



اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد

Yazd Chamber of Commerce,
Industries, Mines and Agriculture



بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع (فولاد، پتروشیمی، کاشی و سرامیک)
۵ راهکار عملیاتی کوتاه مدت

مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

بهار ۱۴۰۴



اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی یزد
مرکز پژوهش‌های اقتصادی

عنوان گزارش

بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع (فولاد، پتروشیمی، کاشی و سرامیک)
۵ راهکار عملیاتی کوتاه مدت

سفارش و نظارت

مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد

پژوهشگر

علی صالحی فیروزآبادی

تدوین

محمد عربی ندوشن

علاقه‌مندان می‌توانند از طریق پست الکترونیک زیر نظرات خود را به
مرکز پژوهش‌های اقتصادی اتاق بازرگانی یزد منعکس نمایند.

res.center@yazdccima.com

آدرس: یزد، بلوار ۱۷ شهرپور، روبروی ۵۲ متری امام شهر

کدپستی: ۸۹۱۶۹۵۹۱۱

وبسایت: www.yazdccima.com

تلفن: ۰۳۵۳۷۲۴۵۴۹۱



فهرست

خلاصه مدیریتی

۱. مقدمه

۱-۱. تحلیل و بررسی وضعیت موجود برق در ایران

۱-۲. الزام صرفه جویی مصرف انرژی

۱-۳. اهداف پژوهش

۲. راهکارها و برنامه های جهانی

۱-۲. سیاست های جهانی

۲-۲. سیاست های ملی کشورها

۳. ایران و استان یزد

۱-۳. یارانه سود تسهیلات برای بهینه سازی مصرف انرژی

۲-۳. تصویب و تدوین مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

۳-۳. استانداردهای مدیریت مصرف انرژی در صنایع ایران

۳-۴. قوانین و سیاست های مرتبط با صرفه جویی انرژی در ایران

۳-۵. مقایسه سیاست های ایران با کشورهای پیشرفته در بهینه سازی انرژی

۳-۶. بررسی برنامه های بهینه سازی مصرف انرژی در استان یزد

۴. راهکارهای عملیاتی کوتاه مدت به منظور کاهش مصرف انرژی

۱-۴. سیستم هوای فشرده

۲-۴. الکتروموتورها و الکتروپمپ های صنعتی

۳-۴. مشعل و سیستم بویلر

۴-۴. ضریب توان و بارهای سلفی و خازنی

۵-۴. سیستم روشنایی

۶-۴. جمع بندی و نتیجه گیری

۵. منابع

خلاصه مدیریتی



با توجه به شرایط بحرانی انرژی در ایران، بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع، به ویژه صنایع پرمصرف، به عنوان یکی از مهم ترین راهکارهای مدیریت این بحران باید در اولویت سیاست های کلان کشور قرار گیرد. تاکنون، پایین بودن قیمت انرژی در کشور موجب شده است که بسیاری از صنایع انگیزه ای برای کاهش مصرف نداشته باشند، که این مسئله ایران را در زمره کشورهای با مصرف صنعتی بالا قرار داده است. ذکر این نکته نیز ضروری است که بسیاری از طرح های صنعتی بهره برداری شده مانند صنایع ذوب ریزی فولاد در استان یزد توسط کوره های القایی با ظرفیت های پایین دارای توجیه فنی و اقتصادی با قیمت های جهانی انرژی نیستند.

با در نظر گرفتن شرایط اقتصادی کشور، نوسازی کامل خطوط تولید برای افزایش بهره وری انرژی، گزینه ای پرهزینه و زمان بر و برای بسیاری از صنایع عملی نخواهد بود. از این رو، تمرکز بر راهکارهای سریع، کم هزینه و اثربخش، نظیر بهینه سازی از طریق تعمیر و نگهداری، بهینه سازی فرآیندهای تولید و بهره گیری از مدیریت انرژی، می تواند راهکاری کارآمد برای کاهش مصرف سوخت و برق باشد که در فصل چهارم این گزارش برخی از این راهکارها به تفصیل بررسی شده است. تجربه کشورهای مختلف نشان داده است که معرفی و آموزش این روش ها به صنایع، در کنار سیاست های تشویقی و الزام آور دولت، می توانند نقش مهمی در کاهش اتلاف انرژی در بخش صنعت ایفا کنند.

یکی از مهم ترین اقدامات دولت در این زمینه، سیاست گذاری به گونه ای است که هم صنایع و هم شرکت های تخصصی فعال در حوزه بهینه سازی مصرف انرژی را به سرمایه گذاری در این بخش ترغیب کند. این سیاست می تواند از طریق ارائه مشوق های مالی همچون مشارکت دادن صنایع در سود حاصل از بهره وری انرژی، وام های کم بهره، معافیت های مالیاتی و کمک های بلاعوض، در کنار تسهیل دسترسی به اطلاعات و دانش فنی و برگزاری و شکل گیری تشکل های آموزشی و پژوهشی، و کاهش موانع اداری برای اجرای پروژه های بهینه سازی عملیاتی شود.

تجربیات برخی کشورهای پیشرفته نشان داده است که ترکیب سیاست های الزام آور، مانند استانداردهای سخت گیرانه بهره وری انرژی، با حمایت های مالی، تأثیر بسزایی در افزایش تمایل صنایع به اجرای پروژه های بهینه سازی دارد. اعمال استانداردهای سخت گیرانه به تنهایی ممکن است با مقاومت صنایع مواجه شود، اما همراهی آن با سیاست های تشویقی، موجب پذیرش سریع تر و گسترده تر این استانداردها خواهد شد.

یکی دیگر از اقدامات اثربخش در کشورهای پیشرفته، در کنار الزام رعایت استانداردهای علمی و دقیق و به روز برای مصرف انرژی هر یک از صنعت ها مانند سیستم الزام اعلام و گزارش میزان کربن تولیدی برای هر محصول، ایجاد شبکه های یادگیری بین صنعتی است. این شبکه ها بستری را فراهم می کنند که صنایع مختلف بتوانند تجارب موفق خود را در زمینه بهینه سازی مصرف انرژی به اشتراک گذاشته و از دانش و فناوری های موجود بهره مند شوند. دولت می تواند با حمایت از ایجاد چنین شبکه هایی، روند انتقال دانش و فناوری در صنایع را تسهیل کند و به افزایش بهره وری انرژی در سطح ملی کمک کند.

در نهایت، موفقیت سیاست های بهینه سازی مصرف انرژی در صنایع مستلزم اجرای ترکیبی از الزامات قانونی، تدوین استانداردهای علمی و فنی دقیق و به روز، مشوق های اقتصادی، حمایت های فنی و ایجاد بسترهای دانش محور و شبکه سازی ارتباطات این بسترها باهم و با صنایع و توجیه پذیری اقتصادی فعالیت تمام موارد این زنجیره در این حوزه است به صورتی که عدم توجیه اقتصادی هریک از موارد ذکر شده، کارکرد نهایی این زنجیره را دچار چالش خواهد کرد. در صورت برنامه ریزی و اجرای صحیح این سیاست ها، می توان انتظار داشت که مصرف انرژی در صنایع به میزان قابل توجهی کاهش یابد و کشور از مزایای اقتصادی و زیست محیطی آن بهره مند شود.

بخش اول
مقدمه



۱. مقدمه



در دنیای امروز، بهینه‌سازی مصرف انرژی به عنوان یکی از الزامات اساسی برای توسعه پایدار و مقابله با تغییرات اقلیمی مطرح است. صنایع سنگین از جمله فولاد، پتروشیمی و کاشی، به دلیل مصرف بالای انرژی و تاثیرات محیطی ناشی از فعالیت‌های تولیدی، از منظر اقتصادی و زیست‌محیطی از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند. از سوی دیگر، ناترازی‌های موجود در شبکه‌های برق سراسری ایران، به ویژه در شرایط بحرانی و افزایش تقاضای انرژی، چالش‌های جدی در تامین انرژی پایدار و مطمئن ایجاد نموده است. این موضوع، لزوم بهره‌گیری از راهکارهای نوین مدیریت انرژی و کاهش اتلاف‌های ناشی از ناپایداری شبکه را بیش از پیش مشهود می‌کند.

با توجه به رشد سریع صنعتی در کنار مشکلات زیرساختی برق در سطح کشور، اتخاذ راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع سنگین به عنوان یک ضرورت برای کاهش وابستگی به منابع انرژی سنتی و مقابله با نوسانات سیستم‌های برقی تلقی می‌شود. بررسی تجارب و برنامه‌های موفق جهانی، به ویژه در کشورهایی که با چالش‌های مشابهی مواجه بوده‌اند، می‌تواند الگوی مناسبی برای بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی در استان یزد ارائه دهد. در این راستا، استانداردهای جهانی مانند ISO 50001 و مدل‌های نوین مدیریت انرژی می‌توانند نقشی کلیدی در ارتقای کارایی انرژی و کاهش تلفات ناشی از ناپایداری شبکه‌های برقی ایفا کنند که در فصول مربوطه بررسی خواهد شد.

این طرح پژوهشی با هدف استخراج درس‌های آموخته از تجارب موفق بین‌المللی و تطبیق آن‌ها با شرایط بومی، به بررسی جامع راهکارهای عملیاتی کوتاه‌مدت و بلندمدت جهت بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع هدف می‌پردازد. ضمن آنکه، توجه ویژه‌ای به چالش‌های موجود در سیستم‌های برقی ایران، از جمله قطعی‌ها و نوسانات شبکه، خواهد داشت تا با اتخاذ راهبردهای صحیح بتوان از تداخل این ناپایداری‌ها در عملکرد بهینه صنایع جلوگیری کرد.

