مجله تحقیق در عملیات و کاربردهای آن، سال دهم، شماره دوم (پیاپی ۳۷)، تابستان ۹۲، ص ص ۲۱-۱
شاپا ۷۲۸۶-۲۲۵۱

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

حسنعلی آقاجانی[۱]، بهزاد صفایی*[۲]، امیر باصولی[۳]
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 آورن 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 گونه ای 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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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 بحث‌های مهم و تعیین‌کننده در تمامی صنایع جهان است و میزان مصرف آن به عنوان یکی از اصلی‌ترین فاکتورهای تعیین‌کننده قیمت تمام‌شده محسوب می شود. مثلاً قیمت فولاد در اکراین 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 سرمایه‌گذاری است؛ چرا که وجود انرژی و امکان در دسترس بودن آن فاکتور اصلی جهت سرمایه‌گذاری، صنایع مختلف است. اهمیت موضوع، زمانی مضاعف می‌شود که مصرف انرژی خصوصاً به صورت فسیلی دارای آلایندگی زیست محیطی است و در کشورهای صنعتی حتی در صورت در دسترس بودن و مقرون به صرفه بودن به‌خاطر ایجاد آلایندگی با محدودیت مواجه است.کشور ایران به عنوان کشوری انرژی‌خیز، که منابع سرشار انرژی فسیلی، خورشیدی و بادی را در اختیار دارد به مکان مناسبی برای سرمایه‌گذاری‌های مختلف تبدیل شده است. این امر در کنار شاخص‌های چون اشتغال‌زایی و نرخ رشد صنعتی شدن، باعث گردیده که در کوتاه‌مدت مساله‌ی بهره‌وری انرژی تحت‌الشعاع قرار گیرد. صنعت فولاد به عنوان یک صنعت مادر و انرژی‌بر، ۵ درصد مصرف کل انرژی جهان را به خود اختصاص داده که اغلب این انرژی‌ها هم از سوخت های فسیلی می‌باشد. در حال حاضر سرانه مصرف انرژی برحسب ژول برای تولید یک تن فولاد در ایران GJ/TCS ۳۰/۳۷ است و این در حالی است که این رقم درکشور آلمان GJ/TCS ۱۷/۳ و ژاپن GJ/TCS ۱۹ است. ضمناً این کشورها از تجهیزات انرژی زیست محیطی نظیر غبار گرد اسید اسیتون کوره بلند استفاده می‌کنند که باعث افزایش سرانه مصرف انرژی می‌شود. البته در ایران کمتر به این نوع تجهیزات توجه می‌شود و مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با مقایسه متوسط مصرف انرژی کشور با مصرف انرژی جهانی می‌توان دریافت که در هر فرآیند تولید فولاد باید تفکر عمیق همراه با راهکارهای عملی برای نزدیک کردن مصرف انرژی به مصرف جهانی ارایه شود [۱]. با توجه به اهمیت سه موضوع بهره‌وری، تصمیم‌گیری و انرژی، در این پژوهش مدلی جهت ارتقای بهره‌وری در انرژی با استفاده از تکنیک‌های تصمیم گیری چندمعیاره ارایه شده است.

۲ مروری بر تحقیقات مشابه

در خصوص بهره‌وری انرژی مطالعات مختلفی در کشورهای گوناگون و در داخل کشور انجام پذیرفته است. نادر دشتی (۱۳۸۱) به بررسی بهره‌وری انرژی در صنعت سیمان پرداخته است و با استفاده از سه شاخص سولو، کندریک و ترانسلوگ، بهره‌وری را مورد بررسی قرار داده و راهکارهایی در جهت افزایش بهره‌وری انرژی ارایه نموده است [۴]. راهکارهای قابل اجرا در کارخانه سیمان شمال جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی توسط آقایان ذبیحی، موسی خانی و نصرآبادی (۱۳۸۵) ارایه شد. این راهکارها نتیجه‌ی انجام ممیزی انرژی در این واحد تولیدی می‌باشد ولی در ادامه‌ی ارایه راهکارها در این تحقیق، اولویت انجام آن‌ها مشخص نشده است [۵] شایگان و راست‌گفتار (۱۳۸۵) به بهبود مصرف انرژی در صنعت کاشی و سرامیک پرداخته‌اند. این مقاله پس از اشاره به

