

بهینه‌سازی انرژی در صنایع انرژی‌بر با رویکرد اقتصاد مهندسی: مطالعه موردی بهره‌وری در شرکت‌های بین‌المللی

رضا رفیعی^۱، آرمین ثابت‌قدم اصفهانی^۲، یگانه داود بیگی^۳، سید محمود لطیفی^۴

۱. مدیرعامل، شرکت گاز استان هرمزگان، بندرعباس، ایران

۲. مدرس، گروه مهندسی ایمنی و بازرسی فنی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی شیمی، دانشکده مهندسی شیمی و نفت، دانشگاه هرمزگان، بندرعباس، ایران

۴. کارشناسی ارشد، گروه مهندسی خوردگی و حفاظت مواد، پردیس دریاساحلی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، بندرعباس، ایران

آدرس پست الکترونیک نویسنده مسئول مکاتبات: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir

مقاله علمی-ترویجی

صفحه ۹ - ۳۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۱۲/۰۷

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۷/۲۱

چکیده

این پژوهش با رویکرد اقتصاد مهندسی، راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در صنایع انرژی‌بر را بررسی می‌کند و چالش‌های ناترازی گاز را در شرکت‌های بین‌المللی با چشم‌انداز توسعه نتایج برای حوزه انرژی ایران تحلیل می‌نماید. مطالعه موردی چهار شرکت پیشرو (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل) همراه با بررسی تطبیقی در صنعت فولاد ایران، نشان داد که ترکیبی از همکاری چندجانبه (دولت، بخش خصوصی و نهادهای انرژی)، سرمایه‌گذاری هدفمند در فناوری‌های بهینه‌ساز، توسعه نیروی انسانی متخصص و مدل‌های عددی بهینه‌سازی (مانند برنامه‌ریزی خطی و الگوریتم‌های فراابتکاری)، نقش کلیدی در کاهش شدت مصرف انرژی تا ۳۰ درصد و هزینه‌های عملیاتی ایفا می‌کند. به‌عنوان مثال، سیمپلوت با به‌کارگیری طراحی آزمایشی (DOE) و مشارکت در برنامه ENERGY STAR، کاهش ۱۸ درصدی مصرف انرژی در فرآیندهای غذایی را محقق کرد، در حالی که جنرال موتورز با بهینه‌سازی خطوط تولید، ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را ثبت نمود. چالش اصلی در ناترازی گاز، تطبیق راهکارهای بهره‌وری انرژی با فناوری‌های نوین (مانند خودروهای الکتریکی و هیدروژن سبز) و ادغام مدل‌های محاسباتی در فرآیندهای محلی مانند احیای مستقیم آهن (DRI) در ایران بود که پتانسیل کاهش وابستگی به گاز طبیعی را تا ۲۰-۳۰ درصد فراهم می‌آورد. یافته‌ها حاکی از آن است که این اقدامات نه تنها بازدهی مالی کوتاه‌مدت (با نرخ بازده داخلی ۱۵ درصد) دارد، بلکه از طریق کاهش ردپای کربن، تقویت امنیت انرژی و کاربرد مدل‌های هیبریدی جهانی-منطقه‌ای، به توسعه پایدار صنایع کمک می‌کند. نتایج بر ضرورت تبدیل تجربیات موفق به استانداردهای صنعتی یکپارچه و ادغام آن‌ها در سیستم‌های HSE برای مدیریت کارآمد ناترازی گاز تأکید می‌کنند.

کلید واژه‌ها: بهره‌وری انرژی، ناترازی گاز، صنایع انرژی‌بر، توسعه پایدار





۱. مقدمه

صنایع مختلف به دلیل ماهیت فرآیندهای تولیدی خود، با چالش‌های منحصربه‌فردی در مصرف انرژی روبرو هستند. صنایع انرژی بر به‌عنوان یکی از اصلی‌ترین مصرف‌کنندگان منابع انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای در چالش‌های جهانی نظیر تغییرات اقلیمی، ناترازی انرژی و افزایش هزینه‌های تولید ایفا می‌کنند. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی^۱ در سال ۲۰۲۴، بخش صنعت مسئول بیش از ۳۷ درصد از مصرف انرژی جهانی و سهم قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است. این آمار، ضرورت بازنگری در الگوهای مصرف انرژی و اتخاذ راهکارهای مبتنی بر اقتصاد مهندسی را بیش از پیش آشکار می‌سازد. در این میان، مسئله ناترازی گاز به‌عنوان یکی از چالش‌های کلیدی در صنایع انرژی بر مطرح می‌شود که ناشی از عدم تطابق بین عرضه و تقاضا، محدودیت‌های زیرساختی و نوسانات بازار است. این پدیده نه تنها امنیت انرژی را تهدید می‌کند، بلکه هزینه‌های عملیاتی را افزایش داده و رقابت‌پذیری صنایع را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

در دهه‌های اخیر، رویکرد اقتصاد مهندسی با تمرکز بر بهینه‌سازی هزینه‌ها و بازدهی منابع، به‌عنوان چارچوبی مؤثر برای حل چالش‌های انرژی در صنایع مختلف شناخته شده است. این رویکرد، ترکیبی از تحلیل‌های فنی-اقتصادی، فناوری‌های نوین و مدیریت یکپارچه منابع را شامل می‌شود که هدف نهایی آن دستیابی به توسعه پایدار از طریق کاهش شدت مصرف انرژی و همسویی با اهداف زیست‌محیطی است. مطالعات پیشین نشان داده‌اند که پیاده‌سازی برنامه‌های بهره‌وری انرژی در صنایع، می‌تواند تا ۳۰ درصد از مصرف انرژی و انتشار کربن بکاهد [۱-۳]، اما موفقیت این برنامه‌ها مستلزم غلبه بر موانعی نظیر مقاومت در برابر تغییر فناوری، کمبود سرمایه‌گذاری و نبود استانداردهای صنعتی است [۴]. بهره‌وری انرژی^۲ به معنای استفاده از انرژی به بهینه‌ترین روش ممکن است، به‌گونه‌ای که اتلاف انرژی به حداقل برسد و مصرف منابع اولیه کاهش یابد. این مفهوم، انجام فعالیت‌های بیش‌تر با مصرف انرژی کم‌تر را ممکن می‌سازد و اهمیت آن از چندین عامل کلیدی نشئت می‌گیرد:

- افزایش قیمت حامل‌های انرژی و تأثیر آن بر هزینه‌های تولید.
- نیاز به تأمین امنیت انرژی در برابر نوسانات بازار و

بحران‌های ژئوپلیتیک (مانند اختلالات زنجیره تأمین نفت و گاز).

- ضرورت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای برای مقابله با تغییرات اقلیمی.

- ایجاد فرصت‌های شغلی در بخش فناوری‌های سبز (مانند اشتغال‌زایی در حوزه بهینه‌سازی ساختمان‌ها).

مقاله حاضر با بررسی تجربیات چهار شرکت بین‌المللی پیشرو در حوزه انرژی (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل)، به تحلیل راهکارهای عملیاتی برای مقابله با ناترازی گاز و بهبود بهره‌وری انرژی می‌پردازد. این شرکت‌ها با تکیه بر سه محور اصلی شامل همکاری چندجانبه (همراهی دولت، شرکت‌های خدمات عمومی و بخش خصوصی)، سرمایه‌گذاری هدفمند در پروژه‌های پر بازده، و توانمندسازی نیروی انسانی، موفق به کاهش چشم‌گیر هزینه‌های انرژی و افزایش رقابت‌پذیری شده‌اند. برای نمونه، جنرال موتورز با اختصاص بودجه سالانه ۲۰ میلیون دلاری به بهینه‌سازی خطوط تولید، ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی را محقق کرده است، در حالی که اینتل با ادغام سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی، مصرف مراکز داده خود را در حدود ۳۰ درصد کاهش داده است.

۲. اهمیت بهره‌وری انرژی در جهان امروز

در جهان امروز، بهره‌وری انرژی تحت تأثیر مستقیم نوسانات قیمت حامل‌های انرژی و بحران‌های ژئوپلیتیک قرار دارد. همان‌طور که در شکل ۱-الف نشان داده شده است، بررسی روند تاریخی قیمت نفت خام و سایر حامل‌های انرژی در کنار رویدادهای مهم سیاسی و اقتصادی، نشان می‌دهد که شوک‌های ژئوپلیتیک نقش تعیین‌کننده‌ای در جهش‌های قیمتی و بی‌ثباتی بازار انرژی داشته‌اند. برای تکمیل این تصویر، شکل ۱-ب داده‌های به‌روزشده قیمت حامل‌های انرژی را تا سال ۲۰۲۴ بر اساس منابع رسمی نشان می‌دهد که بیانگر تداوم نوسانات شدید در دهه ۲۰۱۰ و اوایل دهه ۲۰۲۰ و تأثیر رویدادهای اخیر بر بازار انرژی است. این دو نمودار در کنار هم ضرورت استفاده از رویکردهای مبتنی بر بهره‌وری انرژی و اقتصاد مهندسی را برای کاهش آسیب‌پذیری صنایع انرژی‌بر در برابر شوک‌های بیرونی برجسته می‌کنند. بررسی روند تاریخی قیمت حامل‌های انرژی (به‌ویژه نفت خام) نشان می‌دهد که پس از سال ۱۹۷۹

1. International Energy Agency (IEA)

2. Energy Efficiency

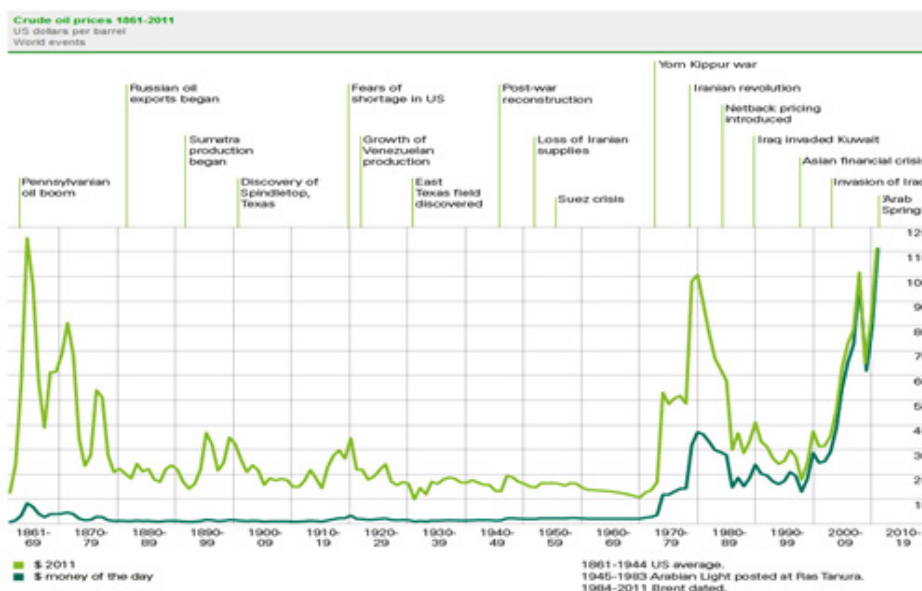
(مصادف با انقلاب اسلامی ایران)، همبستگی بین بحران‌های ژئوپلیتیک و نوسانات قیمت نفت و گاز به شدت افزایش یافته است. پیش از این تاریخ، وابستگی تغییرات قیمت انرژی تحت تأثیر بحران‌های بین‌المللی کمتر بود، چرا که بخش عمده منابع انرژی در اختیار کشورهای غربی قرار داشت؛ اما خروج ذخایر انرژی ایران و ونزولا از بازارهای غربی، وابستگی کشورهای غربی به منابع محدودتر را افزایش داد و رقابت بر سر دسترسی به این منابع را به یک مسئله استراتژیک تبدیل کرد. سه عامل کلیدی این تغییر را توضیح می‌دهد:

۱. کاهش دسترسی به منابع انرژی: خروج ایران از بازار انرژی غرب، وابستگی کشورها به ذخایر محدودتر را افزایش داد.

۲. رشد صنعتی کشورهای در حال توسعه: ورود کشورهایی مانند چین و هند به عرصه صنعت، مصرف جهانی انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش داده است.

۳. رقابت استراتژیک بر سر منابع: محدودیت منابع انرژی و افزایش تقاضا، رقابت ژئوپلیتیک را به عاملی تعیین کننده در قیمت‌گذاری حامل‌های انرژی تبدیل کرده است.

نمونه بارز این وابستگی در جنگ اوکراین مشاهده گردید، جایی که اختلال در تأمین گاز اروپا منجر به کاهش رشد صنعتی، تورم بی‌سابقه و چالش‌های امنیتی شد. این بحران‌ها نشان می‌دهد که تأمین پایدار انرژی نه تنها یک ضرورت اقتصادی، بلکه یک ابزار استراتژیک برای حفظ ثبات اجتماعی و توسعه پایدار است.



(الف)



(ب)

شکل ۱. الف) روند تاریخی قیمت حامل‌های انرژی همراه با رویدادهای ژئوپلیتیک و شوک‌های اصلی بازار. ب) روند به‌روزشده قیمت حامل‌های انرژی تا سال ۲۰۲۴ بر اساس داده‌های رسمی اخیر



۳. تأثیر بهینه‌سازی انرژی بر توسعه پایدار

بهینه‌سازی انرژی نه تنها مصرف منابع را کاهش می‌دهد، بلکه به عنوان موتور محرکی برای دستیابی به اهداف چند بعدی توسعه عمل می‌کند. در ادامه، مهم‌ترین تأثیرات آن بر جنبه‌های مختلف توسعه بررسی می‌شود:

• ارزش افزوده^۱

بهینه‌سازی انرژی باعث کاهش چشم‌گیر مصرف منابع در فرآیندهای تولید، هزینه‌های استخراج، بهره‌برداری و تبدیل مواد اولیه می‌شود. این رویکرد به معنای تولید همان محصول با انرژی کمتر است که دو پیامد کلیدی دارد: کاهش هزینه‌های عملیاتی از طریق کمینه‌سازی نیاز به سوخت و منابع و کاهش رد پای زیست‌محیطی با حفظ خروجی تولید در عین کاهش حجم انرژی مصرفی. این فرآیند نه تنها سودآوری را افزایش می‌دهد، بلکه با آزادسازی منابع مالی، زمینه را برای سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین و توسعه محصولات پایدار فراهم می‌کند. در نهایت، ارزش افزوده ناشی از بهینه‌سازی انرژی، رقابت‌پذیری و جذابیت سرمایه‌گذاری بلندمدت را تقویت می‌نماید.

• مزاد مصرف‌کننده^۲

کاهش هزینه‌های تولید ناشی از بهینه‌سازی انرژی، قیمت نهایی محصولات را کاهش می‌دهد. این کاهش قیمت، قدرت خرید مصرف‌کنندگان را بهبود می‌بخشد و تقاضا برای کالاها را افزایش می‌دهد. به عنوان مثال، اگر هزینه تولید یک کالا یک میلیون تومان باشد و با سود ۱۰۰ درصدی به دو میلیون تومان برسد، بهینه‌سازی انرژی می‌تواند هزینه تولید را به هشتصد هزار تومان کاهش دهد و قیمت فروش را به یک میلیون و ششصد هزار تومان برساند. این امر نه تنها رضایت مشتری را افزایش می‌دهد، بلکه سودآوری شرکت را نیز حفظ می‌کند.

• مقرون به صرفه بودن انرژی^۳

قیمت‌گذاری انرژی در محدوده تاب‌آوری اقتصادی بازار،

از تشدید نابرابری‌ها جلوگیری می‌کند. بهینه‌سازی انرژی با کاهش هزینه‌های استخراج و مصرف، حاشیه امنیت قیمت را گسترش می‌دهد. این امر به شرکت‌ها اجازه می‌دهد محصولات را بدون تحمیل فشار اقتصادی بر خانوارهای کم‌درآمد عرضه کنند و دسترسی به انرژی پایدار را بهبود بخشند. برای نمونه، کاهش ۳۵ درصدی هزینه برق برای خانوارهای کم‌درآمد می‌تواند فقر انرژی را به طور چشم‌گیری کاهش دهد.

• ذخیره انرژی^۴

کاهش مصرف انرژی برای تولید یک محصول مشخص، امکان ذخیره منابع انرژی را فراهم می‌کند. این انرژی ذخیره شده می‌تواند در تولید محصولات جدید یا مقابله با بحران‌های احتمالی استفاده شود.

• امنیت انرژی^۵

بهینه‌سازی انرژی، وابستگی به منابع خارجی را کاهش می‌دهد و تأمین پایدار انرژی را تضمین می‌کند. برای مثال، اگر در شرایط فعلی برای تولید ۲۰ هزار مگاوات برق به ۱۰۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز نیاز باشد، با بهینه‌سازی می‌توان همان میزان برق را با ۶۰۰۰۰۰۰ مترمکعب گاز تولید کرد. این کاهش وابستگی، ثبات اقتصادی و ژئوپلیتیکی را تقویت می‌کند.

• بهره‌وری سازمانی^۶

کاهش هزینه‌های انرژی، سودآوری شرکت‌ها را افزایش می‌دهد و امکان گسترش خطوط تولید یا ورود به بازارهای جدید را فراهم می‌کند. این افزایش بهره‌وری نه تنها به توسعه محصولات کمک می‌کند، بلکه از طریق ایجاد شغل‌های تخصصی در حوزه‌های فناوری و مهندسی، اشتغال‌زایی می‌نماید.

