$$

سپس مقدار وزن ( $W_j$ ) محاسبه می‌گردد:

آقایان و همکاران، شناسایی و اولویت بندی راهکارهای بهبود مصرف انرژی در صنعت با استفاده از تکنیک های تصمیم گیری چندمعیاره (مطالعه موردی فولاد آلیاژی ایران)

$$W_j = \frac{d_j}{\sum_{j=1}^k d_j}, \quad \forall j$$

## ۵-۵ روش دلفی

روش های متعددی برای موثر کردن تصمیم گیری گروهی نظیر توفان مغزی، روش دلفی و تکنیک گروه اسمی وجود دارد. تکنیک معروف و متداولی که از آن برای ایجاد خلاقیت و نوآوری در تصمیم گروهی استفاده می شود؛ توفان مغزی است. در این تحقیق برای جمع آوری نظرات گروه خبره از روش دلفی استفاده می شود.

مراحل روش دلفی به صورت زیر می باشد:

مرحله ۱: هر یک از اعضای گروه به طور مستقل و مخفیانه عقیده و نظر را با راه حل که درباره موضوع تصمیم گیری دارد؛ می نویسد.

مرحله ۲: نظرات فردی به صورت کیفی به یک ایستگاه مرکزی ارسال می گردد و در آنجا گردآوری و تکثیر می شوند.

مرحله ۳: برای هر عضو نظرات جمع آوری شده فرستاده می شود.

مرحله ۴: هر عضو درباره نظرات دیگران اظهار عقیده می کند و هر فکر جدیدی را که احتمالاً در اثر آگاهی از عقاید دیگران در او به وجود آمده باشد؛ می نویسد و نتیجه را به ایستگاه مرکزی برمی گرداند.

مراحل ۲ تا ۴ آن قدر تکرار می گردد تا اتفاق آرا به دست آید.

## ۶ تحلیل نتایج در فولاد آلیاژی ایران

شرکت فولاد آلیاژی ایران از بزرگ ترین تولید کنندگان انواع فولاد آلیاژی در ایران و خاورمیانه و یکی از مدرن ترین کارخانه های فولاد آلیاژی دنیا با ظرفیت تولید سالیانه ۱۴۰,۰۰۰ تن در فاز اول و ۲۰۰,۰۰۰ تن در فاز دوم می باشد.

### ۶-۱ شناسایی راهکارهای بهبود از دیدگاه مدیریتی

اولین گام در بهبود بهره وری انرژی در شرکت فولاد آلیاژی ایران از دیدگاه مدیریتی، تدوین سیاست ها و اهداف شرکت در زمینه انرژی، ایجاد ساختار مناسب مدیریت انرژی در سازمان، ایجاد انگیزش کارکنان در صرفه جویی انرژی، آگاه سازی پرسنل از برنامه های انرژی سازمان، ایجاد سیستم های اطلاعات انرژی، ممیزی مستمر انرژی در تمام بخش های سازمان و آموزش کارکنان در زمینه های انرژی می باشد. برای نیل به این مقصود ابتدا جایگاه فولاد آلیاژی ایران در ماتریس مدیریت انرژی تعیین گردید (جدول ۱).

## جدول ۱. جایگاه کارخانه فولاد آلیاژی ایران در ماتریس مدیریت انرژی

جایگاه	شرح
۲	سیاست انرژی
۱	سازماندهی انرژی
۲	انگیزه
۳	سیستم‌های اطلاعاتی انرژی
۲	پیشرفت
۲	سرمایه‌گذاری

با توجه به اینکه در سطح ۲ سه عامل کلیدی سازمان شامل سیاست انرژی، انگیزه انرژی و سرمایه‌گذاری در رابطه با انرژی قرار دارد و دو عامل دیگر یکی در سطح ۳ و دیگری در سطح ۱ قرار دارند؛ آن‌ها به سطح ۲ منتقل می‌گردند که هر ۶ عامل کلیدی را در سطح ۲ ماتریس متوازن، تشکیل می‌دهند.