در نهایت، تدوین یک برنامه جامع و کاربردی برای بهبود عملکرد انرژی در صنایع استان یزد، مستلزم همکاری نزدیک میان متخصصان، سیاست‌گذاران و بخش خصوصی است. این پژوهش از یک سو چارچوب فکری و راهبردهای عملی لازم را جهت بهبود کارایی انرژی فراهم می‌آورد و از سوی دیگر، تلاش می‌کند تا ناهنجاری‌های شبکه برق سراسری و اثرات منفی آن بر صنایع را کاهش دهد و زمینه‌ای برای توسعه پایدار و کاهش اثرات زیست‌محیطی فراهم سازد.



۱-۱. تحلیل و بررسی وضعیت موجود برق در ایران

طبق گزارش مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی [۱] در شش ماهه اول سال ۱۴۰۳، ناترازی میان تولید و مصرف برق همچنان به عنوان یکی از چالش‌های اساسی صنعت برق کشور باقی مانده است. با وجود پیش‌بینی‌های انجام شده در برنامه هفتم توسعه، کمبود برق در زمان اوج بار به ۱۷,۵۵۷ مگاوات رسیده که نشان دهنده عدم تحقق اهداف افزایش ظرفیت نیروگاهی و مدیریت مصرف است. در حالی که ظرفیت اسمی نیروگاه‌های کشور باید تا پایان برنامه به ۱۲۴,۴۸۵ مگاوات افزایش یابد، تاکنون تنها ۹۳,۷۹۸ مگاوات آن محقق شده است. توسعه نیروگاه‌های تجدیدپذیر نیز به کندی پیش می‌رود و با وجود هدف گذاری ۱۲,۰۰۰ مگاواتی، میزان ظرفیت نصب شده تا نیمه سال جاری تنها ۱,۲۸۰ مگاوات بوده که فاصله چشمگیری با برنامه دارد.

از سوی دیگر، مصرف برق با سرعت بالایی در حال افزایش است، به طوری که در این دوره شش ماهه به ۳۳۳ میلیارد کیلووات ساعت رسیده که نسبت به سال قبل ۶.۱٪ رشد داشته است. بخش صنعت با ۳۴٪ و بخش خانگی با ۳۳.۶٪ بیشترین سهم را در مصرف برق دارند که نشان دهنده نیاز فوری به سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف است. در کنار این چالش‌ها، وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی نیز همچنان ادامه دارد و سهم تولید برق از منابع غیرفسیلی تنها ۸.۲٪ است. همچنین، با وجود هدف گذاری ۲۰ میلیارد کیلووات ساعتی برای تبادلات برون مرزی برق، تاکنون تنها ۸ میلیارد کیلووات ساعت آن محقق شده است. با این روند، دستیابی به اهداف برنامه هفتم در حوزه برق دور از انتظار خواهد بود، مگر آنکه سرمایه گذاری در انرژی‌های تجدیدپذیر افزایش یابد و سیاست‌های مدیریت مصرف با جدیت بیشتری دنبال شود.

۲-۱. الزام صرفه جویی مصرف انرژی

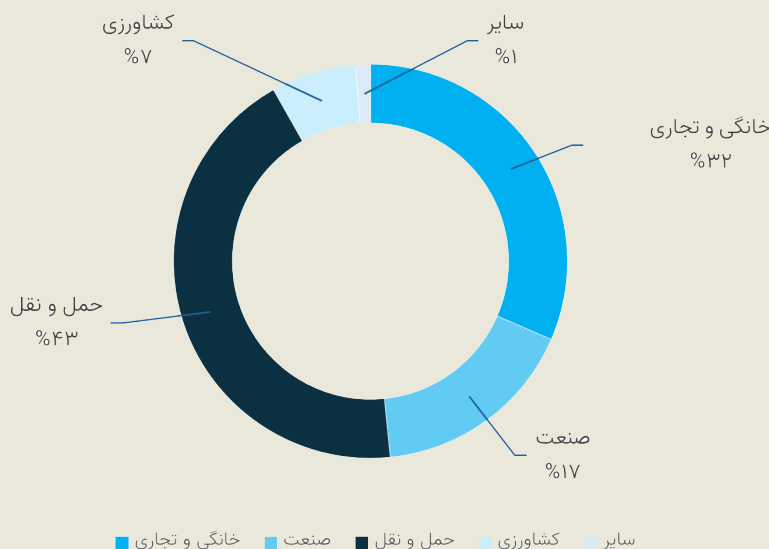
بر اساس مطالعه اسناد موجود [۲]، بر اساس مطالعات انجام شده، صنعت پس از حمل و نقل و مصارف خانگی و تجاری، سومین بخش پر مصرف انرژی در کشور محسوب می‌شود.

طبق آمار موجود، بیشترین مصرف انرژی در بخش صنعت به صنایع فلزی، به ویژه آهن، فولاد و آلومینیوم اختصاص دارد. به طور خاص، در سال ۱۳۸۵ صنعت آهن و فولاد به تنهایی ۱۷.۶ درصد از کل مصرف انرژی در بخش صنعت را به خود اختصاص داده است. همچنین، میانگین مصرف انرژی در این صنعت در سطح جهانی ۱۱ گیگاژول به ازای هر تن تولید است، در حالی که این رقم در ایران به طور متوسط ۱۵ گیگاژول بر تن تولید می‌باشد، که نشان دهنده مصرف ۳۶.۴ درصد بیشتر از استاندارد جهانی است.

علاوه بر این، صنعت کاشی و سرامیک نیز در ایران مصرف انرژی بالاتری نسبت به میانگین جهانی دارد. بر اساس همین گزارش، در سال ۱۳۸۵ میانگین مصرف انرژی در این صنعت ۰.۱۱ گیگاژول به ازای هر تن تولید بوده، در حالی که متوسط جهانی آن ۰.۰۷ گیگاژول بر تن تولید برآورد شده است. این مقدار نشان می‌دهد که مصرف انرژی در صنعت کاشی و سرامیک ایران ۵۷.۱ درصد بیشتر از میانگین جهانی است.

با توجه به آمارهای ارائه شده، صنعت یکی از بزرگ‌ترین مصرف کنندگان انرژی در کشور است و در برخی حوزه‌ها، مصرف آن به طور قابل توجهی از میانگین جهانی فراتر رفته است. صنایعی مانند آهن و فولاد، کاشی و سرامیک نمونه‌هایی از این روند هستند که میزان مصرف انرژی آن‌ها در ایران به ترتیب ۳۶.۴٪ و ۵۷.۱٪ بیشتر از استانداردهای جهانی است. این در حالی است که ناترازی میان تولید و مصرف برق، به ویژه در دوره‌های اوج بار، به یکی از چالش‌های اساسی کشور تبدیل شده و کمبود برق به بیش از ۱۷,۵۵۷ مگاوات رسیده است.

با توجه به روند روبه‌رشد مصرف انرژی، وابستگی بالا به سوخت‌های فسیلی و کندی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر، کشور با خطرات جدی در تأمین پایدار انرژی مواجه است. در چنین شرایطی، بهبودسازی مصرف در صنایع پرمصرف نه تنها به کاهش فشار بر شبکه برق کمک می‌کند، بلکه از نظر اقتصادی نیز به افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های تولید منجر خواهد شد. بنابراین، اجرای سیاست‌های مدیریت مصرف، ارتقای فناوری‌های کم‌مصرف و سرمایه‌گذاری در بهبودسازی فرآیندهای صنعتی از جمله اقداماتی است که می‌تواند به حفظ منابع انرژی، کاهش هزینه‌ها و پایداری صنعت و اقتصاد کشور کمک کند.



شکل شماره ۱: درصد مصرف انرژی در بخش‌های مختلف کشور

۳-۱. اهداف پژوهش

هدف این پژوهش ارائه پنج راهکار عملیاتی کوتاه‌مدت برای بهبودسازی مصرف انرژی در صنایع فولاد، پتروشیمی و کاشی استان یزد است. با توجه به سهم بالای این صنایع در مصرف انرژی و فاصله قابل‌توجه میزان مصرف آن‌ها از استانداردهای جهانی، این تحقیق به دنبال شناسایی و معرفی راهکارهایی است که در بازه زمانی کوتاه، بدون نیاز به سرمایه‌گذاری کلان و با بهره‌گیری از روش‌های بهبودسازی فرآیند، مدیریت بار، بازیافت انرژی و ارتقای بهره‌وری تجهیزات، موجب کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد اقتصادی این واحدهای صنعتی شود.

با این حال، اگرچه تمرکز این پژوهش بر ارائه راهکارهای اجرایی کوتاه‌مدت است، اما در بخش‌هایی به روش‌های زیرساختی و اصلاحات اساسی در حوزه انرژی که کشورهای دیگر نیز آن‌ها را پیاده‌سازی کرده‌اند، به‌طور خلاصه پرداخته خواهد شد. چراکه بدون در نظر گرفتن راهکارهای بنیادی، این اقدامات صرفاً نقش یک مسکن موقت را ایفا کرده و به حل پایدار چالش‌های مصرف انرژی در صنایع منجر نخواهند شد. بنابراین، این پژوهش بر ضرورت سیاست‌گذاری کلان و اجرای سیستم‌های استاندارد و اثبات‌شده در راستای کاهش مصرف انرژی و بهبودسازی عملکرد صنایع تأکید خواهد کرد.