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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 ارایه شده است. یکی دیگر از منابع مطالعاتی مورد بررسی در تعیین شاخص‌های مصرف انرژی صنایع فولاد، گزارش‌های سازمان انرژی ایالات متحده آمریکاست [۸]. در گزارش دیگری [۹] علاوه بر تاریخچه و تشریح جزیی 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، ارایه‌ی 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 درگزارش‌دهی 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 مخدودش 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، الکتره 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، الکتره 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؟

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

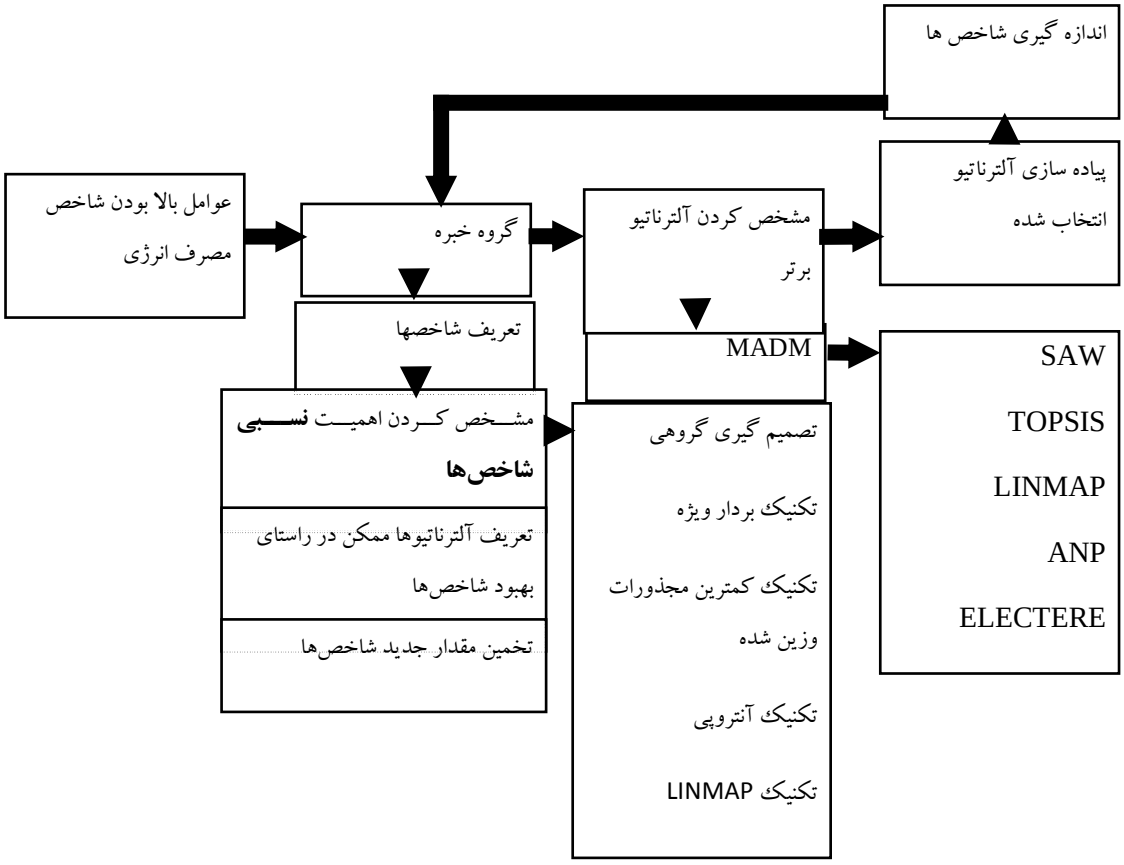
٤ معرفی روش و مدل تحقیق

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، سیستم های اطلاعاتی انرژی، انگیزه، پیشرفت و سرمایه‌گذاری طرح شد. با تکمیل جواب های کارمندان وضع موجود کارخانه فولاد مشخص گردید. سپس فرآیندهای پیشنهادی مورد نیاز برای رسیدن به وضع مطلوب ارایه 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 مطالعه‌ی 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 ارایه 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 چند معیاره 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 ارایه گردید.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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 مساله‌ی تصمیم‌گیری استفاده شده است.