• کاهش تغییرات اقلیمی^۷

مصرف کمتر سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ را کاهش می‌دهد. برای نمونه، بهبود راندمان نیروگاه‌ها می‌تواند انتشار کربن را به میزان قابل توجهی کاهش دهد.

1. Asset Value
2. Consumer Surplus
3. Energy Affordability & Poverty Alleviation
4. Energy Savings
5. Energy Security
6. Enterprise Productivity
7. Climate Change Mitigation

- سازگاری با قیمت‌های انرژی^۱
بهینه‌سازی انرژی به شرکت‌ها و خانوارها اجازه می‌دهد باوجود افزایش قیمت حامل‌های انرژی، هزینه‌های خود را مدیریت کنند. برای مثال، کاهش ۱۵ درصدی مصرف انرژی در یک شرکت، افزایش ۴۰ درصدی قیمت انرژی را به افزایش ۲۵ درصدی هزینه‌ها تبدیل می‌کند. این انعطاف‌پذیری، ثبات مالی را در بلندمدت تضمین می‌نماید.

- دستیابی به اهداف توسعه^۲
ترکیب کاهش هزینه‌ها، افزایش رضایت مشتری، ثبات قیمتی و امنیت انرژی، بستری ایده‌آل برای جذب سرمایه‌گذاری و اجرای پروژه‌های کلان ایجاد می‌کند. این امر به توسعه زیرساخت‌ها، آموزش و بهداشت منجر شده و چرخه مثبت رشد اقتصادی را تقویت می‌نماید.

- مدیریت منابع^۳
کاهش مصرف انرژی، عمر منابع طبیعی را افزایش می‌دهد و امکان انتقال آن‌ها به نسل‌های آینده را فراهم می‌کند.

- بودجه عمومی^۴
درآمدهای مالیاتی ناشی از توسعه صنعتی، بودجه پروژه‌های عمرانی را افزایش می‌دهد. این منابع می‌تواند صرف ساخت مدارس، بیمارستان‌ها و خطوط ریلی پرسرعت شود که بهبود کیفیت زندگی و رفاه اجتماعی را در پی دارد.

- تأثیرات کلان^۵
کاهش مصرف انرژی به صرفه‌جویی در هزینه‌های استخراج، بهره‌برداری، تولید و توزیع منجر می‌شود. این صرفه‌جویی می‌تواند به‌عنوان منبع مالی برای ساخت و توسعه زیرساخت‌های مختلف، از جمله تکمیل چرخه تولید، توسعه خطوط ریلی و همچنین در حوزه‌های آموزشی، بهداشتی و حمل‌ونقل مورد استفاده قرار گیرد.

- مزایای اجتماعی و بهداشتی^۶
کاهش آلاینده‌های هوا ناشی از مصرف بهینه انرژی،

سلامت عمومی را تقویت می‌کند. برای نمونه، کاهش ذرات PM ۲/۵ می‌تواند موارد بیماری‌های تنفسی در کودکان را کاهش دهد.

- منافع تأمین‌کنندگان انرژی^۷
کاهش تقاضای انرژی از طریق بهینه‌سازی، فشار بر شبکه‌های توزیع را کم می‌کند و امکان سرمایه‌گذاری در فناوری‌های تجدیدپذیر را فراهم می‌نماید. این امر به ایجاد تعادل بین عرضه و تقاضا و پایداری سیستم انرژی کمک می‌کند.

- اشتغال‌زایی^۸
رعایت مجموع موارد فوق، چون منجر به توسعه در تمامی ابعاد و زیرساخت‌ها می‌شود، اشتغال‌زایی را نیز ایجاد خواهد نمود که به رفع یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های اجتماعی کمک خواهد کرد.

بهینه‌سازی انرژی و بهبود در تمامی ابعاد زیرساختی، به‌طور طبیعی منجر به ایجاد فرصت‌های شغلی می‌شود. این اشتغال‌زایی که خود یکی از بزرگ‌ترین چالش‌های اجتماعی است، به تقویت اقتصاد و بهبود کیفیت زندگی افراد کمک می‌کند.

(شکل ۲)، خلاصه‌ای از عوامل مؤثر بر بهره‌وری انرژی به‌صورت تصویری نشان داده شده است.



شکل ۲. عوامل مؤثر بر بهبود بهره‌وری انرژی

1. Energy Prices
2. Development Goals
3. Resource Management
4. Public Budgets
5. Macro Impacts
6. Health and Social Benefits
7. Energy Provider Benefits
8. Job Creation



۴. موانع کلیدی در پیاده‌سازی بهره‌وری انرژی

پیاده‌سازی راهکارهای بهینه‌سازی انرژی با چالش‌های ساختاری و فرهنگی متعددی روبرو است که مهم‌ترین آن‌ها عبارتند از:

۱. عدم آگاهی عمومی و ریسک‌های درک شده.

نبود دانش کافی در سطح جامعه و صنایع درباره مزایای بلندمدت بهره‌وری انرژی، یکی از موانع اصلی است. بسیاری از ذینفعان، کاهش مصرف انرژی را صرفاً یک هزینه اضافی می‌پندارند، در حالی که این اقدام یک سرمایه‌گذاری استراتژیک با بازدهی قطعی است. برای مثال، تصور نادرست از «بازدهی فوری» باعث می‌شود پروژه‌هایی با دوره بازگشت سرمایه ۳ تا ۵ سال مورد استقبال قرار نگیرند. راهکار این چالش، اجرای برنامه‌های آموزشی هدفمند و استفاده از رسانه‌ها برای تبلیغ تأثیر بهینه‌سازی انرژی بر کاهش تورم و بهبود کیفیت زندگی است.

۲. تعارض در اولویت‌های سرمایه‌گذاری.

صنایعی که با فناوری‌های فرسوده فعالیت می‌کنند، اغلب به دلیل هزینه‌های بالای جایگزینی تجهیزات، در بهینه‌سازی فرآیندها مقاومت نشان می‌دهند. برای نمونه، خطوط تولیدی که چند دهه بدون به‌روزرسانی کار کرده‌اند، نه تنها انرژی بیشتری مصرف می‌کنند، بلکه بهره‌وری کلی را کاهش می‌دهند. حل این مسئله نیازمند سیاست‌های حاکمیتی هوشمند است:

- تشویق مالیاتی: اعطای معافیت‌ها یا تخفیف‌های مالیاتی به شرکت‌هایی که استانداردهای بهره‌وری انرژی را رعایت می‌کنند.
- اعمال جریمه‌های هدفمند: الزام صنایع به پرداخت مالیات مضاعف در صورت عدم رعایت قوانین انرژی.

۳. فقدان الگوبرداری از بهترین تجربیات

نبود استانداردهای صنعتی و شاخص‌های قابل‌اندازه‌گیری، برنامه‌ریزی برای بهینه‌سازی انرژی را دشوار می‌کند. برای مثال، بسیاری از شرکت‌ها نمی‌دانند از کجا شروع کنند یا چگونه عملکرد خود را با رقبای مقایسه کنند. راه‌حل، توسعه بانک داده‌های صنعتی است که شامل موارد زیر باشد:

- مطالعه موردی مصرف انرژی برای صنایع مختلف.

- دستورالعمل‌های گام‌به‌گام برای اجرای پروژه‌های کم‌هزینه و پربازده.

- مطالعات موردی موفق از شرکت‌های پیشرو در حوزه بهره‌وری انرژی.

۴. عدم دسترسی به فناوری‌های پیشرفته.

در برخی کشورها، فقدان فناوری‌های کارآمد (مانند سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی یا تجهیزات کم‌مصرف) مانع بزرگی است. این چالش تنها از طریق تقویت همکاری بین‌المللی و حمایت از شرکت‌های دانش‌بنیان رفع می‌شود. برای مثال، سرمایه‌گذاری در پژوهش‌های کاربردی برای تولید کمپرسورهای هوای فشرده با راندمان بالا یا توسعه نرم‌افزارهای شبیه‌ساز مصرف انرژی، می‌تواند شکاف فناوری را کاهش دهد.

برخی تصورات نادرست، پذیرش راهکارهای بهینه‌سازی انرژی را با مانع روبه‌رو می‌سازند. نخست، انتظار بازدهی فوری از سوی برخی سرمایه‌گذاران است که گمان می‌کنند بهبود بهره‌وری انرژی باید بلافاصله سودآوری ایجاد کند، در حالی که بسیاری از پروژه‌های این حوزه نیازمند دوره بازگشت سرمایه چند ساله هستند و اثرات بلندمدت آن‌ها اغلب نادیده گرفته می‌شود. از سوی دیگر، باوری کاذب وجود دارد که افزایش ساعت کاری یا اعمال فشار کاری بیشتر بر پرسنل را معادل بهبود بهره‌وری کلی می‌پندارد. این نگرش نه تنها نادرست است، بلکه مانعی برای پیاده‌سازی فناوری‌های هوشمند و کاهش اتلاف انرژی محسوب می‌شود. در واقع، بهره‌وری سیستماتیک زمانی محقق می‌شود که تمرکز اصلی بر بهینه‌سازی فرآیندها و استفاده از راهکارهای نوین باشد.

۵. بخش‌های کلیدی مصرف انرژی در صنایع

صنایع انرژی‌بر عمدتاً در بخش‌های زیر متمرکز هستند:

۱. سیستم‌های گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع (HVAC)
این سیستم‌ها برای حفظ دمای مطلوب در محیط‌های صنعتی، به‌ویژه در فضاهای بزرگ مانند کارخانه‌ها و انبارها، انرژی زیادی مصرف می‌کنند. تنظیم دما در شرایط آب و هوایی متغیر و نیاز به تهویه مطبوع پیوسته، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

۲. سیستم‌های هوای فشرده

کمپرسورهای هوای فشرده از تجهیزات انرژی بر در صنایع هستند. نشتی‌های لوله‌کشی، فشار کاری نامناسب و طراحی ناکارآمد این سیستم‌ها منجر به اتلاف انرژی می‌شود.

۳. فرآیندهای گرمایشی و سرمایشی

صنایعی مانند فولاد، شیشه و مواد غذایی به عملیات حرارتی (مانند ذوب، پخت، یا انجماد) وابسته هستند. این فرآیندها به دلیل نیاز به تأمین دمای بالا یا پایین، انرژی قابل توجهی مصرف می‌کنند.

۴. سیستم‌های الکتریکی

شبکه‌های توزیع برق صنعتی، به‌ویژه در تأسیسات بزرگ، به دلیل تلفات الکتریکی در ترانسفورماتورها، کابل‌ها و تجهیزات کنترلی، بخشی از انرژی را هدر می‌دهند.

۵. روشنایی

استفاده از لامپ‌های راندمان پایین در سالن‌های تولیدی بزرگ و روشنایی دائمی خطوط مونتاژ، مصرف انرژی را افزایش می‌دهد.

۶. موتورهای الکتریکی

موتورهای فرسوده یا با بار نامناسب (مانند پمپ‌ها و فن‌ها) به دلیل بازدهی پایین، انرژی بیشتری نسبت به نیاز واقعی مصرف می‌کنند.

۷. دیگ‌های بخار

دیگ‌های بخار در صنایعی مانند پتروشیمی و تولید کاغذ، به دلیل احتراق ناقص سوخت، عایق‌بندی ضعیف، یا بازایی نشدن گرمای اتلافی، انرژی قابل توجهی را هدر می‌دهند.

۸. سیستم‌های تبرید

سردخانه‌های صنعتی، سیستم‌های خنک‌کننده در صنایع غذایی و فرآیندهای شیمیایی به دلیل نیاز به حفظ دمای پایین، مصرف انرژی بالایی دارند.

۹. فرآیندهای خشک‌کردن

سردخانه‌های صنعتی، سیستم‌های خنک‌کننده در صنایع غذایی و فرآیندهای شیمیایی به دلیل نیاز به حفظ دمای پایین، مصرف انرژی بالایی دارند.

۱۰. تصفیه پساب و مدیریت پسماند

تأسیسات تصفیه پساب و سوزاندن پسماندهای صنعتی، به‌ویژه در صنایع شیمیایی و دارویی، به دلیل نیاز به پمپاژ،

هوادهی و فرآیندهای حرارتی، انرژی بر هستند.

۶. شاخص‌های جهانی و جایگاه کشورها در بهینه‌سازی انرژی

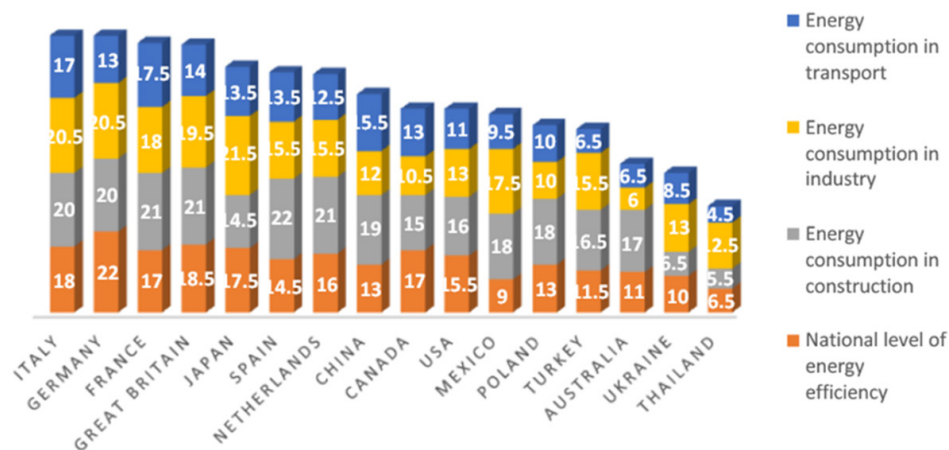
بررسی عملکرد کشورها در حوزه بهینه‌سازی انرژی نشان می‌دهد که موفقیت در این زمینه نیازمند ترکیبی از بهبود موضعی و تمرکز بر شاخص‌های کلان است. دو محور اصلی برای ارزیابی این عملکرد عبارتند از:

۶-۱. تحلیل عملکرد کشورها در بخش‌های صنعتی

بررسی عملکرد کشورها در حوزه بهینه‌سازی انرژی که در (شکل ۳) نشان می‌دهد؛ موفقیت در این زمینه مستلزم تعادل بین بهبود بخش‌های خاص و کاهش مصرف کل انرژی است. برای نمونه، ایتالیا در بخش حمل‌ونقل با اجرای سیاست‌های کاهش مصرف سوخت و توسعه حمل‌ونقل عمومی، عملکرد بهتری نسبت به آلمان دارد. با این حال، آلمان با تمرکز بر بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع سنگین (مانند فولاد و خودروسازی) و ساختمان‌های کم‌مصرف، در مجموع شاخص بهره‌وری انرژی بالاتری را ثبت کرده است. این تفاوت نشان می‌دهد که بهبود تک‌بعدی در یک حوزه، بدون توجه به سایر بخش‌ها، نمی‌تواند تضمین‌کننده موفقیت کلی باشد.

نکته کلیدی این است که کاهش مصرف انرژی در یک بخش نباید منجر به افزایش مصرف در بخش دیگر شود (شکل ۳). به‌عنوان مثال، برخی کشورها با صرفه‌جویی در انرژی صنعتی، به دلیل عدم مدیریت صحیح در بخش حمل‌ونقل یا روشنایی عمومی، مصرف کلی انرژی خود را کاهش نداده‌اند. این رویکرد نادرست نه تنها به پایداری سیستم انرژی کمک نمی‌کند، بلکه ممکن است هزینه‌های اقتصادی و زیست‌محیطی را افزایش دهد.

در نتیجه، دستیابی به بهینه‌سازی جامع انرژی نیازمند برنامه‌ریزی هماهنگ در تمامی بخش‌هاست. این شامل تدوین استانداردهای یکپارچه، نظارت بر عملکرد زیربخش‌ها و سرمایه‌گذاری در فناوری‌های چندمنظوره است که هم‌زمان مصرف انرژی در صنعت، حمل‌ونقل و ساختمان‌ها را کاهش می‌دهد. تنها در این صورت است که کاهش مصرف انرژی به یک دستاورد پایدار و مؤثر تبدیل خواهد شد.



شکل ۳. رتبه‌بندی مصرف انرژی در بخش‌های صنعتی بر اساس داده‌های جهانی (۲۰۱۷-۲۰۱۸) [۵]

۲-۶. شاخص انتقال انرژی (ETI)

تکیه بر منابع کم‌کربن مانند انرژی هسته‌ای و نیروگاه‌های برق‌آبی، عملکرد قابل‌توجهی در حوزه امنیت انرژی و کاهش انتشار کربن داشته‌اند. در مقابل، اقتصادهای بزرگ مانند چین، علیرغم پیشرو بودن در فناوری‌های نوین، به دلیل وابستگی به سوخت‌های فسیلی در بخش‌های صنعتی و حمل‌ونقل، با چالش‌های جدی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مواجه هستند.

مقایسه داده‌های سال‌های اخیر نشان می‌دهد که موفقیت در انتقال انرژی نیازمند هماهنگی بین سیاست‌های کلان، سرمایه‌گذاری در نوآوری و تعامل مؤثر بخش‌های عمومی و خصوصی است. (شکل ۴) به‌وضوح تأکید می‌کند که دستیابی به سیستم انرژی پایدار تنها از طریق تعهد بلندمدت و برنامه‌ریزی یکپارچه ممکن خواهد بود.