بخش دوم
راهکارها و برنامه های جهانی



۲. راهکارها و برنامه های جهانی



در مقاله ای با عنوان «نگاهی میان رشته ای به بهره وری انرژی صنعتی» که توسط وزارت انرژی سوئد تدوین شده است، به این نکته اشاره شده که در اروپا سیاست های فراوانی به منظور از بین بردن موانع بهره وری انرژی در صنعت شکل گرفته اند. به عنوان نمونه، طرح تجارت انتشار کربن (ETS) و دستورالعمل بهره وری انرژی (ESD) از جمله این ابتکارات به شمار می آیند که کشورها را ملزم می سازد تا برنامه های ملی جامعی برای کاهش مصرف انرژی تدوین کنند. این سیاست ها به دنبال حذف نواقص بازار و ایجاد بازارهای خدمات انرژی هستند. با این حال، یک چالش بزرگ این است که تصمیم گیری های مربوط به بهره وری انرژی در بسترهای اجتماعی و شبکه های صنعتی رخ می دهد، جایی که تجربیات، روال های سازمانی، و هنجارهای حرفه ای تأثیرگذار هستند. بسیاری از موانع انرژی، مانند کمبود اطلاعات، عدم دسترسی به سرمایه، و ترس از اختلال در تولید، ریشه در این شبکه های اجتماعی دارند.

برای حل این موانع، پیشنهاد شده است که ارتباطات بین بخش های مختلف صنعتی افزایش یابد و شبکه هایی برای به اشتراک گذاری تجربیات و راهکارهای موفق ایجاد شوند. به عنوان مثال، برگزاری کنفرانس ها، ایجاد خوشه های صنعتی، و گسترش نظام های مشاوره ای می تواند موجب تغییر در نگرش های سنتی و افزایش پذیرش فناوری های کارآمد انرژی شود. همچنین، سیاست گذاران باید به جای تکیه صرف بر ابزارهای اقتصادی مانند مالیات و یارانه ها، به تقویت تعاملات اجتماعی، آموزش و فرهنگ سازی در این حوزه بپردازند. در نهایت، پژوهشگران پیشنهاد می کنند که سیاست های انرژی نه تنها بر رفع موانع اقتصادی، بلکه بر تغییر فرهنگ سازمانی و پذیرش اجتماعی نیز تمرکز کنند. از این منظر، بهره وری انرژی یک مسئله صرفاً فنی یا اقتصادی نیست، بلکه بخشی از یک نظام اجتماعی و فرهنگی است که برای موفقیت، نیاز به تغییرات در ارزش ها، هنجارها و تعاملات بین ذینفعان مختلف دارد.

برای دستیابی به بهبود پایدار در بهره وری انرژی صنعتی، نیاز است که سیاست ها و برنامه ها نه تنها بر فناوری های پیشرفته تمرکز کنند، بلکه به درک عمیق تری از رفتارها، ارزش ها و شبکه های اجتماعی صنعت نیز بپردازند. یکی از راهکارهای کلیدی، توسعه و اجرای سیاست هایی است که شرکت ها را ترغیب به سرمایه گذاری در بهینه سازی مصرف انرژی کند. این امر می تواند از طریق ارائه مشوق های مالی، تسهیل دسترسی به اطلاعات و ایجاد الزامات قانونی مؤثر انجام شود. در این راستا، تجربیات برخی کشورهای اروپایی نشان می دهد که ترکیب سیاست های سخت گیرانه، مانند استانداردهای بهره وری انرژی، با مشوق های اقتصادی مانند وام های کم بهره و کمک های بلاعوض، می تواند تأثیر بسزایی در افزایش پذیرش فناوری های کارآمد داشته باشد. [۳]

یکی دیگر از راهکارهای مهم اجرا شده در کشورهای پیشرفته، ایجاد شبکه های یادگیری بین صنعتی است. تجربه نشان داده که بسیاری از موانع بهره وری انرژی ریشه در دانش ضمنی و هنجارهای حاکم بر بخش های صنعتی دارند. بنابراین، برگزاری نشست های تخصصی، توسعه خوشه های صنعتی و تسهیل تعاملات بین بخش های مختلف می تواند به تغییر نگرش ها و افزایش آمادگی برای پذیرش تغییرات منجر شود. در این زمینه، اتحادیه اروپا با اجرای برنامه هایی مانند "برنامه اقدام بهره وری انرژی" تلاش کرده تا با کاهش موانع ادراکی و سازمانی، بهره وری انرژی را در صنایع کوچک و متوسط ارتقا دهد. [۴] این برنامه با برگزاری کارگاه های آموزشی و ایجاد شبکه های مشاوره ای، همراه با ارائه تسهیلات مالی، توانسته موانع ادراکی و سازمانی را در صنایع کوچک و متوسط کاهش داده و مدیران و کارکنان را با مزایای بهره وری انرژی آشنا کند. [۵]



از سوی دیگر، در سطح سیاست‌گذاری کلان در کشورهای پیشرفته، تمرکز بر توسعه بازارهای خدمات انرژی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. در برخی کشورها، شرکت‌هایی که خدمات بهره‌وری انرژی ارائه می‌دهند، نقش مهمی در کمک به صنایع برای شناسایی و اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی ایفا کرده‌اند. این مدل می‌تواند در سایر کشورها نیز با حمایت دولت و ایجاد انگیزه‌های مالی گسترش یابد. تجربه نشان داده است که بسیاری از اقدامات مرتبط با کاهش مصرف انرژی به دلیل اولویت‌های دیگر، مانند تولید و افزایش سودآوری، نادیده گرفته می‌شوند. بنابراین، سیاست‌گذاری باید به گونه‌ای باشد که مزایای اقتصادی بهره‌وری انرژی برای شرکت‌ها به وضوح مشخص شود. این امر می‌تواند از طریق تدوین مدل‌های تجاری جدید، مانند قراردادهای عملکرد انرژی (EPC) که شرکت‌های خدمات انرژی را ملزم به تضمین صرفه جویی می‌کند، تحقق یابد. [۶]

۱-۲. سیاست‌های جهانی

۱-۱-۲. استانداردهای مدیریت انرژی

در فوریه ۲۰۰۸، سازمان بین‌المللی استاندارد (ISO) تأسیس یک کمیته پروژه جدید به نام PC242-Energy Management را برای توسعه استاندارد ISO 50001 تصویب کرد که انتظار می‌رفت در سال ۲۰۱۰ منتشر شود. استاندارد مدیریت انرژی ISO 50001 یک چارچوب بین‌المللی برای مدیریت انرژی در کارخانه‌های صنعتی یا کل شرکت‌ها ارائه می‌دهد و شامل تمام جنبه‌های تأمین و مصرف انرژی است. تطابق با این استاندارد نشان می‌دهد که یک کارخانه یا شرکت دارای سیستم‌های مدیریت انرژی پایدار است، یک بررسی پایه از مصرف انرژی انجام داده و متعهد به بهبود مستمر عملکرد انرژی خود است. این استاندارد به گونه‌ای طراحی شده که با استانداردهای موجود در سیستم‌های مدیریتی مانند ISO 9001 (مدیریت کیفیت) و ISO 14001 (مدیریت محیط زیست) که در سراسر جهان به طور گسترده استفاده می‌شوند، سازگار باشد.

این استاندارد شامل بهره‌وری انرژی، عملکرد انرژی، تأمین انرژی، روش‌های تأمین تجهیزات و سیستم‌های مصرف‌کننده انرژی و نحوه استفاده از انرژی است. همچنین، به اندازه‌گیری میزان مصرف فعلی انرژی و پیاده‌سازی یک سیستم اندازه‌گیری برای مستندسازی، گزارش‌دهی و تأیید بهبود مستمر در حوزه مدیریت انرژی اشاره دارد.

انتظار می‌رود ISO 50001 استراتژی‌های فنی و مدیریتی را برای سازمان‌ها و شرکت‌ها فراهم کند تا بهره‌وری انرژی را افزایش دهند، هزینه‌ها را کاهش دهند و عملکرد زیست‌محیطی را بهبود بخشند. با توجه به کاربرد گسترده این استاندارد در بخش‌های مختلف اقتصادی در سطح جهانی، تخمین زده می‌شود که بتواند تا ۶۰٪ از تقاضای انرژی جهان را تحت تأثیر قرار دهد. [۷]

۲-۲. سیاست های ملی کشورها

۲-۲-۱. اتحادیه اروپا

سیاست انرژی اروپا بر سه اصل کلیدی رقابت پذیری، پایداری و امنیت تأمین انرژی استوار است که در گزارش "سیاست انرژی برای اروپا" در ژانویه ۲۰۰۷ مطرح شد [۸]. به منظور اجرای این سیاست، اتحادیه اروپا طرح راهبردی فناوری انرژی (SET-Plan) را راه اندازی کرد تا از طریق توسعه نوآوری های جدید در حوزه انرژی، میزان انتشار گازهای گلخانه ای را کاهش دهد. این طرح اهدافی مانند کاهش ۲۰ درصدی انتشار گازهای گلخانه ای، تأمین ۲۰ درصد از انرژی مورد نیاز از منابع تجدیدپذیر و افزایش ۲۰ درصدی بهره وری انرژی را دنبال می کند. [۹]

در کوتاه مدت، تمرکز اصلی بر اجرای تحقیقات کاربردی و اقداماتی مؤثر برای افزایش بهره وری انرژی، توسعه و ادغام منابع انرژی تجدیدپذیر، و گسترش سوخت های جایگزین است. اما در بلندمدت، اتحادیه اروپا بر توسعه نسل جدید فناوری های کم کربن تأکید دارد تا الگوی مصرف انرژی در آینده را تغییر دهد. این طرح به کاهش مصرف انرژی و جلوگیری از هدررفت آن توجه ویژه ای دارد، چراکه این دو عامل نقش مهمی در رقابت پذیری اقتصادی، امنیت تأمین انرژی و کاهش انتشار CO₂ دارند. در راستای این سیاست، اتحادیه اروپا مجموعه ای از مقررات و استانداردها را برای ارتقای بهره وری انرژی تدوین کرده است. این مقررات شامل تعیین حداقل استانداردهای بهره وری انرژی، قوانین برچسب گذاری محصولات و خدمات، و تعهدات دولت ها برای کاهش مصرف انرژی و استفاده از تجهیزات کم مصرف است. همچنین، صنایع ملزم به رعایت مقررات خودتنظیمی برای بهینه سازی مصرف انرژی شده اند و مقررات سخت گیرانه تری برای عملکرد انرژی در ساختمان ها و صنایع در نظر گرفته شده است [۱۰].