بر اساس جدول ماتریس مدیریت انرژی در سطح ۲ این گونه سازمان‌ها، مدیران ارشد به اهمیت انرژی واقف شده اما در عمل تعهد لازم و کافی را به بهینه‌سازی مصرف انرژی نداشته یا از فعالیت‌های واحد مدیریت انرژی اطلاعی ندارند و از فعالیت‌های واحد مدیریت انرژی حمایت لازم را نمی‌کنند. کارکنان انرژی زیر نظر بخش فنی می‌باشند و گزارش‌هایی به کمیته‌ای که متشکل از افراد دیگر سازمان است؛ ارایه می‌کنند به همین دلیل اثر بخشی مدیریت انرژی در عمل بسیار محدود است.

در ادامه، استراتژی‌های سازمان با استفاده از مدل SWOT با مشخص نمودن نقاط قوت، ضعف، تهدیدات و فرصت‌ها به دست آمده که شامل استراتژی‌های کلان و خرد سازمان می‌باشد. در استراتژی‌های کلان و خرد فولاد آلیاژی ایران مشاهده گردید که به طور مشخص، استراتژی بهینه‌سازی انرژی عنوان نشده است.

لذا جهت ایجاد ساختار مناسب در مدیریت انرژی فولاد آلیاژی موارد ذیل با توجه به اصول مدیریت انرژی جهت بهبود بهره‌وری انرژی در کارخانه پیشنهاد می‌گردد:

سازماندهی منابع مدیریت، معرفی مدیر انرژی، آماده‌سازی سیاست‌های یکپارچه مدیریت انرژی، ایجاد پایش مصرف انرژی و سیستم گزارش‌دهی، انجام آگاه‌سازی کارکنان و برنامه‌های آموزشی، شناسایی تکنولوژی فرصت‌های صرفه‌جویی انرژی، اجرای پروژه بر مبنای نتایج ممیزی، گزارش و مرور نتایج، مرور سالیانه.

## ۶-۲ شناسایی راهکارهای بهبود از دیدگاه فنی

بر اساس نظرات گروه خبره با استفاده از روش دلفی، راهکارهای بهبود مصرف انرژی با تقسیم‌بندی خط تولید فولاد آلیاژی ایران به چهار قسمت انرژی بر کوره‌های قوس الکتریکی، کوره‌های پیشگرم، سیستم پمپاژ و آبرسانی و سیستم هوای فشرده، شناسایی و تحلیل شده است. با شناخت عوامل گوناگون بالا بودن مصرف انرژی، راهکارها به صورت زیر تعریف شده است:

۱- کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب. ۲- انجام تغییر و نگهداری

پیشگیرانه به موقع و منظم کوره‌ها و سیستم ابزار دقیق آن. ۳- استفاده از مشعل‌های بازیاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش. ۴- بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند و بهبود مصرف انرژی با به‌کارگیری سیستم نرم‌افزاری مناسب. ۵- پایین آوردن دمای تخلیه. ۶- پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب. ۷- تزریق اکسیژن کافی. ۸- ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی. ۹- حذف ریسیر کولاسیون بیهوده در سیستم‌های پمپاژ. ۱۰- کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم. ۱۱- بازیافت حرارت از بخش جابه‌جایی. ۱۲- کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی. ۱۳- کنترل دمای کوره پیشگرم. ۱۴- استفاده از کمپرسورها با بازده بالا. ۱۵- کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده. ۱۶- خنک‌سازی هوا در ورودی. ۱۷- انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم. ۱۸- استفاده از درایور متغیر. ۱۹- پایین آوردن درجه حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم. ۲۰- بازیافت حرارت در سیستم هوای فشرده. ۲۱- تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده. ۲۲- کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم. ۲۳- پیش‌گرم کردن قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی. ۲۴- تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب. ۲۵- کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم. ۲۶- استفاده از راه‌انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی.