شاخص انتقال انرژی (ETI) که در (شکل ۴) ارائه شده است، کشورها را بر اساس دو معیار اصلی ارزیابی می‌کند: عملکرد سیستم انرژی فعلی (شامل امنیت، دسترسی و پایداری) و آمادگی برای انتقال به سیستم انرژی پایدار (شامل سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، قوانین حمایتی و مشارکت بخش خصوصی).

بر اساس رتبه‌بندی سال ۲۰۲۴، کشورهای شمال اروپا مانند سوئد، دانمارک و فنلاند به‌عنوان پیشگامان جهانی این حوزه شناخته می‌شوند. این کشورها با تمرکز بر توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر نظیر باد و زیست‌توده و همچنین بهبود راندمان انرژی در صنایع، جایگاه برتر خود را حفظ کرده‌اند. فرانسه و نروژ نیز با



شکل ۴. رتبه‌بندی شاخص انتقال انرژی (ETI) در سال ۲۰۲۴ [۶]

1. Energy Transition Index

۷. نمونه‌های بین‌المللی موفق در بهینه‌سازی انرژی

در سال‌های اخیر، صنایع پیشرو با تکیه بر راهکارهای نوآورانه و همسو با اهداف توسعه پایدار، تحولات چشمگیری در حوزه بهینه‌سازی انرژی ایجاد کرده‌اند. پیش از بررسی نمونه‌های موفق، مرور برخی از راهکارهای کلیدی که پایه این تحولات بوده است، ضروری به نظر می‌رسد:

- روش‌های مبتنی بر داده و آزمایش: استفاده از طراحی آزمایشی^۱ (DOE) برای شناسایی کارآمدترین فرایندها با کمترین مصرف انرژی.
 - سرمایه‌گذاری هدفمند: تمرکز بر پروژه‌هایی با بازگشت سرمایه سریع و تأثیر بلندمدت بر کاهش هزینه‌ها.
 - گذار به انرژی‌های پاک: جایگزینی منابع فسیلی با فناوری‌های تجدیدپذیر برای کاهش ردپای کربنی و افزایش امنیت انرژی.
 - توانمندسازی نیروی انسانی: آموزش تیم‌های تخصصی و ایجاد فرهنگ سازمانی مبتنی بر صرفه‌جویی انرژی.
 - همگرایی با سیاست‌های تشویقی: بهره‌گیری از مشوق‌های مالیاتی و برنامه‌های دولتی برای تسریع اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی.
- این راهکارها نه تنها مصرف انرژی را کاهش می‌دهند، بلکه با آزادسازی منابع مالی و تقویت رقابت‌پذیری، صنایع را به سمت چرخه توسعه پایدار سوق می‌دهند.

۱-۷. بهره‌وری انرژی در شرکت جی. آر. سیمپلوت^۲

۱-۱-۷. پیشینه شرکت

سیمپلوت یکی از بزرگ‌ترین شرکت‌های خصوصی در جهان است که درآمد سالانه آن حدود ۴/۵ میلیارد دلار بوده و نزدیک به ۱۰۰۰۰ نفر نیروی کار در سراسر جهان دارد [۷]. این شرکت در سال ۱۹۲۹ توسط جی. آر. سیمپلوت تأسیس شد و پس از جنگ جهانی دوم، با پیشگامی در تولید سیب‌زمینی سرخ‌کرده منجمد برای صنعت نوپای فست‌فود، رشد چشمگیری تجربه کرد. نقطه عطف تاریخی این شرکت، توافق بین جی. آر. سیمپلوت و روی کراک (بنیان‌گذار مک‌دونالدز) بود که منجر به استفاده از محصولات سیمپلوت در تمامی رستوران‌های مک‌دونالدز به جای برش دستی

سیم‌زمینی شد. پس از این موفقیت، سیمپلوت فعالیت خود را به حوزه‌های دیگری مانند تولید کود، استخراج فسفات و پرورش گاو گسترش داد.

امروزه، شرکت جی. آر. سیمپلوت به‌عنوان یک شرکت یکپارچه عمودی در چندین زنجیره ارزش فعالیت می‌کند و نقش برجسته‌ای در صنایع مختلف ایفا می‌نماید. بخش‌های اصلی این شرکت شامل فرآوری مواد غذایی، تجارت کشاورزی، دامداری، بسته‌بندی گوشت و تولید محصولات سیب‌زمینی است. به‌ویژه، سیمپلوت یکی از بزرگ‌ترین تولیدکنندگان سیب‌زمینی منجمد در جهان محسوب می‌شود و سالانه حجم عظیمی از این محصولات را به بازار عرضه می‌کند. این شرکت مالک ۱۲۰ تأسیسات است که شامل ۱۳ واحد بزرگ صنعتی می‌شود، از جمله هفت کارخانه فرآوری مواد غذایی، دو معدن فسفات، یک معدن سیلیس و سه کارخانه تولید کود.

این واحدهای صنعتی توسط ۲۲ شرکت مختلف در حوزه برق و گاز طبیعی تأمین انرژی می‌شوند. علاوه بر این، سوخت دیزل سهم قابل‌توجهی از هزینه‌های انرژی سیمپلوت را به خود اختصاص می‌دهد. به‌عنوان مثال، مصرف گازوئیل در معدن فسفات «Doyle Valley Phosphate Mine»، حدود ۲۵ درصد از کل هزینه انرژی بخش کشاورزی این شرکت را تشکیل می‌دهد.

۱-۲-۷. اهداف و دستاوردهای بهره‌وری انرژی

سیمپلوت از سال ۲۰۰۰ پروژه‌های قابل‌توجهی در حوزه بهره‌وری انرژی اجرا کرده است. از سال ۲۰۰۵، این شرکت با حمایت اتحاد بهره‌وری انرژی شمال غرب^۳، کارکنان پاره‌وقتی با عنوان «قهرمانان انرژی» را در سایت‌های صنعتی بزرگ خود منصوب کرد. در سال ۲۰۰۷، با تشکیل تیم بهره‌وری انرژی در سطح شرکت، برنامه‌های مرتبط تقویت شد و این تیم در سال ۲۰۰۷ در گروه فرآوری غذا و در سال ۲۰۰۹ در گروه تجارت کشاورزی گسترش یافت. در سال ۲۰۰۸، سیمپلوت موفق به دریافت گواهینامه برنامه ستاره انرژی^۴ شد و دو کارخانه آن در سال ۲۰۱۰ به اولین تأسیسات تولید سبزیجات منجمد با این گواهینامه تبدیل شدند [۸].

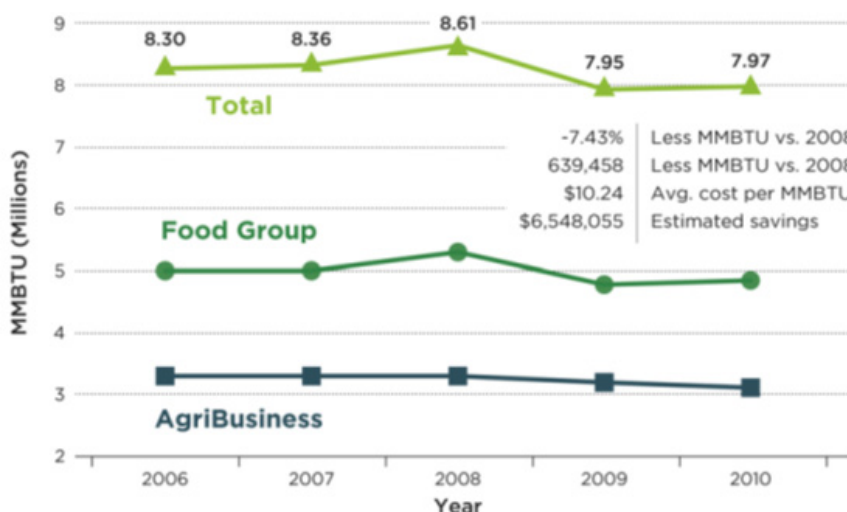
دوره محوری سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۰ با پیوستن سیمپلوت به تعهد مدیران در حوزه برنامه‌ریزی انرژی و

1. Design of Experiment
2. J. R. Simplot Company
3. Northwest Energy Efficiency Alliance
4. ENERGY STAR

ثبت کرد که از جمله می‌توان به کاهش ۱۸ درصدی شدت مصرف انرژی در گروه غذایی نسبت به سال پایه ۲۰۰۸ و کاهش ۴ درصدی شدت مصرف انرژی در گروه تجارت کشاورزی نسبت به سال پایه ۲۰۰۹ اشاره نمود. بر اساس گزارش‌های پایداری اخیر این شرکت، روند بهبود بهره‌وری همچنان ادامه یافته است؛ به گونه‌ای که سیمپلوت متعهد شده است تا سال ۲۰۳۰ شدت مصرف انرژی خود را ۱۵ درصد دیگر و مصرف آب را ۲۰ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۱۶ کاهش دهد. آخرین داده‌های سال ۲۰۲۳ نشان می‌دهد که پروژه‌های بهینه‌سازی فرآیند، از جمله بازیافت حرارت و استفاده از بیوگاز در تأسیسات فرآوری سیب‌زمینی، منجر به کاهش تجمعی مصرف انرژی و دستیابی به بخش عمده‌ای از این اهداف شده‌اند [۸، ۹].

کاهش ۲۵ درصدی شدت مصرف انرژی تا سال ۲۰۲۰ آغاز شد. دان استورتوانت، مدیر انرژی شرکت، این دوره را «زمان آغاز واقعی تحول» توصیف کرد. در بهار ۲۰۱۰، دفتر منابع انرژی آیداهو با استفاده از بودجه قانون بهبود و سرمایه‌گذاری، از پروژه آزمایشی استخدام دو مهندس بهره‌وری انرژی حمایت مالی کرد. این پروژه شامل پوشش ۵۰ درصدی هزینه‌های این مهندسان طی ۱۸ ماه اول بود و انتظار می‌رفت صرفه‌جویی انرژی شناسایی‌شده دو برابر هزینه‌های نیروی انسانی باشد. نتایج فراتر از انتظار بود و مهندسان موفق به شناسایی پروژه‌هایی با صرفه‌جویی انرژی قابل توجه شدند که الهام‌بخش شرکت‌های خدمات عمومی برای حمایت بیشتر گردید.

تا سال ۲۰۱۵، سیمپلوت دستاوردهای چشمگیری را



شکل ۵. روند صرفه‌جویی انرژی در سیمپلوت تا سال ۲۰۱۵ و تداوم برنامه‌های بهره‌وری (داده‌های تکمیلی ۲۰۲۳ در متن) [۸، ۷]

روند صرفه‌جویی انرژی در سیمپلوت را نشان می‌دهد که بر اساس آن، میلیون واحد حرارتی بریتانیایی (MMBTU) ذخیره‌شده به‌وضوح رشد مثبت برنامه‌های بهره‌وری انرژی را تأیید می‌کند.

۷-۱-۳. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

سیمپلوت برای دستیابی به اهداف بهره‌وری انرژی، به‌شدت به تیم‌های تخصصی در سطح کارخانه‌ها متکی است. قهرمانان انرژی و مهندسان انرژی در هر کارخانه، به‌عنوان «نیروی انسانی متخصص»، عملکرد تأسیسات را رصد کرده و فرصت‌های بالقوه برای صرفه‌جویی انرژی را شناسایی می‌کنند. این تیم‌ها از پشتیبانی مهندسان انرژی در سطح

ساختار تیم بهره‌وری انرژی این شرکت مبتنی بر یک هسته مرکزی تمام‌وقت شامل مدیر انرژی، دو مهندس بهره‌وری انرژی (برای بخش‌های کشاورزی و غذایی) و دو مهندس محلی در تأسیسات کشاورزی است. این تیم توسط شبکه قهرمانان انرژی در هر سایت صنعتی پشتیبانی می‌شود که علاوه بر وظایف اصلی، مسئولیت شناسایی پروژه‌های بهره‌وری انرژی و ترویج فرهنگ صرفه‌جویی را بر عهده دارند. مکانیسم انگیزشی سیمپلوت مبتنی بر تقدیر از قهرمانان انرژی با جایزه‌های نمادین مانند جام ۱۵۰ دلاری و برگزاری بازدید سالانه انرژی برای تبادل ایده است. این رویکرد نه تنها مشارکت کارکنان را افزایش داده، بلکه شناسایی فرصت‌های جدید در تأسیسات مختلف را تسهیل می‌کند. (شکل ۵)

واحدهای تجاری نیز برخوردارند که پروژه‌ها را برای رقابت در جذب بودجه آماده می‌سازند.

آموزش و توانمندسازی نیروی انسانی یکی از ارکان اصلی برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت است. قهرمانان انرژی از طریق بازدید سالانه انرژی که در یکی از سایت‌های بزرگ صنعتی برگزار می‌شود، با ایده‌های نوین آشنا شده و آموزش می‌بینند. این رویدادها به ایجاد فرهنگ صرفه‌جویی انرژی کمک شایانی می‌کند. برای مثال، کارخانه کود هلم (Helm) تنها با تغییر رفتار کارکنان و بدون هیچ سرمایه‌گذاری مالی، موفق به کاهش ۳۰/۴ درصدی شدت مصرف انرژی شد [۷]. همچنین، آموزش‌ها و ابزارهای DOE در حوزه‌هایی مانند مدیریت بخار، نقش کلیدی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایفا کرده‌اند. در برخی تأسیسات، کارآموزان با انجام تحلیل‌های پیشرفته (مانند رگرسیون) عوامل مؤثر بر مصرف انرژی را شناسایی می‌کنند.

پروژه‌های شناسایی‌شده توسط مهندسان انرژی، بر اساس نرخ بازده داخلی (IRR) اولویت‌بندی و برای جذب بودجه رقابت می‌کنند. سیمپلوت تنها پروژه‌هایی را تأیید می‌کند که IRR حداقل ۱۵ درصد داشته باشند. پروژه‌های کوچک‌تر ممکن است از فرآیند طولانی تأیید بودجه سرمایه‌ای معاف شوند، مشروط بر اینکه هزینه‌ها از طریق بودجه عملیاتی تأمین گردد. با این حال، آستانه تفکیک پروژه‌های سرمایه‌ای از عملیاتی، ۱۰۰۰۰ دلار تعیین شده است.

اگرچه سیستم فعلی در شناسایی اقدامات بهره‌وری انرژی در کارخانه‌های موجود موفق عمل کرده، اما برنامه‌ریزی انرژی در طراحی کارخانه‌های جدید هنوز به‌صورت سیستماتیک ادغام نشده است. از آنجا که سیمپلوت یک شرکت خصوصی است، تصمیمات مربوط به احداث کارخانه‌های جدید ممکن است بدون مشارکت تیم انرژی و بر اساس ملاحظات داخلی اتخاذ شود. این امر خطر طراحی تأسیسات ناکارآمد از نظر انرژی را افزایش می‌دهد.

۴-۱-۷. نقش حمایت خارجی

در حوزه بهره‌وری انرژی، شرکت سیمپلوت رویکرد «همکاری با همه» را پیش گرفته است. این همکاری شامل مشارکت با DOE (Design of Experiment)، دولت‌ها و شرکت‌های خدمات عمومی متعددی است که تأسیسات این شرکت را تأمین می‌کنند.

DOE از برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت با ترغیب تعهدات رهبری به بهبود مصرف انرژی و همچنین از طریق ارائه آموزش‌ها و ابزارهای کاربردی به کارکنان سطح کارخانه حمایت کرده است. «تعهد مدیران در حوزه برنامه‌ریزی انرژی» به کاهش ۲۵ درصدی شدت مصرف انرژی طی ۱۰ سال، نقش کلیدی در تقویت اولویت‌دهی به بهره‌وری انرژی در سراسر شرکت سیمپلوت داشته است. آموزش‌ها و ابزارهای DOE با توانمندسازی کارکنان در شناسایی و اجرای اقدامات مؤثر، به تحقق این تعهد کمک شایانی کرده‌اند. به‌عنوان نمونه، در سال ۲۰۰۶، ابزار ارزیابی سیستم بخار DOE در کارخانه دان (Dawn) موجب صرفه‌جویی سالانه ۷۵۰۰۰ میلیون واحد حرارتی بریتانیایی (BTU) در مصرف سوخت از طریق بهینه‌سازی مدیریت جریان و عملکرد دیگ‌های بخار شد.

دولت‌های ایالتی نیز از برنامه‌های بهره‌وری انرژی سیمپلوت پشتیبانی کرده‌اند. یکی از نمونه‌های برجسته، همکاری دفتر منابع انرژی آیداهو با استفاده از بودجه قانون بهبود و سرمایه‌گذاری برای تأمین بخشی از هزینه‌های استخدام دو مهندس انرژی بود. از بهار ۲۰۱۰، این دفتر طی ۱۸ ماه مبلغ ۱۷۹۰۰۰ دلار برای استخدام دو مهندس که هر یک مسئول یکی از دو بخش اصلی صنعتی (کشاورزی و فراوری مواد غذایی) بود، در اختیار سیمپلوت قرار داد. سیمپلوت نیز با مشارکت در این برنامه، مابقی هزینه کل ۴۲۲۶۲۵ دلار را تقبل کرد. این دو مهندس پروژه‌های متعددی را اجرایی کردند، از جمله برنامه رفع نشتی در کارخانه کود دان که منجر به صرفه‌جویی ۴۴۸۲۵۳ دلاری در یک سال شد و نصب کمپرسورهای کارآمد در کارخانه فراوری سیب‌زمینی دریاچه موسی (Moses Lake) که سالانه ۱۲۰۰۰ دلار صرفه‌جویی به همراه داشت. در مجموع، پروژه‌های سال اول این مهندسان بیش از ۱۰ برابر هزینه‌های حقوق و دستمزدشان صرفه‌جویی ایجاد کرد که این موفقیت سیمپلوت را بر آن داشت تا پس از اتمام دوره حمایت مالی، آن‌ها را به‌صورت دائمی استخدام کند [۱۰].