شکل ۱. مدل ارتقای بهره‌وری انرژی در یک سازمان

۵ مبانی نظری تحقیق

۵-۱ماتریس مدیریت انرژی

برنامه‌ریزی، مهم‌ترین عنصر کلیدی مدیریت انرژی و مرحله‌ای مهم‌تر از تصمیم‌گیری است که ایده و فکر صرفه جویی 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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

سازمان در ماتریس مدیریت انرژی است. سطرهای این ماتریس (از سطح ۰ تا ۴) نشان‌دهنده‌ی 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

مسایل 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 الکتره استفاده شد.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

۵-۲-۱ 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

$$A^* = \left\{ A_i \;\middle|\; Max \sum_{j=1}^{n} n_{ij} w_j \right\}$$

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

۵-۲-۲ 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 کمّی تبدیل می‌شوند. سپس ماتریس تصمیم‌گیری به نرمالیز تبدیل می‌گردد. وزن هر معیار در ستون مربوط به آن معیار، در ماتریس نرمالیزشده ضرب گردیده تا ماتریس V حاصل شود. سپس گزینه‌ی ایده‌آل مثبت و ایده‌آل منفی (A^+ و A^-)، به صورت زیر تعریف می‌گردند.

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

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

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.

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

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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

$C_i = ۰$ می‌شود. در بهترین حالت، A_i بر روی A^+ قرار دارد و $C_i = ۱$ می‌شود.

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

۵-۲-۳ روش الکتره

اساس این روش، "روابط ارجحیت" است؛ یعنی لزوماً به رتبه‌بندی گزینه‌ها منتهی نمی‌شود؛ بلکه ممکن است گزینه‌هایی را حذف کند. مراحل این الگوریتم به صورت زیر است. در اینجا فرض می‌شود که m گزینه و n معیار وجود دارد.

گام ۱: در این مرحله، مقادیر ماتریس تصمیم‌گیری مساله را با استفاده از نرم، بی‌مقیاس می‌گردد. این ماتریس N نامیده می‌شود.

$$N = [n_{ij}]_{m\times n}, n_{ij} = \frac{a_{ij}}{\left[\sum_{i=۱}^{m} a_{ij}^{۲}\right]^{۱/۲}}$$

گام ۲: در این مرحله، با استفاده از ماتریس W (اوزان معیارها) و رابطه زیر، "ماتریس بی‌مقیاس شده موزون" به دست می‌آید:

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

V= ماتریس بی‌مقیاس شده موزون

$W_{n\times n}$= ماتریس قطری وزن‌های به دست آمده برای معیارها

گام ۳: در این مرحله تمامی گزینه‌ها، نسبت به تمام معیارها، مورد ارزیابی قرار می‌گیرد و مجموعه‌ی "ماتریس‌های هماهنگ و ناهماهنگ" تشکیل می‌شود.

مجموعه‌ی هماهنگ از گزینه‌های k و l که با $S_{k,l}$ نشان داده می‌شود؛ مشتمل بر کلیه معیارهایی خواهد بود که در آن‌ها، گزینه‌ی A_k بر گزینه‌ی A_l به ازای آن معیارها مطلوبیت بیشتری داشته باشد. برای یافتن این مطلوبیت، باید به نوع معیارهای تصمیم‌گیری، از نظر داشتن جنبه مثبت یا منفی توجه شود.

یعنی:

اگر معیار موردنظر، دارای جنبه مثبت باشد:

$$A_{k,l} = \{j \mid v_{kj} \geq v_{lj}\},\ j = ۱,...,n$$

اگر معیار، دارای جنبه منفی باشد:

$$A_{k,l} = \{j \mid v_{kj} \leq v_{lj}\},\ j = ۱,...,n$$

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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

$$D_{k,l} = \{ j \mid v_{kj} < v_{lj} \},\ j = ۱,...,n$$

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

$$D_{k,l} = \{ j \mid v_{kj} > v_{lj} \},\ j = ۱,...,n$$

گام ۴: در این مرحله، از اطلاعات فوق ماتریس هماهنگ (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 هماهنگ حاصل می‌شود؛ یعنی:

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

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 هماهنگ، ماتریسی $m \times m$ است. قطر اصلی این ماتریس، عنصری ندارد و سایر عناصر این ماتریس، از ماتریس بی‌مقیاس‌شده موزون طبق رابطه‌ی زیر به دست می‌آیند:

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

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

گام ۶: در این مرحله، "ماتریس هماهنگ مؤثر" محاسبه گردد. این ماتریس با نماد 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 این‌صورت مقدار صفر به خود می‌گیرد. برای تعیین حد آستانه ($\bar{I}$)، می‌توان از اطلاعات گذشته و نظر تصمیم‌گیرنده استفاده کرد. یک معیار عمومی برای مشخص‌شدن این حد، عبارت است از میانگین مقادیر ماتریس I (یعنی $\bar{I}$):

$$\bar{I} = \sum_{l=۱}^{m} \sum_{k=۱}^{m} I_{k,l} \ / m(m-۱)$$

سپس:

اگر $I_{kl} \geq \bar{I} \rightarrow H_{kl} = ۱$

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

$$H_{kl} = ۰ \leftarrow I_{kl} < \bar{I} \quad \text{اگر}$$

این ماتریس، نشان‌دهنده‌ی ارجحیت یک گزینه بر گزینه‌ی دیگر از دید ماتریس هماهنگ موثر است. به این ترتیب که اگر $H_{kl} = ۱$ باشد؛ گزینه‌ی k برتر از l و در غیراین‌صورت گزینه‌ی l بهتر از k است.

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

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

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

عناصر ماتریس نیز به این صورت به دست می‌آید:

$$G_{kl} = ۰ \leftarrow NI_{kl} > \overline{NI} \quad \text{اگر}$$

$$G_{kl} = ۱ \leftarrow NI_{kl} \leq \overline{NI} \quad \text{اگر}$$

گام ۸: در این مرحله، با ترکیب ماتریس هماهنگ مؤثر (H) و ماتریس ناهماهنگ 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.

۵-۳ تکنیک‌های ادغام

اگر در یک مساله‌ی واقعی، از روش های مختلف تصمیم‌گیری چند شاخصه استفاده شود و این روش‌ها، رتبه بندی واحدی برای آن مساله ارایه نکنند؛ از «روش‌های ادغام» استفاده می‌گردد. این روش‌ها عبارتند از روش میانگین رتبه‌ها ، روش بُردا و روش کُپ‌لند.

۵-۳-۱ روش بُردا

این روش، بر اساس «قاعده 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 این‌صورت 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 $\frac{m(m-۱)}{۲}$ 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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

۵-۳-۲ روش کُپ‌لند

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 کُپ‌لند به هر گزینه می‌دهد؛ با کم کردن تعداد باخت‌ها ($\sum R$) از تعداد بردها ($\sum C$) محاسبه می‌شود.

۵-٤ روش آنتروپی

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

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

در این رابطه Mیک 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 $P_i = 1/n$.

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 jام به شرح ذیل است :

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

آنتروپی E_j به این صورت محاسبه می‌شود:

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

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 jام 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:

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

سپس مقدار وزن (W_j) محاسبه می‌گردد:

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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

۵-۵ روش دلفی

روش‌های 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 می‌شود؛ توفان مغزی است. در این تحقیق برای جمع‌آوری نظرات گروه خبره از روش دلفی استفاده می‌شود.

مراحل روش دلفی به صورت زیر می‌باشد:

مرحله ۱: هر یک از اعضای گروه به طور مستقل و مخفیانه عقیده و نظر را با راه‌حل که درباره موضوع تصمیم‌گیری دارد؛ می‌نویسد.

مرحله ۲: نظرات فردی به صورت کیفی به یک ایستگاه مرکزی ارسال می‌گردد و در آنجا گردآوری و تکثیر می‌شوند.

مرحله ۳: برای هر عضو نظرات جمع‌آوری شده فرستاده می‌شود.

مرحله ۴: هر عضو درباره نظرات دیگران اظهار عقیده می‌کند و هر فکر جدیدی را که احتمالاً در اثر آگاهی از عقاید دیگران در او به وجود آمده باشد؛ می‌نویسد و نتیجه را به ایستگاه مرکزی برمی‌گرداند.