یکی از مهم ترین سیاست های اروپا در این راستا، "دستورالعمل طراحی زیست محیطی (EcoDesign Directive)" است که در ژوئیه ۲۰۰۵ توسط پارلمان اروپا و شورای اتحادیه اروپا تصویب شد. هدف این دستورالعمل، بهبود عملکرد زیست محیطی محصولات در کل چرخه عمرشان است. این کار از طریق اعمال ملاحظات زیست محیطی در مرحله طراحی محصول انجام می شود و تمامی محصولات مصرف کننده انرژی (به جز وسایل نقلیه) را شامل می شود. بر این اساس، تولیدکنندگانی که قصد عرضه محصولات خود در بازار اتحادیه اروپا را دارند، موظف به رعایت استانداردهای انرژی و محیط زیستی تعیین شده هستند [۱۱].

در سال های ۲۰۰۵ تا ۲۰۰۸، اتحادیه اروپا بررسی های گسترده ای برای اولویت بندی محصولات مشمول این مقررات انجام داد. در این بررسی ها که شامل مطالعات مقدماتی، جلسات با ذینفعان و ارزیابی بیش از ۶۰۰ محصول بود، ۳۴ گروه محصولی به عنوان نمونه انتخاب شدند. یکی از نتایج کلیدی این تحقیقات، تعیین ابزارهای ماشینی (Machine Tools) به عنوان یکی از سه اولویت برتر در میان محصولات مشمول این مقررات بود. همچنین، پیشنهاد شد که بهره وری انرژی در سیستم ها و فرآیندهای تولیدی به صورت قانونی تنظیم شود، زیرا این موضوع علاوه بر کاهش مصرف انرژی و آلودگی های صنعتی، تأثیر مستقیمی بر موفقیت محصولات در بازار اروپا خواهد داشت [۱۱].

۲-۲-۲. ژاپن

اصول اساسی سیاست انرژی ژاپن بر سه محور اصلی استوار است: تأمین پایدار انرژی، کاهش انتشار دی اکسید کربن برای مقابله با گرمایش جهانی، و استفاده از اصول بازار با رعایت پایداری انرژی و الزامات زیست محیطی. این سیاست ها در قانون اساسی سیاست انرژی که در ژوئن ۲۰۰۲ تصویب شد، تعریف شده اند. هدف اصلی این قانون، تضمین امنیت انرژی کشور در کنار حفظ محیط زیست و افزایش بهره وری انرژی است.



با توجه به تغییرات سریع در بازارهای جهانی انرژی، دولت ژاپن تصمیم گرفت رویکردی راهبردی‌تر در این زمینه اتخاذ کند و در همین راستا، در می ۲۰۰۶ راهبرد ملی جدید انرژی را معرفی کرد. این راهبرد بر بهبود بهره‌وری انرژی، کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، توسعه انرژی‌های نو، افزایش استفاده از انرژی هسته‌ای و بهره‌گیری پایدار از سوخت‌های فسیلی تمرکز دارد. هدف ژاپن این است که تا سال ۲۰۳۰، بهره‌وری انرژی خود را تا ۳۰ درصد افزایش دهد و وابستگی بخش حمل‌ونقل به نفت را به حدود ۸۰ درصد کاهش دهد. همچنین در تلاش است سهم انرژی‌های تجدیدپذیر و سایر منابع جایگزین را افزایش داده و وابستگی به نفت را در تأمین انرژی اولیه کشور به کمتر از ۴۰ درصد برساند.

سیاست انرژی ژاپن بر کاهش مصرف انرژی به عنوان یک اصل اساسی تأکید دارد و این کشور یکی از پیشگامان جهانی در اجرای اقدامات صرفه‌جویی انرژی محسوب می‌شود. پس از اولین بحران نفتی، ژاپن قانون صرفه‌جویی انرژی را تصویب کرد که همچنان به عنوان یکی از ارکان اصلی سیاست‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در این کشور شناخته می‌شود. این قانون نقش مهمی در مدیریت داوطلبانه انرژی و بهبود کارایی تجهیزات مصرف‌کننده انرژی، به‌ویژه در بخش خصوصی، داشته است.

برنامه‌های صرفه‌جویی انرژی در ژاپن در سه بخش اصلی اجرا می‌شوند: صنعت، ساختمان‌های تجاری و مسکونی، و حمل‌ونقل. اگرچه صنعت تولیدی به عنوان یک بخش مستقل در نظر گرفته نمی‌شود، اما تحت پوشش این قانون قرار دارد. بر اساس مقررات تعیین‌شده، کارخانه‌ها و واحدهای صنعتی که سالانه بیش از ۱۵۰۰ کیلو لیتر معادل نفت خام انرژی مصرف می‌کنند، موظف‌اند گزارش‌های دوره‌ای درباره میزان مصرف انرژی خود ارائه دهند، برنامه‌های میان‌مدت و بلندمدت برای کاهش مصرف تدوین کنند و مدیران انرژی منصوب نمایند.

علاوه بر الزامات قانونی، دولت ژاپن صنایع خصوصی را به سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین بهینه‌سازی مصرف انرژی تشویق می‌کند. این اقدام نه تنها به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و مقابله با تغییرات اقلیمی کمک می‌کند، بلکه در برابر نوسانات قیمت نفت نیز یک راهکار مؤثر به شمار می‌رود. همچنین، استانداردهای صرفه‌جویی انرژی برای لوازم خانگی و وسایل نقلیه در قالب سیستم "Top Runner" تعریف شده است. این استانداردها بر اساس بهترین فناوری موجود در بازار تعیین شده و شامل ۲۱ گروه محصولی از جمله خودروهای سواری و باری، تهویه مطبوع، تلویزیون، یخچال، رایانه و بخاری‌های برقی می‌شود.

برای دستیابی به هدف بهره‌وری انرژی تا سال ۲۰۳۰ که در چارچوب راهبرد ملی انرژی جدید ژاپن تعیین شده، بهبود کارایی انرژی در بخش تولید امری حیاتی تلقی می‌شود. در این راستا، دولت ژاپن برنامه‌های متعددی را برای توسعه فناوری‌های نوین در صنایع مختلف ارائه کرده است. به عنوان نمونه، توسعه سیستم‌های احتراقی پیشرفته مانند فناوری تولید شیشه با استفاده از پلاسمای انرژی بالا و فناوری‌های جدید برای کاهش مصرف انرژی در ترانسفورماتورها و موتورهای الکتریکی مبتنی بر نیمه‌هادی‌های SiC از اولویت‌های کلیدی محسوب می‌شوند. این فناوری‌ها در قالب "برنامه پیشگامان صرفه‌جویی انرژی" دنبال می‌شوند که بر همکاری میان صنایع مختلف و حوزه‌های پژوهشی تأکید دارد.

علاوه بر این، نقشه راه فناوری راهبردی که هر سال توسط دولت ژاپن تدوین و به‌روزرسانی می‌شود، بر توسعه فرایندهای تولیدی جدید با رویکردی پایدار و اقتصادی تمرکز دارد. این طرح‌های نوآورانه به عنوان گامی مهم در مسیر کاهش مصرف انرژی و توسعه پایدار ژاپن شناخته می‌شوند. [۱۲]

۳-۲-۲. ایالات متحده آمریکا



سیاست ملی انرژی ایالات متحده (NEP) که در سال ۲۰۰۱ منتشر شد [۱۳]، به عنوان گزارش نهایی گروه توسعه سیاست ملی انرژی (NEPDG) شناخته می‌شود. این گزارش پنج هدف اصلی برای دولت وقت تعیین کرده است: مدرن سازی مصرف انرژی، نوسازی زیرساخت‌های انرژی، افزایش منابع انرژی، تقویت حفاظت از محیط زیست و ارتقای امنیت انرژی ملی. در این سیاست تأکید شده است که بهترین راه برای مدرن سازی مصرف انرژی، افزایش بهره‌وری انرژی از طریق فناوری‌های نوین، بهبود بهره‌وری، کاهش هدررفت و کاهش هزینه‌ها است.

وزارت انرژی ایالات متحده (DOE) و آژانس حفاظت محیط زیست (EPA) نسخه‌ای به‌روز از برنامه اقدام ملی برای بهره‌وری انرژی تحت عنوان "چشم‌انداز ۲۰۲۵: چارچوبی برای تغییر" منتشر کرده‌اند [۱۴]. این برنامه چارچوبی برای سیاست‌گذاران ایالتی فراهم می‌کند و آنها را به سرمایه‌گذاری در برنامه‌های کم‌هزینه افزایش بهره‌وری انرژی ترغیب می‌کند. همچنین، این برنامه پیشرفت‌های ایالت‌ها در دستیابی به اهداف بهره‌وری انرژی را بررسی کرده و حوزه‌هایی را که نیاز به پیشرفت بیشتری دارند، شناسایی می‌کند.