برنامه‌های تأمین‌شده توسط مصرف‌کنندگان نیز در موفقیت برنامه بهره‌وری انرژی سیمپلوت نقش داشته‌اند. عمده کارکرد این برنامه‌ها، ارائه مشوق‌هایی برای افزایش جذابیت پروژه‌های بهره‌وری انرژی از طریق بهبود شاخص IRR (نرخ بازده داخلی) است تا این پروژه‌ها بتوانند در رقابت با سایر طرح‌ها برای جذب بودجه سرمایه‌ای موفق عمل کنند. در



مواردی، این برنامه‌ها به استخدام نیروهای متخصص در حوزه بهره‌وری انرژی کمک کرده‌اند. برای مثال، در معدن Doyle Valley Phosphate Mine، شرکت Lower Valley Energy با پوشش ۵۰ درصد از هزینه‌های استخدام یک مهندس انرژی تمام‌وقت (تا زمان دستیابی به صرفه‌جویی یک میلیون کیلووات‌ساعتی در مصرف برق) از این طرح حمایت کرد. نکته قابل توجه در مورد استخدام مهندس انرژی در این معدن، نمایش نمونه‌ای از حمایت غیرمستقیم یک شرکت خدمات عمومی از کاهش مصرف سوخت تأمین‌شده توسط خودش است. در این مورد، ۷۸ درصد از انرژی معدن از گازوئیل تأمین می‌شد و مهندس مذکور علاوه بر تحقق هدف برقی تعیین‌شده، بر کاهش هزینه‌های گازوئیل نیز متمرکز بود. به‌عنوان بخشی از فلسفه «همکاری با همه»، سیمپلوت عموماً در برنامه‌های تأمین‌شده توسط مصرف‌کنندگان مشارکت می‌کند. با این حال، در مواردی مانند «برنامه بهره‌وری انرژی آیداهو پاور»، این شرکت ابتدا روش خودگردان را انتخاب کرد، اما پس از ارزیابی هزینه‌ها و مزایا، به دلیل امکان دسترسی به مشوق‌های نامحدود برای اقدامات بهره‌وری انرژی، وارد برنامه شد. این تصمیم‌گیری انعطاف‌پذیر نشان‌دهنده تمرکز سیمپلوت بر حداکثرسازی منافع عملیاتی است.

۷-۱-۵. نگاه به آینده

با تداوم مسیر سیمپلوت برای دستیابی به اهداف بهره‌وری انرژی، فرصت‌های قابل توجهی جهت گسترش و تعمیق برنامه‌های این شرکت در این حوزه وجود دارد. توسعه مستمر تیم بهره‌وری انرژی یک ضرورت کلیدی است. این «نیروهای متخصص» که مسئول شناسایی و اجرای پروژه‌های بهره‌وری انرژی هستند، نیازمند آموزش‌ها و ابزارهای پیشرفته‌تری خواهند بود تا پس از تکمیل پروژه‌های ساده و آشکار، به سراغ اقدامات پیچیده‌تر بروند. در این زمینه، DOE تاکنون نقش مؤثری ایفا کرده است و حمایت مداوم این نهاد با ارائه ابزارها و دوره‌های آموزشی تکمیلی، به پیشرفت برنامه‌ها کمک خواهد کرد.

یکی دیگر از فرصت‌های استراتژیک، ایجاد سیستم یکپارچه برای ادغام اصول بهره‌وری انرژی در طراحی کارخانه‌های جدید است. احداث یک کارخانه جدید، فرصتی بی‌نظیر برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در تمامی بخش‌های تأسیسات، بدون دغدغه‌ی توقف خط تولید ناشی از بازسازی تجهیزات

موجود فراهم می‌کند. علاوه بر این، نرخ بازده سرمایه‌گذاری (ROI) حاصل از استفاده از تجهیزات انرژی کارآمد از همان ابتدا، بسیار بالاتر از جایگزینی تجهیزات قدیمی با نمونه‌های بهینه‌تر خواهد بود. بهره‌برداری کامل سیمپلوت از چنین فرصت‌هایی نه تنها برنامه بهره‌وری انرژی شرکت را تقویت می‌کند، بلکه هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و دستیابی به اهداف کلان انرژی را تسهیل می‌نماید.

۷-۲. بهره‌وری انرژی در جنرال موتورز

۷-۲-۱. پیشینه شرکت

شرکت جنرال موتورز (GM) با بیش از یک قرن سابقه در صنعت خودروسازی، یکی از پیشگامان این حوزه محسوب می‌شود. این شرکت برای دهه‌ها به‌عنوان بزرگ‌ترین خودروساز جهان شناخته می‌شد، اما کاهش فروش و افزایش بدهی‌ها نهایتاً منجر به ورشکستگی آن در پی بحران مالی سال ۲۰۰۹ گردید. این ورشکستگی، فرآیند تجدید ساختار گسترده‌ای را در سراسر سازمان رقم زد که شامل بازسازی‌های عملیاتی و مدیریتی شد.

پس از این دوره، جنرال موتورز با تمرکز بر نوآوری در خط تولید و عرضه خودروهای هوشمندتر و سوخت کارآمدتر، موفق به احیای فروش خود شد. این تحولات همسو با تغییرات سریع ترجیحات مصرف‌کنندگان صورت گرفت تا جایی که در گزارش پایداری ۲۰۱۵ GM پیش‌بینی شده بود: «صنعت خودروسازی در پنج سال آینده بیش از پنجاه سال گذشته تغییر خواهد کرد» [۱۱].

در سال ۲۰۱۴، جنرال موتورز با فروش حدود ۳ میلیون دستگاه خودرو در بازار داخلی و ثبت درآمد جهانی بیش از ۱۵۰ میلیارد دلار، جایگاه برتر خود را تثبیت کرد. این شرکت مالک برندهای بزرگی همچون شورولت، جی‌ام‌سی، بیوک و کادیلک در بازار محلی و همچنین برندهایی مانند واکس‌های، جی‌فانگ و وولینگ در عرصه بین‌المللی است. پشته‌ی تولیدی گسترده این خودروساز شامل بیش از ۳۰ کارخانه تولیدی در سطح جهان می‌شود.

۷-۲-۲. اهداف و دستاوردها

جنرال موتورز (GM) طی ۱۵ سال گذشته، یک برنامه جامع بهره‌وری انرژی را طراحی و اجرا کرده است. هسته اصلی این برنامه، ایجاد طرح ابتکاری پروژه صرفه‌جویی در

1. Idaho Power Energy Efficiency Program

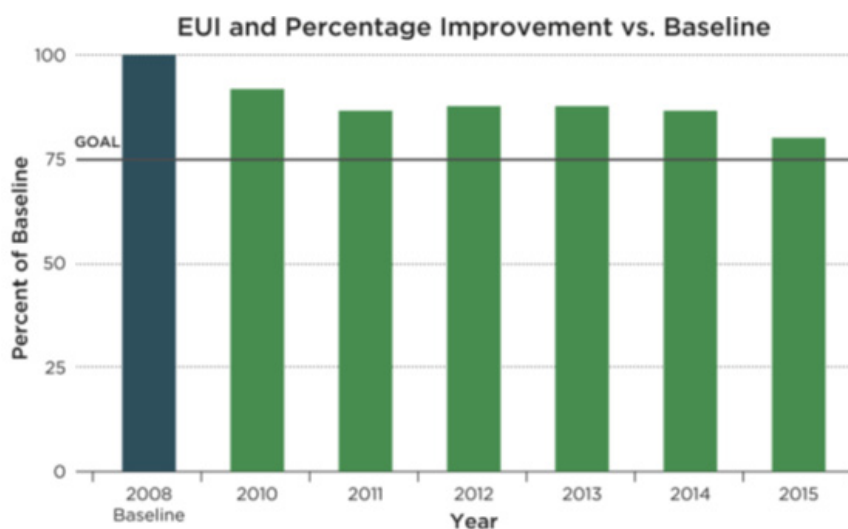
2. General Motors

انرژی^۱ (ESPI) در سال ۲۰۰۰ بود که برای اولین بار یک تیم و منابع اختصاصی به این حوزه تخصیص داد. بودجه ESPI سالانه بر اساس شرایط بازار تنظیم می‌شود. در ابتدا، بودجه سالانه این طرح ۵ میلیون دلار برای تأمین مالی پروژه‌های متنوع صرفه‌جویی انرژی در نظر گرفته شد، اما در سال‌های اخیر این مبلغ به حدود ۲۰ میلیون دلار افزایش یافته است.

پیش از راه‌اندازی ESPI، جنرال موتورز با دو شرکت بزرگ خدمات انرژی (DTE Energy و Consumers Energy) توافق‌نامه‌ای امضا کرد تا مهندسان انرژی تمام‌وقت برای کارخانه‌های خود جذب کنند. این مهندسان توسط شرکت‌های مذکور در مناطق تحت پوشش آن‌ها و حتی سایر مناطق ارائه شدند. همکاری بلندمدت بین GM و این مهندسان، پایه‌های اعتماد متقابل با شرکا را تقویت کرد.

در سال ۲۰۰۸، جنرال موتورز به برنامه «رهبران انرژی» وزارت انرژی آمریکا (DOE) پیوست و متعهد شد شدت

مصرف انرژی (EUI) به ازای هر خودروی تولیدی را تا سال ۲۰۱۸، ۲۵ درصد کاهش دهد. این هدف با توجه به تغییرات سریع صنعت خودروسازی چالشی بلندپروازانه بود. GM نه تنها به این هدف دست یافت، بلکه در استراتژی جدید خود متعهد شده است تا سال ۲۰۳۵ به کربن خنثی (Carbon Neutral) در محصولات و عملیات جهانی خود دست یابد. بر اساس گزارش پایداری ۲۰۲۳ این شرکت، شدت مصرف انرژی در تأسیسات تولیدی آمریکا طی سال‌های اخیر بیش از ۲۰ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۱۰ کاهش یافته است که فراتر از اهداف اولیه بود. این موفقیت از طریق سرمایه‌گذاری در فناوری‌های هوشمند مدیریت انرژی و گذار به منابع تجدیدپذیر حاصل شده است، به‌طوری‌که تا سال ۲۰۲۵ تمامی تأسیسات GM در ایالات متحده با انرژی ۱۰۰ درصد تجدیدپذیر تغذیه خواهند شد [۱۲].



شکل ۶. روند کاهش شدت مصرف انرژی در GM (داده‌های نمودار تا ۲۰۱۵؛ تحلیل به‌روزرسانی شده تا ۲۰۲۴ در متن) [۹، ۱۲]

۳-۲-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

تعهد این شرکت به بهره‌وری انرژی توسط اهداف بهره‌وری انرژی برای کارخانه‌ها و تأسیسات پشتیبانی می‌شود. از آنجا که این اهداف و پیشرفت در جهت دستیابی به آن‌ها به‌طور برجسته در بسیاری از کارخانه‌ها تحت برنامه‌های تجاری کارخانه برای اهداف زیست‌محیطی نمایش داده می‌شود، اهمیت اجرای اقدامات بهره‌وری انرژی به‌طور گسترده در بین کارکنان شناخته شده است. در هر کارخانه‌ای که توسط نویسندگان این گزارش

بازدید شد، اهداف روی تابلوهای اعلانات در کارخانه نشان داده می‌شد. علاوه بر این، این اهداف بخشی از اهداف کلی برای مدیر کارخانه را تشکیل می‌دهند و می‌توانند در ارزیابی مدیر تأثیرگذار باشند که انگیزه مهمی برای تشویق بهره‌وری انرژی فراهم می‌کند.

پروژه‌های بهره‌وری انرژی معمولاً از مدیر تأسیسات و مهندسان انرژی در محل سرچشمه می‌گیرند. این مهندسان که پیمانکارانی هستند که توسط دو شرکت بزرگ برق جنرال موتورز ارائه می‌شوند، پروژه‌هایی را

1. Energy Savings Project Initiative



شناسایی می‌کنند که در یک خط لوله از پروژه‌ها قرار می‌گیرند تا توسط تیم بهره‌وری انرژی در سطح شرکت تأیید شوند. این مهندسان بر اساس ترکیبی از مهارت‌های فنی و مهارت‌های ارتباطی انتخاب می‌شوند و اغلب برای سال‌های متمادی در همان مرکز باقی می‌مانند تا یک رابطه قوی با کارکنان کارخانه ایجاد کنند. این روابط به مهندسان کمک می‌کند تا خط لوله بهتری از پروژه‌ها داشته باشند و هنگام اجرای پروژه‌ها، مشارکت بیشتری از کارخانه بگیرند.

این پروژه‌ها سپس توسط تیم رهبری انرژی با معیارهای مختلف بسته به نوع بودجه‌ای که برای هر پروژه استفاده می‌شود، بررسی می‌شوند. در مورد پروژه‌هایی که قرار است توسط ESPI تأمین مالی شوند، لازم است که آن‌ها بخشی از یک سبد با میانگین دوره بازگشت ۲ سال را تشکیل دهند. این الزام گسترش یافته است. در ابتدا یک قطع قطعی در بازگشت ۱ سال بود، سپس میانگین بازگشت ۱ سال برای یک سبد، قبل از رسیدن به الزام فعلی. برای پروژه‌هایی که قرار است از طریق قراردادهای عملکرد انرژی اجرا شوند، لازم است که آن‌ها چرخه عمر ۵ ساله داشته باشند و در طول کل چرخه عمر پروژه، جریان نقدی مثبت باقی بمانند.

بودجه EPSI به تأمین بودجه تأسیسات کمک می‌کند که به‌عنوان یک اقدام کاهش هزینه دیده می‌شود. ارتباط بین بهره‌وری انرژی و بودجه تأسیسات حتی بیشتر است، زیرا جنرال موتورز به سادگی بودجه تأسیسات کارخانه را با توجه به صرفه‌جویی پیش‌بینی شده در انرژی کاهش می‌دهد. این بدان معناست که بیش از حد تخمین زدن صرفه‌جویی‌های بهره‌وری انرژی به‌شدت جریمه می‌شود، زیرا پروژه‌هایی که در ارائه صرفه‌جویی‌های تخمین زده شده شکست می‌خورند، باعث از دست دادن بودجه کارخانه و از دست دادن اهداف برای مصرف انرژی به‌طور کلی می‌شوند. این سیستم همچنین از ایجاد انگیزه برای دست‌کم گرفتن صرفه‌جویی‌های بهره‌وری انرژی جلوگیری می‌کند، زیرا پروژه‌ها باید صرفه‌جویی کافی برای دستیابی به بازگشت ۲ ساله داشته باشند و زیرا بودجه تأسیسات نمی‌تواند توسط کارخانه برای چیزی غیر از تأسیسات استفاده شود. گری لوندو، یکی از مدیران ارشد انرژی در جنرال موتورز می‌گوید: «کاهش بودجه‌های انرژی کارخانه واقعاً ارزش برنامه بهره‌وری

انرژی را به افراد مالی نشان می‌دهد و مهندسان انرژی من را پاسخگو نگه می‌دارد.»

با توجه به تغییرات سریع در صنعت خودروسازی و بنابراین تغییرات سریع در خطوط تولید جنرال موتورز، اطمینان از ساخت بهره‌وری انرژی در کارخانه‌های جدید یا بازسازی شده، عنصر مهمی از برنامه بهره‌وری انرژی است. محل تیم بهره‌وری انرژی در گروه مهندسی تأسیسات جهانی، برای گنجاندن ملاحظات بهره‌وری انرژی در تأسیسات جدید مفید بوده است، زیرا تیمی که مسئول طراحی تأسیسات جدید است، به همان مدیری که تیم بهره‌وری انرژی دارد، گزارش می‌دهد. علاوه بر این، دو مهندس بهره‌وری انرژی در جلسات طراحی کارخانه‌های جدید شرکت می‌کنند. این امر تضمین می‌کند که ملاحظات انرژی در طراحی کارخانه در نظر گرفته شود. در حال حاضر، معیار سرمایه‌گذاری در بهره‌وری انرژی در تولید جدید معمولاً بازگشت در نصف چرخه عمر دارایی‌های جدید است.

۷-۲-۴. نقش حمایت خارجی

حمایت نهادهای خارجی (از شرکت‌های خدمات انرژی محلی تا نهادهای دولتی) نقش کلیدی در پیشرفت‌های جنرال موتورز (GM) در حوزه بهره‌وری انرژی ایفا کرده است. این شرکت به مدت ۵ سال متوالی به‌عنوان شریک سال برنامه ENERGY STAR برای عملکرد برتر در پایداری انرژی انتخاب شده است. این جایزه نه تنها دستاوردهای زیست‌محیطی و صرفه‌جویی‌های مالی GM را تقدیر می‌کند، بلکه انگیزه‌ای برای سرمایه‌گذاری بیشتر در پروژه‌های انرژی بوده و تبلیغات مثبتی برای برند ایجاد کرده است.

برنامه Energy Leaders نیز با رسمیت بخشیدن به تعهد GM برای کاهش ۲۰ درصدی شدت مصرف انرژی (EUI) تا سال ۲۰۲۰ (نسبت به سال پایه ۲۰۱۰)، تقویت قابل‌توجهی برای برنامه‌های این شرکت بوده است. ادغام اهداف انرژی در استراتژی کسب‌وکار، مدیران کارخانه‌ها را موظف به گنجاندن شاخص‌های بهره‌وری انرژی در اهداف عملکردی خود کرده است.