### ۶-۳ شناسایی شاخص‌های ارزیابی

اولین گام برای تعیین اولویت راهکارهای بهبود، شناسایی شاخص‌ها برای ارزیابی آن‌ها می‌باشد. با مطالعه و بررسی تحقیقات پیشین هفت شاخص به صورت زیر برای خبرگان صنعت فولاد معرفی گردید:

زمان انجام کار، استفاده از تکنولوژی موجود برای انجام راهکار، تاثیر راهکار در میزان کاهش مصرف انرژی، هزینه اجرای راهکار.

در ادامه وزن شاخص‌ها با استفاده از جدول تصمیم‌گیری به روش آنتروپی به دست می‌آید. اهمیت نسبی شاخص‌ها به صورت زیر می‌باشد (جدول ۲).

جدول ۲. وزن شاخص‌های تصمیم‌گیری

وزن	شاخص
۰/۳۲۹۷۳۷۶	زمان انجام کار
۰/۱۱۸۱۴۵۷	استفاده از تکنولوژی موجود برای انجام راهکار
۰/۳۱۳۲۵۲۳	تاثیر راهکار در میزان کاهش مصرف انرژی
۰/۲۷۶۴۴۳۵	هزینه اجرای راهکار

### ۶-۴ اولویت‌بندی راهکارها به روش ELECTRE

با توجه به ماتریس تصمیم‌گیری و اهمیت نسبی شاخص‌ها، اولویت انجام راهکارها به روش ELECTRE به صورت زیر می‌باشد (جدول ۳).

جدول ۳. اولویت انجام راهکارها به روش ELECTRE

اولویت انجام	شرح
۱	کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی
۲	کنترل دمای کوره پیشگرم
۳	خنک‌سازی هوا در ورودی
۴	پایین آوردن درجه‌ی حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم
۵	پایین آوردن دمای تخلیه
۶	پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب
۷	استفاده از کمپرسورها با بازدهی بالاسیستم پمپاژ و آبرسانی
۸	انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم
۹	پیشگرم کردن قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی
۱۰	ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی
۱۱	حذف ریسیر کولاسیون بیهوده در سیستم‌های پمپاژ
۱۲	کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم
۱۳	تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب
۱۴	انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به موقع و منظم کوره‌ها و سیستم ابزار دقیق آن
۱۵	استفاده از راه‌انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی
۱۶	کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب
۱۷	بازیافت حرارت از بخش جابه‌جایی
۱۸	کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم
۱۹	بازیافت حرارت در سیستم هوای فشرده
۲۰	کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم
۲۱	بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند
۲۲	استفاده از درایور متغیر
۲۳	تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده
۲۴	استفاده از مشعل‌های بازیاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش
۲۵	تزریق اکسیژن کافی
۲۶	کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده

۶-۵ اولویت‌بندی راهکارها به روش TOPSIS

در گام بعدی اولویت انجام راهکارها با توجه به شاخص‌های مورد نظر، طبق روش TOPSIS محاسبه گردید. اولویت انجام راهکارها به روش TOPSIS به صورت زیر می‌باشد (جدول ۴).

جدول ۴. اولویت انجام راهکارها به روش TOPSIS

اولویت انجام	شرح
۱	پایین آوردن درجهی حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم
۲	باز یافت حرارت در سیستم هوای فشرده
۳	کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم
۴	انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم
۵	کنترل دمای کوره پیشگرم
۶	کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب
۷	تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب
۸	پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب
۹	استفاده از مشعل های باز یاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش
۱۰	تزریق اکسیژن کافی
۱۱	کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده
۱۲	بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند
۱۳	ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی
۱۴	استفاده از کمپرسورها با بازده بالا سیستم پمپاژ و آبرسانی
۱۵	استفاده از دراپور متغیر
۱۶	پایین آوردن دمای تخلیه
۱۷	انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به موقع و منظم کوره ها و سیستم ابزار دقیق آن
۱۸	پیشگرم کردن قراضه در کوره های قوس الکتریکی
۱۹	حذف ریسیر کولاسیون بهبوده در سیستم های پمپاژ
۲۰	کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم
۲۱	خنک سازی هوا در ورودی
۲۲	باز یافت حرارت از بخش جابه جایی
۲۳	کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی
۲۴	تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده
۲۵	استفاده از راه انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی
۲۶	کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم

۶-۶ اولویت بندی راهکارها به روش SAW

در گام بعدی اولویت انجام راهکارها با توجه به شاخص های مورد نظر، طبق روش SAW محاسبه گردید. اولویت انجام راهکارها به روش SAW به صورت زیر می باشد (جدول ۵).