برنامه فناوری‌های صنعتی (ITP) که توسط وزارت انرژی ایالات متحده (DOE) اجرا می‌شود [۱۵]، برنامه‌ای برای افزایش بهره‌وری انرژی در بخش صنعت است. این برنامه با حمایت فدرال از تحقیق و توسعه در حوزه فناوری‌های کاهش مصرف انرژی، به دنبال کاهش مصرف انرژی در بخش صنعتی آمریکا است. هدف ITP این است که در تحقیقات و توسعه پرریسک و ارزشمند سرمایه‌گذاری کند که پتانسیل کاهش مصرف انرژی در صنایع را داشته باشد، اما به دلیل موانع بازار، سرمایه‌گذاری کافی از بخش خصوصی دریافت نمی‌کند. کاهش نیاز به انرژی در صنعت، می‌تواند منجر به کاهش هزینه‌های انرژی، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و بهبود بهره‌وری در تولید شود.

شورای تولید انرژی-بازده ایالات متحده (U.S. CEEM) اخیراً برای توسعه و اجرای ابتکار عملکرد عالی انرژی (SEP) تأسیس شده است. این برنامه نقشه راهی برای بهبود مداوم بهره‌وری انرژی در واحدهای صنعتی ارائه می‌دهد و در عین حال، به حفظ رقابت‌پذیری اقتصادی این واحدها کمک می‌کند. هدف SEP، کاهش ۲۵ درصدی مصرف انرژی صنعتی طی دهه آینده است. عناصر اصلی این برنامه شامل استانداردهای مدیریت انرژی، استانداردهای ارزیابی سیستم و پروتکل‌های سنجش و تأیید عملکرد انرژی است [۱۶].

بخش سوم
ایران و استان یزد





۳. ایران و استان یزد

برنامه‌های ملی برای کاهش مصرف انرژی در صنایع شامل مجموعه‌ای از سیاست‌ها، طرح‌ها و اقدامات است که با هدف بهینه‌سازی مصرف انرژی، کاهش ناترازی انرژی و افزایش بهره‌وری در بخش صنعت طراحی و تا اکنون اجرا شده‌اند.

۱-۳. یارانه سود تسهیلات برای بهینه‌سازی مصرف انرژی

طرح یارانه سود تسهیلات برای بهینه‌سازی مصرف انرژی یکی از برنامه‌های کلیدی وزارت نیرو در چارچوب برنامه سوم توسعه ایران (۱۳۷۹-۱۳۸۴) بود که با هدف کاهش شدت انرژی در صنایع طراحی شد. در این طرح، صنایع مختلف از جمله سیمان، قند، کاشی و سرامیک، و خودروسازی می‌توانستند برای اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی وام دریافت کنند. این وام‌ها از طریق بانک‌های عامل ارائه می‌شد و وزارت نیرو سود آن‌ها را به صورت یارانه پرداخت می‌کرد تا هزینه مالی برای صنایع کاهش یابد. این اقدام نه تنها انگیزه‌ای برای نوسازی تجهیزات و استفاده از فناوری‌های کم‌مصرف ایجاد می‌کرد، بلکه به کاهش فشار بر منابع انرژی کشور نیز کمک می‌کرد.

فرآیند اجرای این طرح شامل چند مرحله بود. ابتدا، صنایع طرح‌های پیشنهادی خود را به وزارت نیرو یا سازمان‌های مرتبط مانند سازمان بهره‌وری انرژی ایران (سابا) ارائه می‌دادند. این طرح‌ها از نظر فنی و اقتصادی بررسی می‌شد تا میزان صرفه‌جویی انرژی و سودآوری آن‌ها مشخص شود. پس از تأیید، وام با سود یارانه‌ای تخصیص می‌یافت و وزارت نیرو بخشی یا کل سود وام را تقبل می‌کرد. به عنوان مثال، اگر یک کارخانه برای نصب سیستم بازیافت حرارت وامی با سود ۱۸٪ دریافت می‌کرد، وزارت نیرو این سود را پرداخت می‌کرد و صنعت تنها اصل وام را بازپرداخت می‌نمود.

نتایج این طرح تا سال ۱۳۸۴ قابل توجه بود. از مجموع ۳۲۰ طرح پیشنهادی دریافت‌شده، ۶۳ طرح تأیید شدند و ۲۰ طرح به طور کامل اجرا شدند. این ۲۰ طرح که در صناعی مانند سیمان و الکتروموتورسازی پیاده‌سازی شدند، صرفه‌جویی سالانه‌ای معادل ۳۰۹,۷۱۲ بشکه نفت خام به همراه داشتند. این میزان صرفه‌جویی نشان‌دهنده تأثیر مثبت طرح بر کاهش مصرف انرژی بود، اما اجرای محدود آن (تنها ۲۰ طرح از ۳۲۰ پیشنهاد) نشان‌دهنده چالش‌هایی در مسیر بود.

با وجود دستاوردها، این طرح با موانعی نیز مواجه شد. محدودیت بودجه وزارت نیرو باعث شد که تعداد طرح‌های تأییدشده کم باشد و بسیاری از پیشنهادها به مرحله اجرا نرسند. همچنین، فرآیند پیچیده بروکراتیک بررسی طرح‌ها و عدم اطلاع‌رسانی کافی به صنایع کوچک‌تر، از جمله دلایلی بود که دامنه تأثیرگذاری طرح را محدود کرد [۱۷].

۲-۳. تصویب و تدوین مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان

اجرای مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ایران که با عنوان "صرفه‌جویی در مصرف انرژی" شناخته می‌شود، از سال ۱۳۷۰ به عنوان یکی از مهم‌ترین ابتکارات برای کاهش مصرف انرژی در بخش ساختمانی آغاز شد. این مبحث با توجه به سهم قابل توجه ساختمان‌ها در مصرف انرژی کشور، که حدود ۴۰٪ از کل انرژی مصرفی را شامل می‌شود، طراحی شده است. هدف اصلی آن، کاهش اتلاف انرژی از طریق بهبود عایق کاری حرارتی پوسته خارجی ساختمان مانند دیوارها، سقف، کف و پنجره‌ها، بهینه‌سازی سیستم‌های تأسیساتی شامل گرمایش، سرمایش، تهویه و آب گرم، و همچنین تنظیم مصرف روشنایی الکتریکی است. طبق آخرین ویرایش این مبحث در سال ۱۳۹۹، اجرای صحیح این ضوابط می‌تواند مصرف انرژی را به طور چشمگیری کاهش دهد و به افزایش آسایش ساکنان و کاهش هزینه‌های بلندمدت کمک کند [۱۸].



فرآیند اجرای مبحث ۱۹ از مرحله طراحی شروع می‌شود و تا اجرا و نظارت ادامه می‌یابد. در مرحله طراحی، مهندسان مشاور موظفاند نقشه‌ها و محاسبات را بر اساس استانداردهای این مبحث تهیه کنند، از جمله انتخاب مصالح با ضریب انتقال حرارت پایین و طراحی پنجره‌های دوجداره با کارایی بالا. پس از آن، مجریان ساختمانی باید این نقشه‌ها را به‌طور دقیق پیاده‌سازی کنند و از مصالح و تجهیزات استاندارد استفاده نمایند، مثلاً عایق‌های حرارتی با ضخامت مشخص یا سیستم‌های تأسیساتی کم‌مصرف. در نهایت، مهندسان ناظر بر تطابق اجرا با ضوابط نظارت دارند و از سال ۱۴۰۲، صدور پایان کار برای ساختمان‌های جدید به رعایت این مبحث وابسته شده است. این ساختار منظم، در صورت اجرا، می‌تواند به کاهش هدررفت انرژی و بهبود کیفیت ساخت‌وساز منجر شود [۱۹].

با وجود مزایای آشکار، اجرای مبحث ۱۹ با موانع متعددی روبه‌رو است. بسیاری از سازندگان و پیمانکاران به دلیل کمبود آگاهی یا آموزش ناکافی، از الزامات این مبحث بی‌اطلاع هستند و به روش‌های سنتی ساخت ادامه می‌دهند. علاوه بر این، نظارت ضعیف توسط نهادهای مسئول مانند شهرداری‌ها و سازمان نظام مهندسی در برخی مناطق، باعث می‌شود که ساختمان‌هایی بدون رعایت حداقل استانداردها ساخته شوند. هزینه اولیه بالاتر برای استفاده از مصالح و تجهیزات استاندارد نیز یکی دیگر از دلایلی است که برخی سازندگان را از اجرای کامل این مبحث باز می‌دارد. این چالش‌ها نشان می‌دهد که علی‌رغم وجود یک چارچوب قانونی، تحقق اهداف آن به تلاش بیشتری نیاز دارد.

برای غلبه بر این موانع و تقویت اجرای مبحث ۱۹، راهکارهایی در نظر گرفته شده است. برگزاری دوره‌های آموزشی برای مهندسان و پیمانکاران می‌تواند سطح آگاهی و توان فنی آن‌ها را افزایش دهد. همچنین، تقویت نظارت با افزایش بازرسی‌ها و اعمال جرایم برای متخلفان، اجرای دقیق‌تر ضوابط را تضمین می‌کند. از سوی دیگر، ارائه مشوق‌های مالی مانند کاهش عوارض ساخت یا تسهیلات کم‌بهره برای سازندگان ساختمان‌های کم‌مصرف، می‌تواند انگیزه بیشتری ایجاد کند. یکی از اقدامات مثبت در این راستا، الزامی شدن نصب پلاک گواهی رده انرژی از سال ۱۴۰۱ است که به خریداران کمک می‌کند تا ساختمان‌های کم‌مصرف را شناسایی کنند و آگاهی عمومی را افزایش می‌دهد [۲۰].