برنامه‌های حمایتی مشتریان نیز برای GM سودمند بوده‌اند. مزیت اصلی این برنامه‌ها، کوتاه کردن دوره بازگشت سرمایه پروژه‌ها به زیر آستانه ۲ سال است

که امکان تأمین مالی آن‌ها را مطابق معیارهای داخلی GM فراهم می‌کند. به همین دلیل، پروژه‌ها در مناطقی با مشوق‌های انرژی قوی (مانند Tennessee Valley Authority، Consumers Energy و DTE Energy) نسبت به مناطق فاقد چنین حمایت‌هایی، اولویت بیشتری برای جذب بودجه دارند. GM همچنین با حداکثرسازی استفاده از مشوق‌های موجود (که عدم بهره‌برداری از آن‌ها را «پول رها شده» می‌داند) در سال‌های اخیر موفق به دستیابی به سقف کمک‌های مالی در چندین منطقه عملیاتی شده است.

حمایت‌های مهندسی ارائه‌شده توسط این برنامه‌ها نیز حائز اهمیت است. برای مثال، یک سازمان پژوهشی انرژی محلی با ارائه پشتیبانی فنی به کارخانه‌های GM، جذابیت مشارکت در برنامه‌های مشتری‌محور را افزایش داده است. اگرچه GM در برخی موارد (مانند دو کارخانه قدیمی) مجبور به تعدیل نرخ‌های برق ترجیحی خود شده، اما مزایای مهندسی و مشوق‌ها این چالش را جبران کرده‌اند. شاید مهم‌ترین عامل موفقیت GM، همکاری با دو شرکت بزرگ خدمات انرژی (Consumers Energy و DTE Energy) باشد که مهندسان انرژی اختصاصی را برای تأسیسات GM در مناطق مختلف تأمین می‌کنند. این سیستم انعطاف‌پذیر (که با تقسیم هزینه‌ها بین GM و شرکت‌های خدمات انرژی همراه است) به‌عنوان ستون اصلی برنامه بهره‌وری انرژی GM شناخته می‌شود. شرکت‌های خدمات انرژی کوچک‌تر نیز در سایر مناطق حمایت‌های مشابهی را در مقیاس محدودتر ارائه می‌دهند. تصمیم GM برای مشارکت در برنامه‌های مشتری‌محور، مبتنی بر تحلیل هزینه-فایده است: این شرکت تنها زمانی وارد برنامه می‌شود که مزایای مهندسی و مالی آن از هزینه‌های مشارکت پیشی بگیرد. این رویکرد عملی، علیرغم پیچیدگی‌های ناشی از تأثیر برنامه‌ها بر نرخ‌های انرژی، تاکنون نتایج درخشانی را رقم زده است.

۷-۲-۵. نگاه به آینده

با توجه به تحول سریع صنعت خودروسازی در دهه آینده، برنامه بهره‌وری انرژی در جنرال موتورز با چالش‌های بیشتر و فرصت‌های بزرگتری روبرو خواهد شد. در بسیاری از کارخانه‌ها، دستاوردهای عمده تاکنون در زمینه روشنایی؛ گرمایش، تهویه و تهویه مطبوع؛ برخی بهبودهای راندمان نیروی محرکه؛ و تلاش برای

کاهش مصرف بخار در تولید بوده است. برای گسترش بیشتر مزایای صرفه‌جویی در هزینه انرژی، احتمالاً نیاز به تعمیق مداوم تلاش‌های بهره‌وری انرژی خواهد بود، از جمله مشارکت در پروژه‌های بهینه‌سازی تولید با مزایای چندگانه و سایر تلاش‌های نزدیک به عملیات خط تولید؛ اجرای آزمایشی بیشتر ابتکارات بهره‌وری انرژی تغییر رفتار؛ و پیشرفت مداوم در تلاش برای ادغام طرح‌ها و فناوری‌های بهره‌وری انرژی بهترین عملکرد در سیستم‌های تولید جدید. در حالی که این زمینه‌ها می‌توانند صرفه‌جویی‌های بسیار خوبی در هزینه انرژی با هزینه کم داشته باشند، اما چالش‌های سازمانی بیشتری را نیز به همراه دارند.

یک حوزه مهم، تقویت مداوم روابط کاری بین پرسنل بهره‌وری انرژی و کارکنان و مدیریت عملیات تولید است. واضح است که هر پروژه‌ای مرتبط با تولید باید بسیار کم‌خطر باشد و شامل برنامه‌ریزی دقیق همراه با سایر کارها برای به حداقل رساندن هرگونه توقف تولید باشد. نکته کلیدی آشکار، ادغام دانش فرصت‌های بهره‌وری انرژی در برنامه‌های کلی برای تعمیر و نگهداری یا بازسازی برنامه‌ریزی شده خط تولید است.

حوزه مهم دیگر، مشارکت مداوم و هرچه بیشتر پرسنل بهره‌وری انرژی در طراحی و اجرای تأسیسات تولیدی جدید است. بهره‌وری انرژی در تأسیسات تولیدی جدید شاید مهم‌ترین جنبه کار بهره‌وری انرژی در درازمدت باشد، زیرا صنعت به‌سرعت به تکامل خود ادامه می‌دهد. چیدمان سازمانی فعلی جنرال موتورز مزایایی را برای جذب این پتانسیل فراهم می‌کند.

همچنین ممکن است بتوان سیستم تضمین خرید کارآمدترین تجهیزات جدید را با رسمی کردن گنجاندن بهره‌وری انرژی در بازسازی خط تولید یا طراحی جدید بهبود بخشید. این علاوه بر توسعه ساختمان‌های جدید و زیرساخت انرژی آن‌ها، از طریق ایجاد یک «دروازه انرژی» برای کارکنان انرژی برای تأیید پروژه‌های مرتبط کلیدی، یا با رسمی کردن روند موجود برای گنجاندن ویژگی‌های بهره‌وری انرژی با بازگشت سرمایه ۱۰ سال یا کمتر است. جنرال موتورز که در حال حاضر یک رهبر در طراحی و تولید خودروهای برقی و کارآمد انرژی است، می‌تواند به‌طور فزاینده‌ای مشارکت‌های موازی انرژی پایدار را از طریق تولید سبزتر خودروهای خود برجسته کند.





محصولات متنوعی شامل غلات، ماست، آرد و سایر اقلام غذایی را در تأسیسات متعدد تولیدی خود به عمل می‌آورد.

۷-۳-۲. اهداف و دستاوردها

جنرال میلر بیش از یک دهه است که اقدامات بهره‌وری انرژی را در دستور کار خود قرار داده است. نخستین اهداف انرژی در سطح شرکت در سال ۲۰۰۵ معرفی شدند، اما برنامه عملیاتی تا سال‌های اخیر محدود باقی ماند. نقطه عطف این مسیر، استخدام گراهام تورستینسون به عنوان مهندس انرژی در یک کارخانه آزمایشی در سال ۲۰۰۸ بود. موفقیت او در کاهش هزینه‌های انرژی این کارخانه از ۱۳ میلیون دلار به ۷/۵ میلیون دلار طی ۴ سال، دلیل محکمی برای گسترش این مدل به سایر تأسیسات فراهم کرد.

علیرغم مقاومت اولیه بخش منابع انسانی، معاون تولید شرکت با استدلالی قاطع «کارکنان عادی سه تا هفت برابر حقوق خود صرفه‌جویی نمی‌کنند» از استخدام مهندسان انرژی در تمامی تأسیسات بزرگ حمایت کرد. این تصمیم منجر به تشکیل تیم ۱۵ نفره مهندسی انرژی شد که ۵ نفر به‌طور اختصاصی در واحدهای تولید غلات و مابقی به‌صورت اشتراکی در ۲۰ کارخانه دیگر مستقر شدند. هر مهندس موظف شد ۴ برابر حقوق سالانه خود در محل کارش صرفه‌جویی انرژی ایجاد کند. گراهام به عنوان مدیر انرژی شرکت منصوب شد و ابزارهای بهبود مستمر و تحلیل انرژی را طراحی کرد که در تمامی واحدها به کار گرفته شدند. این تحولات همراه با تغییر نگرش به «انرژی به عنوان یک ماده اولیه» (مشابه آرد یا شکر که نباید هدر رود) صورت گرفت.

در سال ۲۰۱۵، هدف جدیدی برای کاهش ۲ درصدی سالانه مصرف انرژی تا ۲۰۲۵ و کاهش ۲۸ درصدی انتشار گازهای گلخانه‌ای در کل زنجیره تأمین تعیین شد. گزارش مسئولیت جهانی ۲۰۲۴ جنرال میلز نشان می‌دهد که این شرکت با پیگیری استراتژی‌های کاهش مصرف و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، توانسته است تا سال ۲۰۲۳ انتشار گازهای گلخانه‌ای را به میزان ۵۱ درصد نسبت به سال پایه ۲۰۲۰ کاهش دهد و سهم برق تجدیدپذیر در عملیات جهانی خود را به ۹۷ درصد برساند. این دستاوردها نشان می‌دهد که نرخ کاهش شدت مصرف انرژی در سال‌های اخیر حتی از پیش‌بینی‌های اولیه (شکل ۷) فراتر رفته و با شتاب بیشتری به سمت اهداف ۲۰۳۰ در حرکت است [۱۳].

فرصت دیگر برای جنرال موتورز در بهبود بیشتر فرهنگ بهره‌وری انرژی و جلب توجه بیشتر مدیریت کارخانه به بهره‌وری انرژی نهفته است. یکی از راه‌های اصلی که جنرال موتورز شروع به پیگیری این فرصت کرده است، برگزاری شکار گنج انرژی، مطابق با دستورالعمل ENERGY STAR است که در آن کارگران دو روز و نیم را به جستجوی صرفه‌جویی در انرژی در سراسر کارخانه می‌گذرانند. این امر در وادار کردن کارگران به فکر کردن در مورد بهره‌وری انرژی و برجسته کردن تمام صرفه‌جویی‌های بالقوه از بهره‌وری انرژی برای مدیریت کارخانه مؤثر بوده است. راه دیگری که جنرال موتورز قصد داشته فرهنگ بهره‌وری انرژی را پرورش دهد، برگزاری کمپین‌های «سبز خود را به جنرال موتورز بیاورید» بر اساس برنامه ENERGY STAR است. کارکنان تشویق می‌شوند که اقدامات بهره‌وری انرژی را در محل کار و همچنین در خانه‌های خود به عنوان راهی برای شخصی کردن بهره‌وری انرژی اجرا کنند.

۷-۳-۳. بهره‌وری انرژی در جنرال میلز^۱

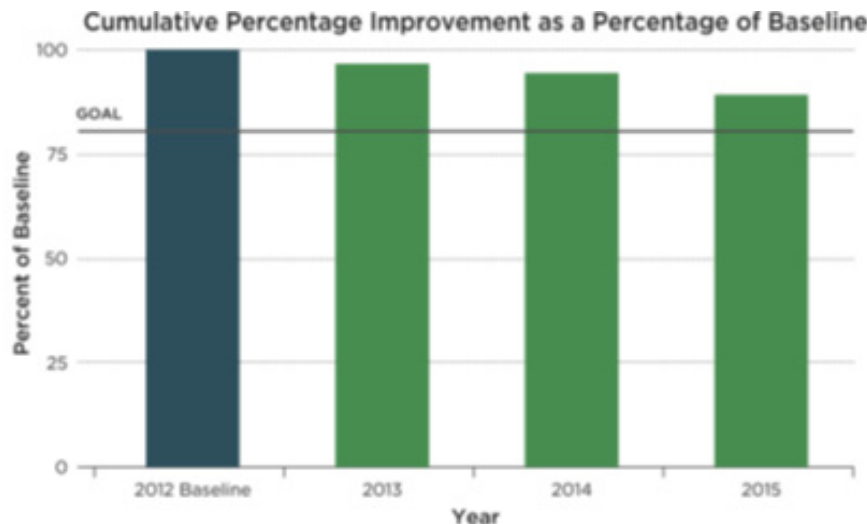
۷-۳-۱. پیشینه شرکت

جنرال میلز (General Mills) به عنوان یکی از بزرگ‌ترین فراوری کنندهای غلات و حبوبات در سطح جهانی، تاریخچه طولانی و پرفرازونشیبی دارد. برندهای این شرکت، از بتی کراکر گرفته تا چریوز، برای دهه‌ها از اقلام اصلی در خانوارهای سراسر جهان بوده‌اند. طی سالیان متمادی، جنرال میلز شرکت‌های متعددی را تأسیس و واگذار کرده است - از پارکر برادرز تا باغ زیتون - درحالی‌که شرکت‌های دیگری را نیز به مجموعه خود افزوده است که جدیدترین مورد آن، خریداری پیلزبری بوده است.

در سال‌های اخیر، برندهای غلات جنرال میلز با چالش‌های فزاینده صنعت غذا روبرو بوده‌اند که این شرکت را وادار به کاهش قابل توجه هزینه‌ها برای حفظ سودآوری کرده است. همچنین، جنرال میلز با ورود به بخش‌های رو به رشد بازار جهانی مواد غذایی (همچون ماست یونانی) و بهبود جذابیت محصولات غلاتی خود از طریق تولید تمامی غلات با دانه‌های کامل، به دنبال توسعه پایدار است.

در سال ۲۰۱۵، جنرال میلز بیش از ۱۷/۶ میلیارد دلار فروش خالص در سراسر جهان ثبت کرد. این شرکت

1. General Mills



شکل ۷. روند کاهش شدت مصرف انرژی در جنرال میلز (داده‌های نمودار تا ۲۰۱۵؛ تحلیل عملکرد ۲۰۲۴ در متن) [۹، ۱۳]

۳-۳-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

اهداف بهره‌وری انرژی در سطح شرکت جنرال میلز نقش محوری در ترغیب واحدهای سازمانی ایفا می‌کنند، چرا که این اهداف به شاخص‌های کلیدی عملکرد (KPI) در ساختار ارزیابی شرکت تبدیل شده‌اند. هر کارخانه موظف است اهداف زیست‌محیطی (از جمله شاخص‌های انرژی) را تعیین کند که مستقیماً بر رتبه‌بندی کارخانه و در نتیجه ارزیابی مدیران تأثیرگذار است. این پیوند بین عملکرد انرژی و ارزیابی مدیریت، انگیزه قوی برای تحقق اهداف انرژی و پیگیری مستمر پروژه‌های بهره‌وری ایجاد می‌کند. برنامه بهره‌وری انرژی این شرکت با ساختار غیرمتمرکز خود (ناشی از ادغام‌ها و اکتساب‌های متعدد) به صورت غیرمتمرکز طراحی شده و بر تیم‌های انرژی سطح کارخانه متکی است. این تیم‌ها متشکل از مهندسان تمام‌وقت هستند که به مدیر کارخانه گزارش می‌دهند و هم‌زمان با تیم انرژی مرکزی (ارائه‌دهنده ابزارها و آموزش‌ها) همکاری می‌کنند. مهندسان انرژی علاوه بر پیشبرد پروژه‌های محلی، مسئول تبادل ایده‌ها بین کارخانه‌ها هستند. در کارخانه‌های بزرگ موسوم به بیگ جی (Big G)، مهندسان انرژی به صورت اختصاصی فعالیت می‌کنند، در حالی که در سایر واحدها ممکن است نقش‌های دیگری نیز داشته باشند. وظیفه مدیریت تأمین انرژی به صورت مشترک بین مهندسان انرژی و تیم مالی هر کارخانه تقسیم شده است. پروژه‌های کوچک با بودجه زیر آستانه مشخص، توسط تیم مالی کارخانه تصویب می‌شوند، اما پروژه‌های بزرگ‌تر نیاز به تأیید گروه مالی مرکزی دارند. انتخاب پروژه‌ها مبتنی بر نرخ بازده داخلی (IRR) است که توسط گروه مالی مرکزی

در یک صفحه گسترده استاندارد محاسبه می‌شود. با این حال، چالش‌های بودجه‌ریزی از جمله عدم وجود بودجه اختصاصی برای پروژه‌های انرژی و محدودیت‌های سالانه، اجرای پروژه‌های جدید را در طول سال دشوار می‌سازد. علاوه بر این، تیم مالی بودجه انرژی کارخانه‌ها را متناسب با صرفه‌جویی‌های پیش‌بینی شده کاهش می‌دهد.

جنرال میلز با سرمایه‌گذاری در سامانه‌های اندازه‌گیری جزئی، امکان رصد مصرف انرژی هر دستگاه را فراهم کرده است. این سیستم نه تنها شناسایی پروژه‌های بالقوه را تسهیل می‌کند، بلکه با افزایش آگاهی کارکنان از الگوی مصرف، زمینه را برای اصلاح رفتارهای انرژی مهیا می‌سازد. اگرچه این شرکت هنوز مکانیسم رسمی برای گنجاندن الزامات انرژی در طراحی تأسیسات جدید ندارد، اما از طریق فرم درخواست بودجه، پرسش درباره کارایی انرژی پروژه‌ها را اجباری کرده است. همکاری غیررسمی بین مهندسان پروژه و مهندسان انرژی نیز اطمینان نسبی از بهینه‌سازی مصرف انرژی در طرح‌های جدید ایجاد می‌کند.