مراحل ۲تا۴ آن‌قدر تکرار می‌گردد تا اتفاق آرا به دست آید.

٦ تحلیل نتایج در فولاد آلیاژی ایران

شرکت فولاد آلیاژی ایران از بزرگ‌ترین تولید کنندگان انواع فولاد آلیاژی در ایران و خاورمیانه و یکی از مدرن‌ترین کارخانه‌های فولادآلیاژی دنیا با ظرفیت تولید سالیانه ۱۴۰,۰۰۰ تن در فاز اول و ۲۰۰,۰۰۰ تن در فاز دوم می‌باشد.

٦-۱ شناسایی راهکارهای بهبود از دیدگاه مدیریتی

اولین گام در بهبود بهره‌وری انرژی در شرکت فولادآلیاژی ایران از دیدگاه مدیریتی، تدوین سیاست‌ها و اهداف شرکت در زمینه‌ی انرژی، ایجاد ساختار مناسب مدیریت انرژی در سازمان، ایجاد انگیزش کارکنان در صرفه جویی انرژی، آگاه‌سازی پرسنل از برنامه‌های انرژی سازمان، ایجاد سیستم‌های اطلاعات انرژی، ممیزی مستمر انرژی در تمام بخش‌های سازمان و آموزش کارکنان در زمینه‌های انرژی می‌باشد. برای نیل به این مقصود ابتدا جایگاه فولاد آلیاژی ایران در ماتریس مدیریت انرژی تعیین گردید (جدول ۱).

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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

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

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 این‌گونه 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 انرژی‌بر 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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

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 ریسیرکولاسیون 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 کمپرسرها 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 آورن 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.

٦-٣ 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

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

٦-٤ 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).

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

جدول۳. اولویت انجام راهکارها به روش ELECTRE

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

۶-۵ اولویت‌بندی راهکارها به روش TOPSIS

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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

جدول ٤. اولویت انجام راهکارها به روش TOPSIS

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

٦-٦ اولویت‌بندی راهکارها به روش SAW

در گام بعدی اولویت انجام راهکاها با توجه به شاخص‌های مورد نظر، طبق روش SAW محاسبه گردید. اولویت انجام راهکارها به روش SAW به صورت زیر می‌باشد (جدول ۵).

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

جدول ۵. اولویت انجام راهکارها به روش SAW

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

۶-۷ ادغام

با توجه به رتبه‌های متفاوت به‌دست 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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

٦-٧-١ 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 ٦. اولویت انجام راهکارها به روش ادغام بردا

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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

٦-۷-۲ 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

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

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

۷ نتیجه‌گیری و ارایه پیشنهادات

از آنجا که تصمیم‌گیری 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 ارایه شده است. در این مدل با شناخت عوامل بالا بودن مصرف انرژی نسبت به شناخت شاخص‌ها و ارایه 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 الکتره 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، مطالعه‌ی موردی در این پژوهش صنعت فولاد می‌باشد.راهکارهای بهبود در این صنعت در دو دیدگاه مدیریتی و فنی به‌دست‌آمد. در دیدگاه فنی با توجه به اختلاف ماتریس مدیریت انرژی در وضع موجود با مطلوب، راهکارهایی ارایه 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 هرکدام مشخص شد. در نهایت با استفاده از تکنیک‌های ادغامی، رتبه-بندی نهایی برای راهکارها به‌دست آمد. با توجه به‌دقت 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 آورن 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 بین المللی انرژی، (۱۳۸۶). ترازنامه هیدروکربورهای کشور ۱۳۸۴. موسسه مطالعات بین المللی 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 بهروری انرژی در صنایع انرژی بر. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس.

[۵] ذبیحی، ع.، موسی خانی، ا.، نصرآبادی، م.، (۱۳۸۵).بهینه‌سازی مصرف انرژی الکتریکی در واحد خشک سیمان 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.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]

[۱۲] میرنژاد، س.، ع.، (۱۳۸۲). شناسایی و رتبه‌بندی عوامل موثر بر بهره‌وری فرآورده‌های نسوز پارس با استفاده از تکنیک تصمیم گیری 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). Greea 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 opportunrtiosin 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 l0, 165-187.

[Downloaded from jamlu.lahijan.iau.ir on 2026-11-02]