۳-۳. استانداردهای مدیریت مصرف انرژی در صنایع ایران

۳-۱-۳. تدوین استاندارد INSO-ISO 50001

استاندارد INSO-ISO 50001 که در ایران توسط سازمان ملی استاندارد ایران (ISIRI) تدوین شده، یکی از مهم‌ترین ابزارهای ملی برای مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی در سازمان‌ها و صنایع به شمار می‌رود. این استاندارد، که بر پایه استاندارد بین‌المللی ISO 50001 طراحی شده، چارچوبی نظام‌مند و جامع ارائه می‌دهد تا سازمان‌ها بتوانند مصرف انرژی خود را ارزیابی کنند، فرصت‌های کاهش مصرف را شناسایی کنند و با اجرای اقدامات هدفمند، بهره‌وری انرژی خود را بهبود بخشند. این استاندارد نه تنها یک الزام قانونی نیست، بلکه یک راهنمای ارزشمند برای سازمان‌هایی است که می‌خواهند هزینه‌های انرژی خود را کاهش دهند، ردپای کربن خود را کم کنند و در عین حال به اهداف توسعه پایدار نزدیک‌تر شوند. این استاندارد از زمان انتشارش در سال ۲۰۱۱ توسط ISO و بومی‌سازی آن در ایران در قالب استاندارد ملی، به عنوان یک پل ارتباطی بین سیاست‌های کلان انرژی و عملیات روزمره سازمان‌ها عمل کرده است.

استاندارد ۵۰۰۰۱ با تمرکز بر سیستم‌های مدیریت انرژی، سازمان‌ها را به سمت یک رویکرد چرخه‌ای هدایت می‌کند که شامل چهار مرحله اصلی برنامه‌ریزی، اجرا، بررسی و بهبود مستمر است. در مرحله برنامه‌ریزی، سازمان‌ها خط‌مشی انرژی خود را تدوین کرده، شاخص‌های کلیدی عملکرد انرژی را تعیین می‌کنند و اهداف مشخصی برای کاهش مصرف انرژی در نظر می‌گیرند؛ برای مثال، یک کارخانه صنعتی ممکن است هدف کاهش ۱۰ درصدی مصرف برق را تعیین کند و برای این منظور، داده‌های مصرف انرژی را جمع‌آوری و تحلیل کند. در مرحله اجرا، این برنامه‌ها عملیاتی شده و اقداماتی مانند نصب تجهیزات کارآمدتر یا اصلاح فرآیندهای تولید انجام می‌شود. سپس، در مرحله بررسی، عملکرد سیستم از طریق ممیزی‌های داخلی ارزیابی می‌شود و در نهایت، بهبود مستمر با اجرای اقدامات اصلاحی تضمین می‌گردد. این رویکرد، که بر پایه اصول مدیریت کیفیت بنا شده، به سازمان‌ها کمک می‌کند تا فرآیند بهینه‌سازی انرژی را به یک روند دائمی تبدیل کنند، نه اقدامی مقطعی [۲۱].

۳-۴. قوانین و سیاست‌های مرتبط با صرفه‌جویی انرژی در ایران

۳-۴-۱. صدور گواهی صرفه‌جویی انرژی

صدور گواهی صرفه‌جویی انرژی در ایران در چارچوب قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی (مصوب ۱۳۸۹) و آیین‌نامه‌های اجرایی مرتبط تعریف شده است. این گواهی‌ها به عنوان ابزاری برای تشویق صنایع، ساختمان‌ها و پروژه‌ها به کاهش مصرف انرژی و استفاده از فناوری‌های کارآمد طراحی شده‌اند.

بر اساس مصوبه مجلس، دولت موظف به صدور گواهی صرفه‌جویی انرژی با اولویت پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی و مشارکت مردمی شده است. این گواهی‌ها اسنادی قابل انتقال و معامله در بورس انرژی هستند که نشان‌دهنده حق مالکیت دارنده بر میزان معینی از صرفه‌جویی انرژی می‌باشند.

گواهی صرفه‌جویی انرژی به عنوان یک ابزار مالی نوین، امکان بهینه‌سازی مصرف انرژی را از طریق ایجاد انگیزه‌های اقتصادی برای صنایع و بنگاه‌های تولیدی فراهم می‌کند. این گواهی‌ها نمایانگر حق مالکیت بر مقدار معینی از انرژی صرفه‌جویی شده هستند و می‌توانند در بازار بورس انرژی معامله شوند.

فرآیند صدور گواهی صرفه‌جویی انرژی شامل مراحل است که ابتدا شرکت‌ها و بنگاه‌های تولیدی با اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی، مصرف انرژی خود را کاهش می‌دهند. پس از اجرای پروژه، میزان صرفه‌جویی انرژی توسط شرکت‌های

معتبر اندازه گیری و تأیید می شود. با تأیید میزان صرفه جویی، گواهی های مربوطه صادر و به شرکت مجری پروژه تحویل داده می شود. این گواهی ها به عنوان اوراق بهادار قابل معامله در بورس انرژی عرضه می شوند و شرکت ها می توانند از فروش آن ها درآمد کسب کنند.

اجرای سازوکار گواهی صرفه جویی انرژی می تواند به بهبود بهره وری انرژی و کاهش هزینه ها در صنایع مختلف منجر شود. با رفع چالش های موجود و ایجاد زیرساخت های مناسب، این ابزار مالی نوین می تواند نقش مهمی در توسعه پایدار ایفا کند.

۳-۴-۲. الزام صنایع به تأمین بخشی از برق مصرفی از منابع تجدیدپذیر

در راستای توسعه پایدار و کاهش وابستگی به منابع فسیلی، قانون جهش تولید دانش بنیان مصوب سال ۱۴۰۱، صنایع بزرگ را ملزم کرده است تا بخشی از برق مصرفی خود را از منابع تجدیدپذیر تأمین کنند. بر اساس ماده ۱۶ این قانون، صنایع با مصرف برق بیش از یک مگاوات موظف اند از سال ۱۴۰۲، حداقل یک درصد از نیاز برق سالانه خود را از طریق احداث نیروگاه های تجدیدپذیر تأمین نمایند و این میزان را تا پایان سال پنجم به پنج درصد افزایش دهند. [۲۲]

این الزام قانونی، صنایع را تشویق می کند تا با سرمایه گذاری در انرژی های پاک، به کاهش آلودگی محیط زیست و ارتقای بهره وری انرژی کمک کنند. در صورت عدم رعایت این مقررات، وزارت نیرو مجاز است درصد مذکور از برق مصرفی این صنایع را با تعرفه برق تجدیدپذیر محاسبه و هزینه های مربوطه را از صنایع دریافت نماید.

علاوه بر صنایع بزرگ، دستگاه های اجرایی نیز موظف به تأمین بخشی از برق مصرفی خود از منابع تجدیدپذیر شده اند. بر اساس مصوبه شورای عالی انرژی، از ابتدای سال ۱۴۰۳، دستگاه های اجرایی باید پنج درصد از برق مصرفی خود را از طریق انرژی های تجدیدپذیر و پاک تأمین کنند و این میزان را طی چهار سال آینده سالانه پنج درصد افزایش داده تا به ۲۰ درصد برسد. [۲۲]

اجرای این الزامات قانونی، گامی مؤثر در جهت توسعه انرژی های تجدیدپذیر، کاهش مصرف سوخت های فسیلی و حفاظت از محیط زیست محسوب می شود. همچنین، این سیاست ها می توانند به ایجاد فرصت های شغلی جدید در حوزه فناوری های پاک و افزایش رقابت پذیری صنایع کشور در بازارهای بین المللی منجر شوند.

۳-۴-۳. اعتبارات بهینه سازی انرژی از سمت دولت

قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت که نخستین بار در سال ۱۳۸۰ تصویب و در سال های بعد اصلاح شد، نقش مهمی در مدیریت منابع مالی و بودجه ای کشور دارد. یکی از محورهای کلیدی این قانون، بهینه سازی مصرف انرژی در دستگاه های دولتی و پروژه های عمرانی است. در تبصره ۳ قانون بودجه سال ۱۴۰۴ کل کشور، به تخصیص یک درصد از منابع حاصل از صادرات نفت خام، میعانات گازی و خالص صادرات گاز طبیعی به حساب بهینه سازی مصرف انرژی اشاره شده است.

در جدول شماره ۱۴ که به منابع و مصارف هدفمندی یارانه ها مربوط می شود، سهم حساب بهینه سازی مصرف انرژی ذکر شده است. با این حال، منابع هدفمندی یارانه ها با کسری قابل توجهی مواجه است. همچنین، جداول مربوط به شفافیت درآمدهای نفتی، هزینه های شرکت ملی نفت، منابع حساب بهینه سازی مصرف انرژی و حساب سرمایه گذاری نفت و گاز ارائه نشده اند. این کمبود اطلاعات، علیرغم الزام قانونی در بخش اول بودجه، نشان دهنده عدم رعایت شفافیت مورد نیاز است.