۴-۳-۷. نقش حمایت خارجی

دولت و شرکت‌های خدمات عمومی هر دو در شکل‌گیری و پیشرفت برنامه بهره‌وری انرژی جنرال میلز نقش داشته‌اند. یک برنامه ملی بهره‌وری انرژی بستری فراهم کرد تا این شرکت به صورت عمومی به اهداف بهره‌وری انرژی متعهد شود و نتایج خود را در راستای این اهداف منتشر کند. نقش حمایت‌های مالی مشتری‌محور در مناطق مختلف متفاوت بوده است. در مناطقی که جنرال میلز در این برنامه‌ها مشارکت

می‌کند، مشوق‌های مالی اصلی‌ترین مزیت محسوب می‌شوند. این مشوق‌ها با بهبود نرخ بازده داخلی (IRR) پروژه‌ها، شانس تأیید آن‌ها را افزایش می‌دهند، اگرچه به دلیل محاسبه نشدن به‌عنوان «کاهش هزینه پروژه» و در نظر گرفت‌نشده به‌عنوان «بازگشت سرمایه یکباره در سال اول»، تأثیر کمتری نسبت به برخی شرکت‌های دیگر دارند. همچنین ارزش این مشوق‌ها به دلیل وابستگی به صرفه‌جویی‌های تأییدشده در کارخانه‌ها با عدم قطعیت همراه است. با این حال، در مناطقی که امکان اجرای پروژه‌های سفارشی پیچیده را فراهم می‌کنند، مشوق‌ها ارزشمندترند، چرا که تیم انرژی را به‌جای تمرکز بر پروژه‌های ساده، به دنبال صرفه‌جویی‌های عمیق‌تر سوق می‌دهند. گراهام تورستینسون، رهبر پلتفرم انرژی جنرال میلز، تأکید می‌کند: «برنامه‌های طراحی‌شده به‌خوبی می‌توانند پروژه‌های بهتر و بلندپروازانه‌تری را رقم بزنند.»

حمایت‌های مهندسی نیز بخشی از کمک‌های برنامه‌های مشتری‌محور بوده است. برای مثال، یک سازمان پژوهش و توسعه انرژی به شرکت‌های صنعتی اجازه می‌دهد متخصصان خارجی را با هزینه‌اشتراکی به‌کارگیرند. این رویکرد برای پروژه‌های پیچیده مفید است، هرچند کیفیت متخصصان ارائه‌شده (که در برخی برنامه‌ها ضعیف است) ممکن است از اثربخشی آن بکاهد. تصمیم جنرال میلز برای مشارکت یا عدم مشارکت در این برنامه‌ها همواره مبتنی بر تحلیل هزینه-فایده است. تیم انرژی با بررسی خط لوله پروژه‌های هر کارخانه، نوع و میزان مشوق‌های موجود و پتانسیل حمایت مهندسی، مزایا را با هزینه‌های مشارکت مقایسه می‌کند. در مواردی که مشوق‌ها صرفاً به پروژه‌های ساده و از پیش تعیین‌شده محدود می‌شدند (و با پروژه‌های پیچیده‌تر شناسایی‌شده توسط مهندسان انرژی همخوانی نداشتند) شرکت ترجیح داد به‌صورت خودگردان عمل کند. این انعطاف‌پذیری استراتژیک به جنرال میلز اجازه می‌دهد تا هم‌زمان با بهره‌برداری از حمایت‌های خارجی، کنترل پروژه‌های کلیدی را در دست داشته باشد.

۷-۳-۵. نگاه به آینده

جنرال میلز با ایجاد یک برنامه قوی بهره‌وری انرژی در سال‌های اخیر، اکنون در موقعیتی استثنایی برای تقویت بیشتر این برنامه قرار دارد. یکی از راهکارهای کلیدی، اختصاص بودجه ویژه به پروژه‌های انرژی است که انعطاف‌پذیری بیشتری برای اجرای پروژه‌ها در طول سال فراهم می‌کند و نیاز به تأیید جداگانه هر پروژه توسط بخش

مالی را حذف می‌نماید. این تغییر نه‌تنها زمان مدیران انرژی را برای فرآیندهای اداری کاهش می‌دهد، بلکه امکان افزایش تعداد پروژه‌های اجراشده سالانه را نیز مهیا می‌سازد.

فرصت دیگر، تمرکز بر اقدامات بهره‌وری انرژی رفتاری است. با ایجاد فرهنگ صرفه‌جویی انرژی از طریق برنامه‌هایی مانند «شکار گنج انرژی» یا مشوق‌های بهره‌وری انرژی در خانه برای کارکنان، می‌توان به صرفه‌جویی‌های قابل توجهی دست یافت. حضور مهندسان انرژی تمام‌وقت در کارخانه‌های بزرگ جنرال میلز (مانند واحدهای موسوم به بیگ جی) این شرکت را قادر می‌سازد تا با تعامل مستقیم با کارکنان، چنین اقداماتی را به شکلی مؤثر اجرا کند.

رسمی‌سازی فرآیند ادغام بهره‌وری انرژی در پروژه‌های غیرمرتبط نیز از اولویت‌های آینده است. مشاوره اجباری با تیم انرژی در طراحی پروژه‌های جدید تولیدی، از نیاز به نوسازی‌های پرهزینه در آینده جلوگیری می‌کند. این رویکرد همچنین نصب تجهیزات کارآمد انرژی را (که ممکن است به‌عنوان پروژه‌های نوسازی استاندارد، معیارهای نرخ بازده داخلی (IRR) را برآورده نکنند) تسهیل می‌کند، چرا که هزینه نسبی این تجهیزات در مقایسه با جایگزین‌های کم‌بازده، توجیه‌پذیرتر است.

با بهره‌برداری از این فرصت‌ها، جنرال میلز می‌تواند نه‌تنها به اهداف زیست‌محیطی خود نزدیک‌تر شود، بلکه جایگاه رقابتی خود را در صنعت غذا نیز تقویت نماید.

۷-۴-۴. بهره‌وری انرژی در اینتل

۷-۴-۱. پیشینه شرکت

شرکت اینتل (Intel) به‌عنوان بزرگ‌ترین تولیدکننده نیمه‌هادی‌ها در جهان، در سال ۱۹۶۸ تأسیس شد و طی سه دهه گذشته با محوریت توسعه ریزپردازنده‌ها (که قلب تپنده رایانه‌های شخصی هستند) رشدی سریع را تجربه کرده است. اینتل علاوه بر تولید تراشه، چندین مرکز داده بزرگ را نیز مدیریت می‌کند. در سال ۲۰۱۴، درآمد این شرکت به ۵۶ میلیارد دلار رسید که نشان‌دهنده رشد ۶ درصدی نسبت به سال قبل بود. تأسیسات تولیدی اینتل در مناطق مختلف واقع شده‌اند.

۷-۴-۲. اهداف و دستاوردها

اینتل پیشرویی دیرینه در حوزه پایداری دارد و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای (GHG) همراه با بهبود بهره‌وری

انرژی، ستون اصلی این تلاش‌ها محسوب می‌شوند. این شرکت از سال ۱۹۹۶ گزارش‌دهی عمومی مصرف انرژی و تعهد به کاهش GHG را آغاز کرد. در سال ۲۰۰۳، اینتل با تعیین هدف کاهش ۴ درصدی سالانه شدت مصرف انرژی (به ازای هر سانتیمتر مربع سیلیکون)، گامی بلند برداشت. این معیار در ادامه با سیستم جدیدی جایگزین شد که در آن کلیه صرفه‌جویی‌های حاصل از اقدامات بهره‌وری انرژی، جمع‌آوری و به یک رقم کلی تبدیل می‌شود تا با مصرف انرژی کل شرکت مقایسه گردد.

در حال حاضر، اینتل برای سال ۲۰۲۰ یک هدف سالانه کاهش شدت مصرف انرژی در سطح شرکت تعیین کرده که به تفکیک منطقه و سایت اجرایی می‌شود. تا سال ۲۰۱۵، این شرکت موفق به ثبت ۱/۶ میلیارد کیلووات‌ساعت صرفه‌جویی انرژی ناشی از اقدامات بهره‌وری انرژی از سال ۲۰۱۲ شده بود. این دستاوردها نه تنها جایگاه اینتل را به عنوان پیشگام فناوری تقویت می‌کند، بلکه الگویی برای صنعت در همسویی رشد اقتصادی با مسئولیت‌پذیری زیست‌محیطی ارائه می‌دهد.

۳-۴-۷. سیستم شناسایی و اجرای اقدامات

ساختار سازمانی نسبتاً متمرکز اینتل در برنامه بهره‌وری انرژی آن بازتاب یافته است. هر سایت تولیدی این شرکت دارای یک «قهرمان انرژی» تمام‌وقت است که به دو صورت گزارش‌دهی می‌کند: مستقیم به مدیر عملیات سایت و به صورت ماتریسی به مدیر مرکزی بهره‌وری انرژی. تیم بهره‌وری انرژی متشکل از ۱۶ عضو با تخصص‌های محلی است که از طریق کنفرانس‌های تلفنی و ویدئویی، ایده‌ها و فرصت‌ها را به اشتراک گذاشته و اقدامات استاندارد را در چندین سایت گسترش می‌دهند.

فرآیند تصویب پروژه‌ها به این صورت است که پس از شناسایی، به تیم مرکزی بهره‌وری انرژی ارجاع می‌شوند تا امکان بهینه‌سازی از نظر صرفه‌جویی و هزینه بررسی شود. پروژه‌های واجد شرایط از طریق بودجه سالانه ۳۰ میلیون دلاری این حوزه تأمین مالی شده و بر اساس ارزش خالص فعلی^۱ (NPV) اولویت‌بندی می‌شوند. پروژه‌هایی که آستانه NPV را برآورده می‌کنند، معمولاً تأیید می‌شوند. اینتل ترجیح می‌دهد پروژه‌ها را با منابع داخلی (به جای استفاده از قراردادهای عملکرد انرژی) اجرا کند. انگیزه اینتل برای پیگیری بهره‌وری انرژی سه‌جانبه است:

۱. کاهش ردپای کربن.

۲. تقویت جایگاه رهبری در حوزه پایداری.

۳. کاهش هزینه‌ها با وجود سهم ۱ درصدی انرژی از کل هزینه‌ها، این مورد پس از نیروی کار، دومین هزینه متغیر بزرگ شرکت است. تمرکز بر بهره‌وری انرژی به عنوان اهرمی برای افزایش رقابت‌پذیری، نقش کلیدی ایفا می‌کند.

اقدامات اینتل عمدتاً بر بهینه‌سازی تأسیسات (مانند سیستم‌های سرمایشی، بازایی گرما، هوای فشرده و روشنایی) متمرکز است. با این حال، این شرکت در حال گسترش دامنه فعالیت‌ها به طراحی خطوط تولید جدید و ساختمان‌های پایدار است تا اطمینان حاصل شود که بهره‌وری انرژی از مرحله طراحی در زیرساخت‌ها نهادینه می‌شود.

۴-۴-۷. نقش حمایت خارجی

اگرچه اینتل عمدتاً بر برنامه داخلی خود تکیه دارد، حمایت نهادهای خارجی (به‌ویژه برنامه‌های تأمین شده توسط مصرف‌کنندگان) نقش مکملی ایفا کرده‌اند. مهم‌ترین کمک این برنامه‌ها، ارائه مشوق‌های مالی برای عبور پروژه‌ها از آستانه NPV بوده است. به عنوان مثال، Energy Trust of Oregon با ارائه ارزیابی‌های شخص ثالث و پشتیبانی فنی، به اجرای پروژه‌ها کمک کرده است.

اینتل همچنین در شکل‌دهی به طراحی برنامه‌های مشتری‌محور مشارکت فعال دارد. نمونه بارز این همکاری، اصلاح سیستم انگیزه‌های یک شرکت خدمات عمومی بود که ابتدا سهم مشتریان بزرگ را ناعادلانه تعیین کرده بود. با همکاری اینتل و دیگر صنایع، سقف مشوق‌ها متناسب با میزان مشارکت مالی تنظیم شد. راه‌حلی که منافع همه ذینفعان را تأمین کرد. این همکاری نشان می‌دهد که مشتریان بزرگ صنعتی می‌توانند با اجرای پروژه‌های مقرون‌به‌صرفه، هم‌زمان هزینه‌های خود و کل سیستم را کاهش دهند.

۵-۷. مطالعه موردی محلی: صنعت فولاد ایران و پتانسیل تطبیق راهکارها

در حالی که تجربیات شرکت‌های بین‌المللی مانند سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل الگوهای موفق برای بهینه‌سازی انرژی ارائه می‌دهند، بررسی یک مطالعه

1. Net Present Value



موردی بومی می‌تواند جنبه‌های عملی و تطبیقی این راهکارها را در زمینه‌های چالش‌برانگیز حوزه انرژی برجسته کند. صنعت فولاد ایران، به‌عنوان یکی از صنایع انرژی‌بر کلیدی با تمرکز بر فرآیندهای احیای مستقیم آهن^۱ (DRI) و کوره‌های قوس الکتریکی^۲ (EAF)، با چالش‌های منحصربه‌فردی مانند ناترازی گاز، فناوری‌های قدیمی و تحریم‌های بین‌المللی مواجه است. این بخش با تحلیل مصرف انرژی در صنعت فولاد ایران و مقایسه آن با کشورهای شاخص، پتانسیل ادغام راهکارهای شرکت‌های پیشرو را برای کاهش شدت مصرف انرژی و مقابله با ناترازی گاز بررسی می‌کند.

۷-۵-۱. پیشینه صنعت فولاد ایران

ایران با تولید سالانه بیش از ۳۰ میلیون تن فولاد، یکی از ۱۰ تولیدکننده برتر جهان است [۱۴]. فرآیند غالب تولید در ایران، روش EAF-DRI است که به دلیل دسترسی به منابع غنی گاز طبیعی، حدود ۸۰ درصد از انرژی موردنیاز را از گاز تأمین می‌کند [۱۵]. با این حال، مصرف انرژی ویژه^۳ (SEC) در این فرآیند بین ۱۰ تا ۲۰ گیگاژول بر تن فولاد

است و انتشار CO₂ آن حدود ۱.۲ تن به ازای هر تن فولاد گزارش شده است [۱۶]. چالش‌های اصلی شامل فناوری‌های قدیمی (بیش از ۷۰ درصد تجهیزات متعلق به دهه ۱۹۹۰) [۱۷]، تحریم‌ها که دسترسی به فناوری‌های نوین را محدود کرده [۱۸] و سهم ناچیز انرژی‌های تجدیدپذیر (تنها ۲ درصد) [۱۹] است. این عوامل وابستگی شدید به سوخت‌های فسیلی را افزایش داده و رقابت‌پذیری صنعت را تحت تأثیر قرار می‌دهد.

۷-۵-۲. مقایسه مصرف انرژی ایران با سایر کشورها

برای درک بهتر موقعیت ایران، مصرف انرژی در تولید فولاد با کشورهای پیشرو در این صنعت مقایسه می‌شود. داده‌ها نشان می‌دهند که ایران در مصرف گاز طبیعی (۰/۸-۰/۶ مترمکعب بر تن) بالاترین وابستگی را دارد، در حالی که کشورهای مانند آلمان (با تمرکز بر EAF پیشرفته) مصرف برق را بهینه کرده و سهم تجدیدپذیرها را به ۳۵ درصد رسانده‌اند [۲۰]. (جدول ۱) مقایسه‌ای از مصرف انرژی در سال ۲۰۲۳ ارائه می‌دهد [۱۵، ۱۶].

جدول ۱. مقایسه مصرف انرژی در تولید فولاد (۲۰۲۳)

کشور	مصرف برق (kWh/ton)	مصرف گاز (m ³ /ton)	مصرف گازوئیل (liters/ton)	فناوری غالب
ایران	۳۰۰-۲۵۰	۰/۸ - ۰/۶	۰/۱ - ۰/۰۵	DRI + EAF
آمریکا	۵۰۰-۳۵۰	۰/۸ - ۰/۴	۰/۱ - ۰/۰۵	EAF
چین	۴۰۰-۲۵۰	۰/۴ - ۰/۲	۰/۲ - ۰/۱	BF-BOF
آلمان	۴۵۰-۳۰۰	۱ - ۰/۵	۰/۰۵ - ۰/۰۲	EAF پیشرفته
روسیه	۴۵۰-۳۰۰	۰/۹ - ۰/۴	۰/۱۲ - ۰/۰۸	EAF + DRI
کره جنوبی	۴۰۰-۳۰۰	۰/۶ - ۰/۳	۰/۱ - ۰/۰۵	EAF
ترکیه	۳۵۰-۲۵۰	۱ - ۰/۵	۰/۱۵ - ۰/۱	EAF
برزیل	۳۵۰-۲۰۰	۰/۵ - ۰/۲	۰/۱۵ - ۰/۱	BF-BOF

طراحی آزمایشی^۴ (DOE) و مشارکت در ENERGY STAR می‌تواند برای بهینه‌سازی فرآیندهای DRI اعمال شود و مصرف گاز را ۱۵-۲۰ درصد کاهش دهد [۱۶].