جدول ۵. اولویت انجام راهکارها به روش SAW

اولویت انجام	شرح
۱	کنترل دمای کوره پیشگرم
۲	کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی
۳	تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده
۴	پیشگرم کردن قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی
۵	پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب
۶	ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی
۷	کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم
۸	خنک‌سازی هوا در ورودی
۹	پایین آوردن درجه حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم
۱۰	کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده
۱۱	باز یافت حرارت از بخش جابه‌جایی
۱۲	بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند
۱۳	انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به موقع و منظم کوره‌ها و سیستم ابزار دقیق آن
۱۴	پایین آوردن دمای تخلیه
۱۵	استفاده از راه‌انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی
۱۶	استفاده از مشعل‌های بازیاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش
۱۷	تزریق اکسیژن کافی
۱۸	باز یافت حرارت در سیستم هوای فشرده
۱۹	کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب
۲۰	کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم
۲۱	تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب
۲۲	استفاده از درایور متغیر
۲۳	حذف ریسیر کولاسیون بی‌هوده در سیستم‌های پمپاژ
۲۴	کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم
۲۵	استفاده از کمپرسورها با بازده بالا سیستم پمپاژ و آبرسانی
۲۶	انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم

۶-۷ ادغام

با توجه به رتبه‌های متفاوت به دست آمده از روش‌های مختلفی که در بالا از آن‌ها استفاده شد؛ باید برای اجماع در رتبه‌بندی یکی از روش‌های ادغام را که عبارتند از روش میانگین رتبه‌ها، روش بردا و روش کپلند است؛ استفاده نمود.

## ۶-۷-۱ روش بردا

این روش ادغامی بر اساس قاعده اکثریت استوار است. اولویت انجام راهکارها به روش بردا به صورت زیر می‌باشد. مراحل انجام شده برای رسیدن به اولویت نهایی توسط تکنیک بردا در ضمیمه آمده است (جدول ۶).

جدول ۶. اولویت انجام راهکارها به روش ادغام بردا

اولویت انجام	شرح
۱	کنترل دمای کوره پیشگرم
۲	کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی
۳	پایین آوردن درجه‌ی حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم
۴	پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب
۵	خنک‌سازی هوا در ورودی
۶	ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی
۷	پیشگرم کردن قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی
۸	انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم
۹	پایین آوردن دمای تخلیه
۱۰	کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب
۱۱	بازیافت حرارت در سیستم هوای فشرده
۱۲	تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب
۱۳	انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به موقع و منظم کوره‌ها و سیستم ابزار دقیق آن
۱۴	کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم
۱۵	بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند
۱۶	کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده
۱۷	بازیافت حرارت از بخش جابه‌جایی
۱۸	استفاده از کمپرسورها با بازده بالاسیستم پمپاژ و آبرسانی
۱۹	کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم
۲۰	استفاده از راه‌انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی
۲۱	استفاده از مشعل‌های بازیاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش
۲۲	حذف ریسیر کولاسیون بیهوده در سیستم‌های پمپاژ
۲۳	تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده
۲۴	تزریق اکسیژن کافی
۲۵	کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم
۲۶	استفاده از درایور متغیر

## ۶-۷-۲ روش کپلند

این روش ادغامی، با پایان روش بردا شروع گردد. در این روش تعداد باخت‌ها نیز در نظر گرفته می‌شود. اولویت انجام راهکارها به روش کپلند به صورت زیر می‌باشد (جدول ۷).