۳-۴-۴. سایر قوانین مصوب مجلس



عنوان	سال تصویب	جزئیات
قانون هدفمندسازی یارانه‌ها	۱۳۸۸	آزادسازی قیمت حامل‌های انرژی (بنزین، گازوئیل، گاز طبیعی، برق) به‌منظور کاهش مصرف بی‌رویه.
		تخصیص بخشی از درآمدهای حاصل از هدفمندسازی یارانه‌ها به پروژه‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی.
قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی	۱۳۸۹	الزام صنایع به استفاده از فناوریهای کم‌مصرف و به‌روزرسانی تجهیزات.
		تدوین استانداردهای اجباری برای مصرف انرژی در دستگاه‌های تولیدی و ساختمان‌ها.
		تشویق به استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی (مانند ISO 50001).
		قانون الزامات ساختمان‌های جدید به رعایت مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان
قانون الزامات ساختمانهای جدید به رعایت مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان	۱۳۹۰	رعایت استانداردهای عایقکاری حرارتی و برقی در ساختمان‌های جدید.
		رعایت استانداردهای عایقکاری حرارتی و برقی در ساختمان‌های جدید.
قانون حمایت از تولید و عرضه انرژی‌های تجدیدپذیر	۱۳۹۴	رعایت استانداردهای عایقکاری حرارتی و برقی در ساختمان‌های جدید.
		کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش مصرف انرژی در بلند مدت
قانون افزایش بهره‌وری در بخش انرژی	۱۳۹۵	کاهش تلفات انرژی در شبکه‌های برق و گاز
		توسعه پروژه‌های بازسازی و نوسازی نیروگاه‌ها و خطوط انتقال
		الزام وزارت نفت و انرژی به ارائه گزارش سالانه درباره پیشرفت‌های بهره‌وری انرژی
قانون مدیریت پسماند و بهره‌وری انرژی	۱۳۹۶	بازیافت انرژی از پسماندها و کاهش مصرف منابع اولیه.
قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت	۱۴۰۰	تخصیص بودجه برای پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی در صنایع و بخش عمومی.



۳-۵. مقایسه سیاست‌های ایران با کشورهای پیشرفته در بهینه‌سازی انرژی

در مقایسه با کشورهای توسعه‌یافته‌ای مانند اتحادیه اروپا، ژاپن و ایالات متحده، ایران نیز سیاست‌های متعددی در زمینه بهره‌وری انرژی اتخاذ کرده است، اما چالش‌هایی در اجرای کامل آنها وجود دارد.

۳-۵-۱. چارچوب قانونی و مقررات

اتحادیه اروپا، ژاپن و ایالات متحده حتی در بخش سیاست‌گذاری از چارچوب‌های قانونی پیشرفته، استانداردهای سخت‌گیرانه و نظام‌های نظارتی دقیق و فنی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی بهره می‌برند مانند الزامات گزارش‌دهی دوره‌ای صنایع در ژاپن به دولت. این کشورها با سیاست‌های تشویقی، اعمال مالیات بر مصرف بی‌رویه، و توسعه فناوری‌های کارآمد، توانسته‌اند بهره‌وری انرژی را به سطح بالایی برسانند. در مقابل، ایران علی‌رغم برخورداری از قوانین متعددی همچون قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی، به دلیل چالش‌هایی نظیر یارانه‌های گسترده انرژی، ضعف در پایش و نظارت، و محدودیت‌های اقتصادی، در اجرای مؤثر این قوانین با موانع جدی مواجه است. این عوامل نه تنها مانع از تحقق اهداف بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌شود، بلکه زمینه‌ساز افزایش اتلاف منابع و فشار مضاعف بر زیرساخت‌های انرژی کشور نیز شده است.

۳-۵-۲. سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین

کشورهای پیشرفته، به ویژه در اتحادیه اروپا، ایالات متحده و ژاپن، سالانه سرمایه‌گذاری‌های هنگفتی در تحقیق و توسعه در زمینه فناوری‌های کم‌مصرف، انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف در صنایع مختلف انجام می‌دهند. به عنوان مثال، در اروپا، اتحادیه اروپا به طور ویژه بر تحقیق و توسعه در حوزه انرژی‌های پاک مانند انرژی خورشیدی، بادی و هیدروژن تمرکز دارد. کشورهای همچون آلمان با سرمایه‌گذاری در پروژه‌های انرژی خورشیدی و باد، از جمله طرح‌های Energiewende، به موفقیت‌های بزرگی در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر در سبد انرژی خود دست یافته‌اند [۲۳]. همچنین، ایالات متحده با حمایت از برنامه‌های تحقیقاتی چون ARPA-E (آژانس پیشرفته تحقیقات انرژی) توانسته است تکنولوژی‌های نوین انرژی مانند ذخیره‌سازی انرژی و تولید برق از منابع تجدیدپذیر را به سرعت توسعه دهد. [۲۴]

در کنار این موارد، کشورهای پیشرفته در تلاش هستند تا بهینه‌سازی مصرف انرژی را در صنایع مختلف پیاده‌سازی کنند. به عنوان نمونه، ژاپن در دهه‌های اخیر با استفاده از سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی در صنایع تولیدی خود، توانسته است بهره‌وری انرژی را به طرز چشم‌گیری افزایش دهد. شرکت‌های بزرگ ژاپنی مانند تویوتا و سونی با استفاده از فناوری‌های جدید، مصرف انرژی خود را بهینه کرده‌اند و به الگویی برای سایر کشورها تبدیل شده‌اند. این سرمایه‌گذاری‌های کلان در تحقیق و توسعه، نه تنها به کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند، بلکه در راستای توسعه فناوری‌های نوآورانه، رشد اقتصادی و ایجاد اشتغال نیز نقش بسزایی ایفا می‌کند. اما در ایران، علی‌رغم تلاش‌هایی که برای توسعه فناوری‌های بهینه‌سازی انجام شده، محدودیت‌های مالی و عدم توجه پذیری سرمایه‌گذاری اقتصادی در مبحث انرژی مانع از دسترسی به فناوری‌های پیشرفته و سرمایه‌گذاری‌های کلان در این حوزه شده است. به عنوان مثال، پروژه‌های انرژی‌های تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های خورشیدی و بادی که می‌توانستند به کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و ارتقای بهره‌وری انرژی کمک کنند، عملاً به دلیل عدم تخصیص منابع خصوصی و دولتی کافی برای سرمایه‌گذاری و هم به علت عدم صرفه اقتصادی برای توسعه و استفاده مورد استفاده قرار نگرفته‌اند.



علاوه بر این، به همان دلایل محدودیت‌های مالی و عدم توجیه پذیری اقتصادی پروژه‌های انرژی در کشور باعث شده است که بسیاری از پروژه‌های تحقیق و توسعه در این زمینه متوقف یا به تأخیر بیافتد.

۳-۵-۳. نقش دولت در حمایت از بهره‌وری انرژی

در بسیاری از کشورهای پیشرفته، دولت‌ها به منظور تشویق صنایع و کسب‌وکارها به بهره‌گیری از فناوری‌های بهینه‌سازی انرژی، سیاست‌های حمایتی مختلفی از جمله ارائه وام‌های کم‌بهره، یارانه‌ها و مشوق‌های مالیاتی در نظر می‌گیرند. این حمایت‌ها کمک می‌کند تا شرکت‌ها بتوانند بدون نگرانی از هزینه‌های اولیه بالا، در فناوری‌های جدید سرمایه‌گذاری کنند و بهره‌وری انرژی خود را افزایش دهند. به عنوان مثال، در اتحادیه اروپا، برنامه‌هایی مانند Horizon Europe و Green Deal منابع مالی قابل توجهی را برای توسعه پروژه‌های مرتبط با کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری در بخش‌های صنعتی و تجاری اختصاص داده‌اند [۲۵]. در ایالات متحده نیز، دولت از طریق آژانس‌هایی مانند DOE و برنامه‌هایی همچون EECBG، وام‌های کم‌بهره و کمک‌های مالی به کسب‌وکارهایی که قصد بهینه‌سازی مصرف انرژی را دارند، ارائه می‌کند. [۲۶]

علاوه بر این، بسیاری از کشورها با ارائه یارانه‌های مستقیم، هزینه‌های اولیه نصب و اجرای فناوری‌های نوین را برای صنایع و کسب‌وکارهای کوچک و بزرگ کاهش می‌دهند. به عنوان مثال، در آلمان، دولت برای نصب سیستم‌های انرژی خورشیدی در کارخانه‌ها و ساختمان‌های تجاری، یارانه‌هایی در نظر گرفته است که به شرکت‌ها کمک می‌کند با هزینه‌ای کمتر، از انرژی پاک و کارآمد بهره‌مند شوند. همچنین، در ژاپن برنامه‌هایی مانند Top Runner Program شرکت‌ها را موظف می‌کند که استانداردهای سخت‌گیرانه‌ای را در مصرف انرژی رعایت کنند و در مقابل، تسهیلات مالی و اعتباری ویژه‌ای را در اختیارشان قرار می‌دهد. [۲۷]

اما در ایران، با وجود اینکه سیاست‌های حمایتی مختلفی در زمینه بهینه‌سازی مصرف انرژی تدوین شده است، اجرای آن‌ها با چالش‌های متعددی مواجه است. به عنوان مثال، قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی که هدف آن بهینه‌سازی مصرف انرژی در بخش‌های مختلف است، در عمل به دلیل محدودیت‌های بودجه‌ای و چالش‌های اقتصادی، آن‌گونه که باید اجرایی نشده است. یکی از مشکلات اساسی این است که بسیاری از صنایع، به دلیل کمبود نقدینگی و هزینه‌های بالای تولید، توانایی بهره‌مندی از این حمایت‌ها را ندارند. از سوی دیگر، تخصیص منابع دولتی به طرح‌های بهینه‌سازی انرژی، اغلب در اولویت‌های پایین‌تر قرار می‌گیرد و با تأخیرهای طولانی همراه است.