این مقایسه نشان می‌دهد که شرکت‌های ایرانی برای کاهش مصرف گاز (که عامل اصلی ناترازی در سید سوخت مطابق جدول ۱، است)، می‌توانند از راهکارهای شرکت‌های مورد مطالعه الهام بگیرند. برای مثال، رویکرد سیمپلوت در

1. Direct Reduced Iron
2. Electric Arc Furnace
3. Specific Energy Consumption
4. Design of Experiments

۷-۵-۳. پتانسیل تطبیق راهکارهای شرکت‌های پیشرو در صنعت فولاد ایران

با الهام از تجربیات بین‌المللی، راهکارهای زیر برای تطبیق در صنعت فولاد ایران پیشنهاد می‌شود:

- همکاری چندجانبه و سرمایه‌گذاری هدفمند (با الگوبرداری از سیمپلوت و جنرال موتورز): سیمپلوت با سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بهینه‌ساز و همکاری با نهادهای دولتی، ۱۸ درصد کاهش شدت مصرف انرژی را محقق کرد [۱۶]. در صنعت فولاد ایران، این رویکرد می‌تواند برای نوسازی کوره‌های EAF با بودجه‌ریزی هدفمند اعمال شود که منجر به ۱۱ درصد کاهش هزینه‌های عملیاتی و کاهش وابستگی به گاز طبیعی شود [۱۵]. بر چالش تحریم‌ها، می‌توان با تمرکز بر فناوری‌های داخلی و همکاری با کشورهای همسایه غلبه کرد [۲۱].
- توانمندسازی نیروی انسانی و سیستم‌های هوشمند (با الگوبرداری از جنرال میلز و اینتل): جنرال میلز با استخدام مهندسان حوزه انرژی و ادغام سیستم‌های اندازه‌گیری، مصرف انرژی را ۳ درصد در سال کاهش داد [۲۲]. اینتل نیز با سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی، مصرف مراکز داده را ۳۰ درصد کاهش داد [۲۳]. در صنعت فولاد ایران، آموزش نیروی انسانی برای برنامه‌هایی مانند «بهینه‌سازی انرژی» (از جنرال موتورز) و ادغام IoT^۱ در کوره‌ها می‌تواند مصرف برق را ۱۰-۱۵ درصد کاهش دهد [۲۴، ۲۵]. با پتانسیل بالای استفاده از انرژی خورشیدی در ایران، می‌توان ۵۰ درصد برق کوره‌های قوس الکتریکی (EAF) را از پنل‌های خورشیدی تأمین کرد، مشابه پروژه JSW Steel هند [۲۶].

- ادغام فناوری‌های نوین برای مقابله با ناترازی گاز: با الهام از راهکارهای مبتنی بر داده شرکت‌های پیشرو، شرکت‌های صنعتی ایران می‌توانند فناوری‌هایی مانند هیدروژن سبز (مشابه HYBRIT سوئد) [۲۲] یا جذب و ذخیره کربن^۲ (CCUS) [۲۷] را پیاده‌سازی نمایند. علاوه بر این، بررسی تولید بیوهیدروژن به عنوان منبع انرژی جایگزین می‌تواند وابستگی به گاز طبیعی را کاهش دهد [۲۸]. همچنین، بهبود خواص مکانیکی مواد لوله‌ها در برابر خوردگی و ذرات جامد، با استفاده از کامپوزیت‌های نانو، می‌تواند دوام زیرساخت‌های انرژی را افزایش دهد [۲۹، ۳۰]. برای مثال، جایگزینی بخشی از گاز طبیعی با هیدروژن سبز می‌تواند انتشار CO₂ را ۹۰ درصد کاهش دهد و مصرف انرژی را ۲۰-۳۰ درصد بهینه کند [۳۱-۳۳]. همچنین، سیستم‌های بازیافت حرارت (الگوبرداری از POSCO کره جنوبی) [۲۴] می‌تواند بازدهی حرارتی را به ۸۰ درصد برساند و فشار بر منابع گاز را کاهش دهد.

تجربیات شرکت‌های بین‌المللی مانند سیمپلوت، جنرال موتورز، اینتل و جنرال میلز نشان می‌دهد که ترکیب مداخلات فناورانه و مدیریتی می‌تواند در کاهش شدت مصرف انرژی و مدیریت ریسک‌های ناشی از ناترازی گاز بسیار مؤثر باشد. در این شرکت‌ها، استفاده از طراحی آزمایشی در فرآیندها، بهینه‌سازی خطوط تولید، استقرار سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی و برنامه‌های نظام‌مند آموزش نیروی انسانی، منجر به کاهش ملموس مصرف انرژی، هزینه‌های عملیاتی و فشار بر زیرساخت‌های تأمین گاز شده است. در جدول ۲، راهکارهای کلیدی این شرکت‌ها، نتایج کمی حاصل‌شده و تأثیرات آن‌ها بر ناترازی گاز و شاخص‌های کلان اقتصادی مانند مهار تورم و رشد تولید، به صورت خلاصه ارائه شده است.

جدول ۲. راهکارهای کلیدی، نتایج و تأثیرات آن‌ها بر مدیریت ناترازی گاز، مهار تورم و رشد تولید

تأثیر بر مهار تورم و رشد تولید	تأثیر بر ناترازی گاز	نتایج	راهکار
کاهش ۱۰ درصدی هزینه‌های تولید و افزایش سودآوری	کاهش مصرف گاز و بهبود توازن عرضه-تقاضا	کاهش ۱۸ درصدی شدت مصرف انرژی در فرآیندهای غذایی	طراحی آزمایشی (DOE) در سیمپلوت
آزادسازی منابع مالی برای توسعه محصولات الکتریکی	کاهش وابستگی به گاز در فرآیندهای صنعتی	کاهش ۱۱ درصدی هزینه‌های عملیاتی	بهینه‌سازی خطوط تولید در جنرال موتورز
کاهش هزینه‌های زیرساختی و افزایش ظرفیت تولیدی	کاهش فشار بر شبکه گاز	کاهش ۳۰ درصدی مصرف انرژی مراکز داده	سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی در اینتل
کاهش قیمت تمام‌شده محصولات و افزایش رقابت در بازار	بهبود مدیریت مصرف در سایت‌های صنعتی	کاهش ۴ درصدی سالانه شدت مصرف انرژی	آموزش نیروی انسانی در جنرال میلز

1. Design of Experiments
2. Internet of Things

همان گونه که (جدول ۲) نشان می دهد، هر یک از این راهکارها علاوه بر کاهش مستقیم شدت مصرف انرژی و فشار بر شبکه گاز، از طریق کاهش هزینه های تولید، آزادسازی منابع سرمایه ای و ارتقای بهره وری، به مهار فشارهای تورمی و تقویت رشد تولید کمک می کنند. در صنعت فولاد ایران، می توان با بومی سازی این رویکردها، اقداماتی مانند استفاده از طراحی آزمایشی در بهینه سازی شرایط عملیاتی واحدهای DRI، بازطراحی خطوط نورد و ذوب، استقرار سیستم های پایش و مدیریت هوشمند انرژی در کوره های EAF و اجرای برنامه های آموزش تخصصی انرژی برای کارکنان بهره برداری را به عنوان مسیرهای عملی برای کاهش وابستگی به گاز و ارتقای رقابت پذیری دنبال کرد.

۷-۵-۴. تحلیل SWOT^۱ برای تطبیق راهکارها در ایران

برای ارزیابی عملی، تحلیل SWOT زیر ارائه می شود:

- نقاط قوت (Strengths): منابع غنی گاز طبیعی و پتانسیل انرژی خورشیدی؛ نیروی کار متخصص در صنایع انرژی بر [۱۹].
- نقاط ضعف (Weaknesses): فناوری قدیمی و تحریم ها که دسترسی به تجهیزات نوین را محدود می کند [۱۷، ۱۸].
- فرصت ها (Opportunities): همکاری بین المللی با کشورهای مانند آلمان و کره جنوبی برای انتقال دانش [۲۰، ۳۴]؛ ادغام راهکارهای شرکت های پیشرو برای کاهش ۲۰-۳۰ درصد مصرف انرژی [۱۶].
- تهدیدها (Threats): نوسانات بازار گاز و تغییرات اقلیمی که ناترازی را تشدید می کند [۲۳].

این تحلیل نشان می دهد که تطبیق راهکارها نه تنها نوآورانه است، بلکه با تمرکز بر مدل های هیبریدی (ترکیب تجربیات جهانی با شرایط محلی)، می تواند صنعت فولاد ایران را به سمت توسعه پایدار سوق دهد. برای مثال، پیاده سازی DOE سیمپلوت در فرآیندهای DRI می تواند نرخ بازده داخلی^۲ (IRR) را به ۱۵ درصد برساند، مشابه تجربیات جهانی [۲۰]. در نهایت، این مطالعه موردی محلی تأکید می کند که تجربیات شرکت های بین المللی می تواند با بومی سازی، چالش های ناترازی گاز در ایران را حل کند و به کاهش رد پای کربن کمک نماید.

۸. محاسبات عددی بهینه سازی

در دنیای امروز، جایی که صنایع انرژی بر مسئول بیش از ۳۷ درصد مصرف انرژی جهانی و سهم عمده ای از انتشار گازهای گلخانه ای هستند، مدل های عددی بهینه سازی نه تنها یک ابزار فنی، بلکه یک اهرم استراتژیک برای دستیابی به پایداری اقتصادی و زیست محیطی به شمار می روند. این مدل ها، با بهره گیری از الگوریتم های پیشرفته ریاضی، امکان شبیه سازی سناریوهای پیچیده، پیش بینی رفتار سیستم ها و شناسایی نقاط بهینه را فراهم می کنند که می تواند منجر به کاهش تا ۳۰ درصد مصرف انرژی و صرفه جویی های مالی چشمگیر شود. بر اساس گزارش های آژانس بین المللی انرژی (IEA)، کاربرد این روش ها در صنایع سنگین مانند فولاد، خودروسازی و فناوری، پتانسیل کاهش انتشار CO₂ به میزان میلیاردها تن در سال را دارد. در این بخش، با تمرکز بر رویکردهای کلیدی مانند برنامه ریزی خطی (LP)، برنامه ریزی عدد صحیح مختلط (MILP)، برنامه ریزی غیر خطی (NLP)، الگوریتم ژنتیک (GA) و الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)، روابط ریاضی اساسی، کاربردهای عملی و مثال های واقعی مرتبط با شرکت های مورد مطالعه (سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل) و حتی صنعت فولاد ایران بررسی می شود. این روش ها نه تنها در سطح تئوریک، بلکه در پیاده سازی های واقعی، مانند بهینه سازی سیستم های انرژی در کارخانه های غذایی یا مراکز داده، اثبات شده اند و می توانند چالش هایی مانند ناترازی گاز را با دقت بالا مدیریت کنند.

۸-۱. برنامه ریزی خطی^۳ (LP): پایه ای برای تخصیص بهینه منابع

برنامه ریزی خطی، به عنوان یکی از قدیمی ترین و قدرتمندترین ابزارهای بهینه سازی، بر پایه مدل های خطی بنا شده و برای حل مسائل تخصیص منابع در محیط های محدود ایده آل است. این روش با حداکثر یا حداقل کردن یک تابع هدف خطی، تحت محدودیت های خطی، امکان تصمیم گیری های دقیق را فراهم می کند و در صنایع انرژی بر، برای کاهش هزینه های عملیاتی تا ۲۰-۳۰ درصد کاربرد دارد. مدل استاندارد LP به صورت رابطه (۱) تعریف می شود [۳۵]:

$$Z = \sum_{j=1}^n x_j c_j \quad (1)$$

1. Strengths-Weaknesses-Opportunities-Threats
2. Internal Rate of Return
3. Linear Programming

که در آن x_j متغیرهای تصمیم (مانند میزان استفاده از تجهیز j) و c_j ضرایب هزینه انرژی هستند. محدودیت‌ها شامل نامعادلات خطی $\sum_{j=1}^n x_{ij} a_j \leq b_i$ برای $i=1,2,\dots,m$ و قیود غیرمنفی $x_j \geq 0$ می‌شوند. الگوریتم‌هایی مانند سیمپلکس یا روش‌های داخلی، این مدل را به سرعت حل می‌کنند.

در کاربردهای عملی، LP در صنایع غذایی مانند جنرال میلز برای تخصیص بهینه منابع تولید و کاهش مصرف انرژی در خطوط فرآوری استفاده می‌شود، جایی که می‌تواند هزینه‌های انرژی را تا ۱۵ درصد کاهش دهد [۳۶]. برای مثال، در یک مطالعه موردی در صنعت نساجی (مشابه فرآیندهای غذایی سیمپلوت)، مدل LP هزینه‌های انرژی را با تخصیص بهینه سوخت و برق به حداقل رساند و صرفه‌جویی سالانه ۱۰-۲۰ درصد ایجاد کرد [۳۷]. در صنعت فولاد ایران، LP می‌تواند برای بهینه‌سازی مصرف گاز در فرآیند DRI اعمال شود، جایی که محدودیت‌های عرضه گاز را در نظر گرفته و وابستگی به سوخت فسیلی را کاهش دهد، با پتانسیل صرفه‌جویی ۱۰-۱۵ درصد [۳۵، ۳۶].

۲-۸. برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط (MILP): مدیریت تصمیمات گسسته در سیستم‌های پیچیده

MILP با ادغام متغیرهای پیوسته و گسسته (مانند تصمیمات روشن/خاموش تجهیزات)، برای مدل‌سازی مسائل واقعی که نیاز به انتخاب‌های باینری دارند، ایده‌آل است. این روش که اغلب با الگوریتم‌های شاخه و کران حل می‌شود، در صنایع انرژی‌بر برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. فرم کلی مدل MILP به صورت رابطه (۲) است [۳۸]:

$$Z = \sum_{j=1}^n x_j c_j \quad (2)$$

با محدودیت‌های خطی $\sum_{j=1}^n x_{ij} a_j \leq b_i$ و قید صحیح بودن برای برخی متغیرها، یعنی $x_j \in \{0,1\}$ برای $j \in \{1,\dots,n\}$. در شرکت‌هایی مانند سیمپلوت یا جنرال موتورز، MILP برای مدل‌سازی تصمیمات گسسته مانند انتخاب تجهیزات در خطوط تولید مفید است؛ برای نمونه، در خودروسازی، این مدل زمان‌بندی تولید را بهینه می‌کند و مصرف انرژی را ۲۰-۳۰ درصد کاهش می‌دهد. یک مطالعه موردی در

سیستم‌های انرژی صنعتی نشان داد که MILP هزینه‌های انرژی را در کارخانه‌های پردازشی تا ۴۰ درصد بهینه می‌کند. در صنعت فولاد ایران، MILP می‌تواند برای تصمیم‌گیری در مورد فعال‌سازی کوره‌های EAF تحت محدودیت‌های گاز استفاده شود، که منجر به کاهش وابستگی به گاز طبیعی و صرفه‌جویی ۱۵-۲۵ درصد می‌شود [۳۹، ۳۸]. این روش، که اغلب با الگوریتم‌های شاخه و کران حل می‌شود، در صنایع انرژی‌بر برای بهینه‌سازی شبکه‌های پیچیده کاربرد دارد و می‌تواند هزینه‌های عملیاتی را تا ۵۰ درصد کاهش دهد [۴۰].

۳-۸. برنامه‌ریزی غیرخطی (NLP): مقابله با پیچیدگی‌های غیرخطی در فرآیندهای حرارتی

NLP برای مسائل با توابع غیرخطی، مانند روابط ترمودینامیکی در فرآیندهای شیمیایی، طراحی شده و با روش‌هایی مانند گرادیان یا نیوتن-رافسون حل می‌شود. این رویکرد در صنایع انرژی‌بر، جایی که رفتار سیستم‌ها غیرخطی است، می‌تواند بازدهی را تا ۲۵ درصد افزایش دهد. فرم کلی NLP عبارت است از [۴۱]:

$$Z = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

با محدودیت‌های نامساوی $g_i(x_1, \dots, x_n) \leq 0$ برای $i=1,2,\dots,m$ و تساوی $h_j(x_1, \dots, x_n)=0$ برای $j=1,2,\dots,p$ که h, g, f می‌توانند غیرخطی باشند.

در جنرال میلز، NLP برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در خطوط تولید پیوسته، مانند فرآیندهای حرارتی، اعمال می‌شود و اتلاف انرژی را کاهش می‌دهد. مثالی واقعی در انرژی سیستم‌ها نشان می‌دهد که NLP در مدل‌سازی فرآیندهای شیمیایی، صرفه‌جویی ۱۵-۲۰ درصد ایجاد می‌کند. در صنعت فولاد ایران، NLP می‌تواند برای بهینه‌سازی دما و فشار در فرآیندهای DRI استفاده شود که وابستگی به گاز را کاهش داده و انتشار CO_2 را ۱۰-۲۰ درصد کم می‌کند [۳۶، ۳۸، ۴۲].

۴-۸. الگوریتم ژنتیک (GA): الهام‌گرفته از طبیعت برای حل مسائل پیچیده

GA، به عنوان یک روش فراابتکاری، از اصول تکامل طبیعی برای جستجوی فضای جواب استفاده می‌کند و برای مسائل غیرخطی و چندمعیاره ایده‌آل است، با پتانسیل کاهش

1. Mixed-Integer Linear Programming
2. Non-Linear Programming
3. Genetic Algorithm



مصرف انرژی تا ۳۰ درصد در سیستم‌های پیچیده. احتمال انتخاب هر جواب بر اساس میزان برآزندگی آن به صورت رابطه (۴) تعریف می‌شود [۴۱]:

$$P_i = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (4)$$

که در آن $F(x_i)$ مقدار تابع برازندگی جواب x_i و N اندازه جمعیت است. در خطوط مونتاژ جنرال موتورز، GA ساختار تولید را بهینه می‌کند و انرژی را صرفه‌جویی می‌کند. مطالعاتی نشان می‌دهد GA در سیستم‌های انرژی صنعتی، کارایی را افزایش می‌دهد. در صنعت فولاد ایران، GA می‌تواند برای بهینه‌سازی ترکیب سوخت در کوره‌ها استفاده شود، با صرفه‌جویی ۲۰ درصد [۴۸، ۳۴].