جدول ۷. اولویت انجام راهکارها به روش ادغام کپلند

اولویت انجام	شرح
۱	کنترل دمای کوره پیشگرم
۲	پایین آوردن درجه‌ی حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم
۳	کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی
۴	پایین آوردن تعداد توقفات برای پایین آوردن زمان ذوب
۵	خنک‌سازی هوا در ورودی
۶	پیشگرم کردن قراضه در کوره‌های قوس الکتریکی
۷	ایجاد سرباره پفکی در کوره قوس الکتریکی
۸	انتخاب صحیح کمپرسور با توجه به سیستم
۹	پایین آوردن دمای تخلیه
۱۰	تفکیک قراضه و فشرده کردن آن به منظور کاهش زمان ذوب
۱۱	کنترل دقیق فرآیند ذوب با استفاده از نصب سیستم نسبت پارامترهای فرآیند ذوب
۱۲	بازیافت حرارت در سیستم هوای فشرده
۱۳	انجام تعمیر و نگهداری پیشگیرانه به موقع و منظم کوره‌ها و سیستم ابزار دقیق آن
۱۴	کاهش افت حرارتی از کوره پیشگرم
۱۵	کاهش فشار تولیدی در سیستم هوای فشرده
۱۶	بررسی مداوم تغییرات مصرف انرژی الکتریکی با هدف تنظیم متغیرهای فرآیند
۱۷	استفاده از کمپرسورها با بازده بالا سیستم پمپاژ و آبرسانی
۱۸	بازیافت حرارت از بخش جابه‌جایی
۱۹	کنترل فشار کوره و جلوگیری از نفوذ هوای سرد به داخل کوره پیشگرم
۲۰	استفاده از راه‌انداز نرم در سیستم پمپاژ و آبرسانی
۲۱	تعمیر و نگهداری سیستم هوای فشرده
۲۲	استفاده از مشعل‌های بازیاب برای حرارت کوره و کاهش دمای خروجی از دودکش
۲۳	حذف ریسیر کولاسیون بیهوده در سیستم‌های پمپاژ
۲۴	تزریق اکسیژن کافی
۲۵	کاهش هوای اضافی در کوره پیشگرم
۲۶	استفاده از درایور متغیر

## ۷ نتیجه گیری و آرایه پیشنهادات

از آنجا که تصمیم گیری در خصوص ارتقای بهره‌وری از مسایل مهم صنعت می‌باشد و از طرفی پارامترهای مختلفی و متفاوتی در این فرآیند دخیل می‌باشند؛ استفاده از روش‌های تصمیم‌گیری و اولویت‌بندی راهکارهای بهبود از اهمیت زیادی برخوردار است. در این پژوهش مدلی برای ارتقای بهره‌وری انرژی آرایه شده است. در این مدل با شناخت عوامل بالا بودن مصرف انرژی نسبت به شناخت شاخص‌ها و آرایه راهکارهای بهبود اقدام شده است. روش دلفی برای جمع‌آوری نظر خبرگان معرفی شد. سپس با توجه به نوع مساله که از زیرگروه جبرانی می‌باشد تکنیک‌های SAW، تاپسیس و الکتراه را برای اولویت‌بندی راهکارها انتخاب کرده؛ در نهایت رتبه راهکارهای به‌دست آمده و پتانسیل بهبود هر کدام مشخص شده است. با توجه به متفاوت بودن نتایج در اولویت بندی راهکارها، از تکنیک‌های ادغامی استفاده گردید. در این مرحله نیز هر ۲ روش ادغامی بردا و کپلند به کار رفت. در نهایت اولویت انجام راهکارها از ادغام نتایج به دست آمد. با توجه به اهمیت بحث انرژی در صنعت فولاد، مطالعه موردی در این پژوهش صنعت فولاد می‌باشد. راهکارهای بهبود در این صنعت در دو دیدگاه مدیریتی و فنی به‌دست آمد. در دیدگاه فنی با توجه به اختلاف ماتریس مدیریت انرژی در وضع موجود با مطلوب، راهکارهایی آرایه گردید. از این دیدگاه با استفاده از ممیزی انرژی و نظرات گروه خبره راهکارهای بهبود معرفی شد. در ادامه با توجه به نیازمند بودن راهکارها به منابع محدود نظیر زمان و هزینه، اولویت انجام آن‌ها مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا شاخص‌ها موثر با استفاده از تحقیقات پیشین و نظرات گروه خبره معرفی گردید. سپس با تکنیک‌های مناسب رتبه‌ی انجام هر کدام مشخص شد. در نهایت با استفاده از تکنیک‌های ادغامی، رتبه-بندی نهایی برای راهکارها به‌دست آمد. با توجه به دقت بیشتر تکنیک کپلند، رتبه‌بندی به‌دست آمده برای راهکارهای بهبود مصرف انرژی از روش کپلند مناسب‌تر می‌باشد. مهم‌ترین راهکارها برای اجرا به ترتیب کنترل دمای کوره پیشگرم، پایین آوردن درجه‌ی حرارت تختال خروجی کوره پیشگرم و کاهش مصرف غیر ضروری آب در قوس الکتریکی می‌باشند. در آخر پیشنهاد می‌گردد که راهکارهای معرفی شده بر طبق اولویت انجام برنامه‌ریزی گردد.

## منابع

- [۱] گروه مدیریت انرژی موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی، (۱۳۸۶). ترازنامه هیدروکربورهای کشور ۱۳۸۴. موسسه مطالعات بین‌المللی انرژی.
- [۲] آذر، ع.، رجب‌زاده، ع.، (۱۳۸۱). تصمیم‌گیری کاربردی (رویکرد MADM). نشر نگاه دانش، تهران.
- [۳] اصغرپور، م. ج.، (۱۳۸۱). تصمیم‌گیری چند معیاره. موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، تهران.
- [۴] دشتی، ن.، (۱۳۸۱). بررسی بهره‌وری انرژی در صنایع انرژی بر. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۵] ذبیحی، ع.، موسی‌خانی، ا.، نصرآبادی، م.، (۱۳۸۵). بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی در واحد خشک‌سيمان شمال. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی.
- [۶] شایگان، ج.، راست‌گفتار، ح.، (۱۳۸۵). بهبود مصرف انرژی در صنعت کاشی و سرامیک کشور. اولین کنفرانس بین‌المللی مدیریت و برنامه‌ریزی انرژی.

- [۱۲] میرنژاد، س.، ع.، (۱۳۸۲). شناسایی و رتبه بندی عوامل موثر بر بهره‌وری فرآورده‌های نسوز پارس با استفاده از تکنیک تصمیم‌گیری چندمعیاره. پایان‌نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.
- [۱۳] طواری، م.، سوخکیان، م.، میرنژاد، س.، ع.، (۱۳۸۷). شناسایی و اولویت‌بندی عوامل موثر بر بهره‌وری نیروی انسانی با استفاده از تکنیک MCDM. نشریه مدیریت صنعتی، ۱(۱)، ۷۱.
- [7] Anderson, O. S. H., (2000). Greaa steel makng with the Midrex and fastmet processes, MIDREX TECHNOLOGES.
- [8] Worrell, E., Price, L., Martin, N., Farla, J., Schaeffer, R., (1997). Energy indicators, Energy policy, 25, 727-744.
- [9] Stabbles, J., (2002). Energy use in U.S. steel Industry, An Historical Perspective and Future Opportunities, steel Industry conditions, Mason, Ohio.
- [10] Worrell, E., Price, L., Martin, N., (2001). Energy efficiencg and carbon dioxide emissions reduction oportuntiosin the us Iran and steel sector. Energy 26, 513-516.
- [11] Farla, J. C. M., Blok, K., (2002). Industrial lorg-term agreements on energy efficiency in the Nether lands. A critical assessment of the monintoring methodologies and quantitative results .I cleaner production 10, 165-187.