۸-۵. الگوریتم ازدحام ذرات (PSO): هوش جمعی برای بهینه‌سازی پویا

PSO، الهام‌گرفته از رفتار پرندگان، برای مسائل پویا و چندبعدی مناسب است و در مراکز داده مانند اینتل، مصرف انرژی را تا ۲۰-۳۰ درصد کاهش می‌دهد. معادلات به‌روزرسانی [۴۴]:

$$v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 r_1 (p_i - x_i^t) + c_2 r_2 (g - x_i^t) \quad (5)$$

$$x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \quad (6)$$

در این روابط، $x_i(t)$ موقعیت ذره i در زمان t ، $v_i(t)$ سرعت حرکت، p_i بهترین موقعیت قبلی ذره و g بهترین موقعیت یافت‌شده توسط کل جمعیت است. ضرایب c_1 ، c_2 و w ضرایب تنظیم‌کننده الگوریتم هستند و مقادیر تصادفی r_1 ، r_2 در بازه (۰، ۱) تولید می‌شوند. در اینتل، PSO برای مدیریت انرژی مراکز داده استفاده می‌شود و صرفه‌جویی ایجاد می‌کند. مثالی در داده‌سنترها نشان می‌دهد PSO انرژی را بهینه می‌کند. در صنعت فولاد ایران، PSO می‌تواند برای زمان‌بندی کوره‌ها اعمال شود، با کاهش ۱۵-۲۵ درصد مصرف گاز [۴۵، ۴۴، ۴۲].

در نهایت، این مدل‌ها نه تنها ابزارهای محاسباتی، بلکه کلید تحول دیجیتال در صنایع انرژی‌بر هستند که با ادغام در سیستم‌های واقعی، پایداری را تضمین می‌کنند.

۹. نتیجه‌گیری

این پژوهش، با بهره‌گیری از رویکرد اقتصاد مهندسی، به

کاوش عمیق راهکارهای صرفه‌جویی انرژی در صنایع انرژی‌بر پرداخته و چالش‌های ناشی از ناترازی گاز را در چارچوب تجربیات شرکت‌های بین‌المللی پیشرو مورد تحلیل قرار داده است. یافته‌ها نشان‌دهنده آن است که ادغام اصول مهندسی اقتصادی نه تنها مصرف منابع را بهینه‌سازی می‌کند، بلکه به عنوان اهرمی محوری در کنترل تورم، تقویت رشد اقتصادی و تضمین امنیت انرژی عمل می‌نماید. مطالعه موردی شرکت‌های سیمپلوت، جنرال موتورز، جنرال میلز و اینتل، همراه با بررسی بومی صنعت فولاد ایران، گواه بر این است که راهکارهای سیستماتیک (از جمله مدل‌های عددی بهینه‌سازی مانند برنامه‌ریزی خطی (LP) و الگوریتم‌های فرا ابتکاری (GA و PSO) می‌توانند شدت مصرف انرژی را تا ۳۰ درصد کاهش دهند، هزینه‌های عملیاتی را بهینه کنند و رقابت‌پذیری را ارتقا بخشند. برای نمونه، اقدامات سیمپلوت در بهینه‌سازی فرآیندهای غذایی از طریق طراحی آزمایشی (DOE) نه تنها ۱۸ درصد کاهش شدت مصرف انرژی را به ارمغان آورد، بلکه صرفه‌جویی سالانه ۴۴۸۲۵۳ دلاری را محقق ساخت که این دستاوردها فشار ناترازی گاز را کاهش داده و فضایی برای نوآوری فراهم کرد.

بر پایه گزارش‌های آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) و داده‌های جهانی تا سال ۲۰۲۴، بخش صنعت همچنان مسئول حدود ۳۷ درصد از مصرف انرژی جهانی و بخش عمده‌ای از انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۳]. آماري که ضرورت بازنگری فوری در الگوهای مصرف و اصلاح فرآیندهای صنعتی را برجسته می‌سازد. با این حال، موانع ساختاری همچون مقاومت سازمانی در برابر تغییرات فناورانه، کمبود سرمایه‌گذاری‌های هدفمند و فقدان استانداردهای یکپارچه صنعتی، اجرای برنامه‌های بهره‌وری انرژی را با چالش‌های جدی مواجه می‌سازد [۴]. در این زمینه، همکاری چند جانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای انرژی (مانند تجربیات موفق سیمپلوت و جنرال موتورز) به عنوان کلیدی برای غلبه بر ناترازی گاز شناسایی شد. علاوه بر این، توانمندسازی نیروی انسانی از طریق برنامه‌های آموزشی پیشرفته (نظیر «قهرمانان انرژی» در سیمپلوت) فرهنگ سازمانی را دگرگون کرده و مدیریت مصرف را به بسط‌محی نوین می‌رساند که این رویکردها در صنعت فولاد ایران نیز پتانسیل کاهش وابستگی به گاز طبیعی تا ۲۰-۳۰ درصد را داراست.

راهکارهای کلیدی استخراج‌شده از شرکت‌های مورد



- Studies, "International Energy Agency (IEA)", vol. pp. 2025.
- [3]. Energy Efficiency 2024 – Global Progress and Outlook, "International Energy Agency (IEA)", vol. pp. 2024.
- [4]. Decarbonising Energy-Intensive Industries: Electrification and Flexibility Strategies, "Fraunhofer Institute ", vol. pp. 2022.
- [5]. American Council on Energy Efficiency, 2021.
- [6]. World Economic Forum Annual Meeting 2024.
- [7]. D. Sturtevant, "Energy Efficiency: The Simplot Way", vol. pp. March 16, 2011.
- [8]. J.R. Simplot Co., "2023 J. R. Simplot Company Sustainability Summary", vol. pp. 2023.
- [9]. Energy Performance-Better Plants Data, J.R. Simplot Company, "U.S. Department of Energy, Better Buildings Initiative", vol. pp. April 2016.
- [10]. Idaho Office of Energy Resources and DOE Demonstrate the Value of Strategic Energy Management through a Pilot Project at the J.R. Simplot Company, "Idaho Governor's Office of Energy Resources", vol. pp. 2013.
- [11]. General Motors, "2015 Sustainability Report", vol. pp. 2015.
- [12]. GM Co., "GM 2023 Sustainability Report", vol. pp. 2023.
- [13]. General Mills Co., "General Mills Global Responsibility Report 2024", vol. pp. 2024.
- [14]. World Steel Association, "World Steel
- مطالعه که موفقیت آن‌ها را رقم زد، شامل روش‌های داده‌محور و آزمایشی (مانند DOE برای شناسایی فرآیندهای کم‌مصرف)، سرمایه‌گذاری استراتژیک در پروژه‌های با بازدهی بالا (با آستانه IRR ۱۵ درصد در سیمپلوت)، جایگزینی سوخت‌های فسیلی با فناوری‌های تجدیدپذیر (مانند انرژی خورشیدی در اینتل)، تقویت نیروی انسانی از طریق آموزش‌های تخصصی و هم‌راستایی با سیاست‌های تشویقی (نظیر برنامه ENERGY STAR) می‌شود. این راهکارها نه تنها مصرف انرژی را کاهش دادند، بلکه با آزادسازی منابع مالی و تقویت زنجیره ارزش، صنایع را به سمت یک چرخه توسعه پایدار هدایت کردند. ادغام مدل‌های عددی بهینه‌سازی در این راهکارها، مانند کاربرد MILP در تصمیم‌گیری‌های گسسته صنعت فولاد ایران، نوآوری را به سطح عملیاتی رسانده و پتانسیل صرفه‌جویی‌های مالی و زیست‌محیطی را دوچندان می‌کند.
- با نگاهی به افق پیش رو، صنایع انرژی‌بر برای مدیریت مؤثر ناترازی گاز و همگامی با تحولات جهانی، باید بر محورهای کلیدی زیر تمرکز کنند:
- ادغام فناوری‌های نو ظهور مانند خودروهای الکتریکی و سیستم‌های هیبریدی انرژی در زیرساخت‌های موجود که نیازمند سرمایه‌گذاری بلندمدت و همکاری‌های بین‌المللی است.
 - توسعه استانداردهای صنعتی برای اندازه‌گیری و گزارش‌دهی بهره‌وری انرژی، به‌ویژه در حوزه ایمنی، سلامت و محیط‌زیست (HSE) تا هماهنگی میان‌بخشی تقویت شود [۴۶].
 - تعمیق همکاری‌های چندجانبه میان دولت، بخش خصوصی و نهادهای جهانی مانند IEA، برای پر کردن شکاف‌های فناورانه و مالی.
 - آموزش مداوم نیروی انسانی و پرورش فرهنگ‌سازمانی مبتنی بر نوآوری، صرفه‌جویی انرژی و مدل‌های محاسباتی پیشرفته.
- مراجع:**
- [1]. International Industrial Energy Efficiency Policy Case Studies, "Department for Energy Security and Net Zero", vol. pp. 2023.
- [2]. Energy Efficiency Policy Toolkit – Case

- methods, sources, and separation”, *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, vol. 16, pp. 2024.
- [29]. A. Sabetghadam-Isfahani, M. Abbasi, S. Sharifi, M. Fattahi, S. Amirkhanlou, and Y. Fattahi, “Microstructure and mechanical properties of carbon nanotubes/AZ31 magnesium composite gas tungsten arc welding filler rods fabricated by powder metallurgy”, *Diamond and Related Materials*, vol. 69, pp. 160–165, 2016.
- [30]. A. Sabetghadam-Isfahani, H. Zalaghi, S. Hashempour, M. Fattahi, S. Amirkhanlou, and Y. Fattahi, “Fabrication and properties of ZrO₂/AZ31 nanocomposite fillers of gas tungsten arc welding by accumulative roll bonding”, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 16, pp. 397–402, 2016.
- [31]. S. AG, “Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [32]. Industrial Heat and Energy Efficiency – IDRIC Frontiers Report, “Industrial Decarbonisation Research & Innovation Centre (IDRIC)”, vol. pp. 2024.
- [33]. Energy Management in Industrial Clusters: A Systems Approach, “*Journal of Cleaner Production*”, vol. pp. 2023.
- [34]. POSCO, “Annual Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [35]. I. Kimutai, P. Maina, and A. Makokha, “Energy Optimization Model Using Linear Programming for Process Industry: A Case Study of Textile Manufacturing Plant in Kenya”, vol. pp. 45–52, 2023.
- [36]. E. Arteaga-Cabrera, C. Ramírez-Márquez, E. Sánchez-Ramírez, J. G. Segovia-Hernández, O. Osorio-Mora, Association Steel Statistical Yearbook, 2010”, *World Steel Association: Brussels, Belgium*, vol. pp. 2023.
- [15]. Global Energy Statistical Yearbook, vol. pp. 2023.
- [16]. IEA, “Iron and Steel Technology Roadmap”, vol. pp. 2022.
- [17]. Ministry of Industry, “Mine and Trade of Iran, Industrial Equipment Status Report”, vol. pp. 2023.
- [18]. World Bank, “Economic Challenges in Iran”, vol. pp. 2023.
- [19]. Iran Renewable Energy Association, “Renewable Energy Potential in Iran”, vol. pp. 2023.
- [20]. Eurofer, “Sustainability in Steel Production”, vol. pp. 2023.
- [21]. Turkish Steel Producers Association, “Steel Industry Overview”, vol. pp. 2023.
- [22]. HYBRIT Initiative, “Hydrogen-Based Steelmaking”, vol. pp. 2023.
- [23]. IPCC, “Sixth Assessment Report”, vol. pp. 2023.
- [24]. POSCO, “Annual Report”, vol. pp. 2022.
- [25]. McKinsey, “The Net-Zero Steel Challenge”, vol. pp. 2022.
- [26]. JSW Group, “Sustainability Report”, vol. pp. 2023.
- [27]. Northern Lights Project, “Project Overview”, vol. pp. 2023.
- [28]. Y. Davoodbeygi, A. Sabetghadam-Isfahani, S. Allami, A. Oudi, and S. Eghtedari, “A review on biohydrogen production technology: Production





- [43]. L. V. Ramir D.T. Certeza, A. R. Purnama, A. Ahsan, J. S. C. Low, and W. F. Lu, "Review of mathematical programming models for energy-based industrial symbiosis networks", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 212, pp. 115377, 2025.
- [44]. X. Liu, G. Hou, and L. Yang, "Optimizing data center energy consumption via energy complementarity scheduling", *Energy Reports*, vol. 12, pp. 5990–5997, 2024.
- [45]. T. Djemai, P. Stolf, T. Monteil, and J.-M. Pierson, "A discrete particle swarm optimization approach for energy-efficient IoT services placement over fog infrastructures", *IEEE*, 2019.
- [46]. Integrating Energy Efficiency into HSE Systems: A Case-Based Framework, "Applied Energy", vol. pp. 2025.
- and J. A. Gómez-Salazar, "Advancing Optimization Strategies in the Food Industry: From Traditional Approaches to Multi-Objective and Technology-Integrated Solutions", *Applied Sciences*, vol. 15, pp. 3846, 2025.
- [37]. L. Wang, "Energy efficiency technologies for sustainable food processing", *Energy efficiency*, vol. 7, pp. 791–810, 2014.
- [38]. Y. Zeng, Y. Cai, G. Huang, and J. Dai, "A Review on Optimization Modeling of Energy Systems Planning and GHG Emission Mitigation under Uncertainty", *Energies*, vol. 4, pp. 1624–1656, 2011.
- [39]. O. B. Ogunmodede, "Modeling and Solving Large-Scale Optimization Problems: Case Studies in Renewable Energy and Mining", (Doctoral dissertation, Colorado School of Mines), vol. pp. 2021.
- [40]. S. Sundaramoorthy, D. Kamath, S. Nimbalkar, C. Price, T. Wenning, and J. Cresko, "Energy efficiency as a foundational technology pillar for industrial decarbonization", *Sustainability*, vol. 15, pp. 9487, 2023.
- [41]. D. Atabay, "Comparison of optimization methods for model predictive control: An application to a compressed air energy storage system", (Doctoral dissertation, Technische Universität München), vol. pp. 2018.
- [42]. B. Zhang, L. Xu, and J. Zhang, "Developing mathematical model and optimization algorithm for designing energy efficient semi-automated assembly line", *Computers & Industrial Engineering*, vol. 149, pp. 106768, 2020.

Energy Optimization in Energy-Intensive Industries with a Focus on Engineering Economics: A Case Study of Productivity in International Companies

Reza Rafiei¹, Armin Sabetghadam-Isfahani², Yegane Davoodbeygi^{3*}, Seyed Mahmood Latifi⁴

1. CEO of Hormozgan Province Gas Company, Bandar Abbas, Iran
2. Instructor, Department of Safety Engineering and Technical Inspection, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
3. Assistant Professor, Department of Chemical Engineering, Faculty of Chemical and Petroleum Engineering, University of Hormozgan, Bandar Abbas, Iran
4. M. Sc, Faculty of Corrosion Engineering and Protection of Materials, Coastal Marine Campus, Amirkabir University of Technology, Bandar Abbas, Iran

ARTICLE INFO

REVIEW ARTICLE

Article History:

Received: 13 October 2025

Revised: 13 December 2025

Accepted: 26 February 2026

Keywords:

Energy Efficiency

Gas Imbalance

Energy-Intensive Industries

Sustainable Development

ABSTRACT

This article, adopting an engineering economics approach, examines energy-saving strategies in energy-intensive industries and analyzes the challenges of gas imbalance in international companies and the local context of Iran. The case study of four leading companies (Simplot, General Motors, General Mills, and Intel), along with a comparative review in Iran's steel industry, demonstrated that a combination of multilateral collaboration (government, private sector, and energy institutions), targeted investment in optimization technologies, development of specialized human resources, and numerical optimization models (such as linear programming and metaheuristic algorithms) plays a key role in reducing energy intensity by up to 30% and operational costs. For example, Simplot achieved an 18% reduction in energy intensity in food processes by employing Design of Experiments (DOE) and participating in the ENERGY STAR program, while General Motors recorded an 11% reduction in operational costs through production line optimization. The main challenge in gas imbalance is adapting energy efficiency strategies with emerging technologies (such as electric vehicles and green hydrogen) and integrating computational models into local processes like direct reduced iron (DRI) in Iran, which provides the potential to reduce dependence on natural gas by 20-30%. The findings indicate that these measures not only yield short-term financial returns (with an internal rate of return of 15%) but also contribute to sustainable industrial development through reducing carbon footprint, enhancing energy security, and applying global-local hybrid models. The results emphasize the necessity of transforming successful experiences into integrated industrial standards and incorporating them into HSE systems for efficient management of gas imbalance.

DOR: [20.1001.1.2510.1109.1404.07.21](https://doi.org/10.1001.1.2510.1109.1404.07.21)

How to cite this article

R. Rafiei, A. Sabetghadam-Isfahani, Y. Davoodbeygi, S.M. Latifi, Energy Optimization in Energy-Intensive Industries with a Focus on Engineering Economics: A Case Study of Productivity in International Companies. *Iranian Journal of Gas Engineering*. 2026 13(1):9-36. (https://ijge.irangi.org/article_738763.html)

* Corresponding Author.

E-mail address: y.davoodbeygi@hormozgan.ac.ir, (Y. Davoodbeygi).

Available online 21 June 2026

25885-5251/© 2014 The Authors. Published by Iranian Gas Institute.

This is an open access article under the CC BY license. (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>)