برای مثال، برخی از صنایع در ایران به دنبال جایگزینی تجهیزات قدیمی و ناکارآمد با فناوری‌های جدید کم‌مصرف هستند، اما به دلیل هزینه‌های اولیه بالا و عدم دسترسی به وام‌های کم‌بهره، قادر به اجرای این تغییرات نیستند. همچنین، برخی از برنامه‌های حمایتی که در گذشته اجرا شده‌اند، به دلیل مشکلاتی مانند بروکراسی پیچیده، عدم شفافیت در تخصیص منابع و عدم تأمین مالی کافی، تأثیرگذاری محدودی داشته‌اند. در نتیجه، بسیاری از صنایع همچنان به استفاده از تجهیزات قدیمی و پرمصرف ادامه می‌دهند که این امر نه تنها هزینه‌های انرژی را افزایش می‌دهد، بلکه بهره‌وری کلی اقتصاد را نیز کاهش می‌دهد.

بنابراین، برای اینکه سیاست‌های حمایتی در ایران بتوانند تأثیر واقعی داشته باشند، نیاز به بازنگری در نحوه تخصیص منابع، ارائه وام‌های کم‌بهره با شرایط آسان‌تر، کاهش بروکراسی و ایجاد شفافیت در فرآیندهای اجرایی وجود دارد. علاوه بر این، جذب سرمایه‌گذاری‌های خارجی و بهره‌گیری از تجربیات کشورهای دیگری که در این زمینه موفق بوده‌اند، می‌تواند به بهبود وضعیت بهره‌وری انرژی در کشور کمک کند.



۳-۵-۴. فرهنگ سازی و مشارکت عمومی

در کشورهای توسعه یافته، آگاهی بخشی عمومی و مشارکت صنایع و شهروندان در کاهش مصرف انرژی یکی از ارکان اصلی سیاست های انرژی است. دولت ها از طریق برنامه های آموزشی، تبلیغات گسترده، و تشویق های مالی، فرهنگ بهینه سازی مصرف انرژی را در جامعه نهادینه کرده اند. برای مثال، در کشورهای اروپایی، کمپین های متعددی برای آگاه سازی مردم درباره ی تأثیر مصرف انرژی بر محیط زیست و اقتصاد اجرا می شود. برنامه هایی مانند Energy Saving Trust در بریتانیا و Energiewende در آلمان، با ارائه راهکارهای عملی به مردم، آن ها را تشویق می کنند تا مصرف انرژی خود را کاهش دهند. در این کشورها، همچنین مشوق هایی مانند تخفیف در قبوض برق برای افرادی که مصرف خود را بهینه کنند، در نظر گرفته شده است. [۲۸]

علاوه بر این، مدارس و دانشگاه ها نقش مهمی در آموزش مصرف بهینه انرژی دارند. در ژاپن، برنامه های آموزشی از سنین کودکی در مدارس اجرا می شود تا دانش آموزان با اصول صرفه جویی در مصرف انرژی آشنا شوند. همچنین، دولت ها با همکاری صنایع، پروژه هایی مانند Smart Metering را اجرا کرده اند که به شهروندان امکان می دهد تا میزان مصرف انرژی خود را به صورت دقیق پایش کنند و بر اساس آن، رفتار مصرفی خود را اصلاح نمایند. [۲۹]

در مقابل، در ایران فرهنگ سازی در زمینه مصرف بهینه انرژی هنوز به اندازه کافی گسترده نیست. هرچند که برنامه هایی مانند طرح هدفمندی یارانه ها و برنامه های آموزشی تلویزیونی در جهت آگاه سازی مردم اجرا شده اند، اما به دلیل پایین بودن قیمت انرژی نسبت به استانداردهای جهانی، انگیزه کافی برای صرفه جویی در میان شهروندان وجود ندارد. برای مثال، در بسیاری از خانوارهای ایرانی، استفاده از وسایل گرمایشی و سرمایشی بدون در نظر گرفتن بهره وری انرژی رواج دارد، چراکه هزینه های انرژی به اندازه ای پایین است که کاهش مصرف تأثیر قابل توجهی بر هزینه های زندگی آن ها ندارد.

همچنین، صنایع ایرانی نیز به دلیل نبود الزام های سخت گیرانه در بهینه سازی مصرف انرژی، کمتر به سمت بهینه سازی حرکت می کنند. برخلاف کشورهای پیشرفته که صنایع ملزم به رعایت استانداردهای سخت گیرانه انرژی هستند، در ایران به دلیل عدم نظارت کافی، بسیاری از صنایع همچنان از تجهیزات قدیمی و پرمصرف استفاده می کنند. برای مثال، در بخش ساختمان سازی، هرچند مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان بهینه سازی مصرف انرژی را الزامی کرده است، اما به دلیل نبود نظارت کافی، این مقررات به درستی اجرا نمی شوند.

برای بهبود این وضعیت، لازم است که دولت ایران برنامه های آموزشی گسترده تری را در سطح مدارس، دانشگاه ها، و رسانه های جمعی اجرا کند. همچنین، اجرای سیاست هایی مانند قیمت گذاری واقعی انرژی، ارائه مشوق های مالی به شهروندان و صنایع برای کاهش مصرف، و تقویت نظارت بر اجرای استانداردهای انرژی، می تواند نقش مهمی در تغییر رفتار مصرفی مردم و صنایع ایفا کند.

۳-۶. بررسی برنامه‌های بهینه سازی مصرف انرژی در استان یزد

۳-۶-۱. تعیین یزد به عنوان قطب بهینه‌سازی مصرف گاز در صنعت کاشی و سرامیک

شرکت ملی گاز ایران، استان یزد را به عنوان یکی از قطب‌های میدانی بهینه‌سازی مصرف گاز در صنایع کاشی و سرامیک تعیین کرده است. این اقدام با هدف ارائه راهکارهای بهینه‌سازی و بسته‌های سرمایه‌گذاری در قالب بازار بهینه‌سازی مصرف انرژی و محیط‌زیست انجام شده است. در این راستا، اهدافی نظیر آسیب‌شناسی، تجزیه و تحلیل مصارف خارج از حد معیار، شناسایی فرصت‌های بهینه‌سازی، استخراج راهکارها و تهیه بسته‌های سرمایه‌گذاری برای اجرای این راهکارها در چارچوب بازار مذکور دنبال می‌شود. [۳۰]

۳-۶-۲. اجرای طرح مهان در استان یزد

طرح «مهان» (مصرف هوشمند انرژی) به عنوان یک ابتکار یک شرکت دانش بنیان در استان یزد اجرا شده است. این طرح با هدف بهینه‌سازی مصرف گاز طبیعی و مشارکت مردمی در صرفه‌جویی انرژی طراحی شده است. اجرای این طرح نتایج ملموسی در پی داشته است. به عنوان نمونه، در سه ماهه اخیر، بیش از ۲۳ میلیارد ریال پاداش به مشترکان یزدی پرداخت شده است. همچنین، اجرای طرح مهان منجر به صرفه‌جویی ۶.۶ میلیون مترمکعبی گاز در استان یزد شده است. این موفقیت‌ها نشان‌دهنده تأثیر مثبت مشارکت مردمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و اهمیت طرح‌های نوآورانه در مدیریت منابع انرژی است. [۳۱]

۳-۶-۳. اجرای طرح‌های مدیریت مصرف انرژی برق

شرکت توزیع نیروی برق استان یزد در راستای بهینه‌سازی مصرف انرژی و تشویق مشترکان به مصرف بهینه، طرح‌های متنوعی را به اجرا گذاشته است. یکی از این طرح‌ها، برنامه «مدیریت مصرف انرژی برق» است که از اوایل خردادماه آغاز شده و تا پایان شهریورماه ادامه داشته است. هدف اصلی این برنامه، کاهش مصرف برق در دوره‌های اوج مصرف تابستان و تشویق مشترکان به رعایت الگوهای بهینه مصرف است.

نتایج اولیه اجرای این طرح نشان‌دهنده استقبال خوب مشترکان یزدی است. به عنوان مثال، در خردادماه، ۴۵.۴ درصد از مشترکان خانگی استان موفق به دریافت پاداش صرفه‌جویی شدند که مجموع این پاداش‌ها به ۱۲ میلیارد ریال رسید. این امر نشان‌دهنده تأثیر مثبت طرح‌های تشویقی در ترغیب مشترکان به مدیریت مصرف انرژی و همکاری در بهبود پایداری شبکه برق استان است. [۳۲]

بخش چهارم
راهکارهای عملیاتی کوتاه مدت به منظور کاهش مصرف انرژی



۴. راهکارهای عملیاتی کوتاه مدت به منظور کاهش مصرف انرژی

صنایع سنگین مانند پتروشیمی، کاشی و سرامیک، و فولاد به عنوان ستون‌های اصلی اقتصاد بسیاری از کشورها، نقش حیاتی در توسعه صنعتی ایفا می‌کنند، اما همزمان از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در جهان به شمار می‌روند. آژانس بین‌المللی انرژی (IEA) در گزارش سال ۲۰۲۳ خود اعلام کرده است که بخش صنعت، به‌ویژه صنایع انرژی‌بر، مسئول حدود ۳۷ درصد از مصرف نهایی انرژی جهانی و بخش قابل‌توجهی از انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۳۳]. در این میان، صنایع پتروشیمی، کاشی و سرامیک، و فولاد به دلیل فرآیندهای پیچیده و دما بالای تولید، نیاز مبرمی به بهینه‌سازی مصرف انرژی دارند. این فصل با تمرکز بر راهکارهای عملیاتی کوتاه‌مدت، به دنبال ارائه راه‌حل‌هایی است که بتوانند بدون نیاز به بازطراحی گسترده زیرساخت‌ها، مصرف انرژی را در این صنایع کاهش دهند و بهره‌وری را افزایش دهند.

این فصل با تکیه بر داده‌ها و توصیه‌های مراجع معتبر جهانی، راهکارهایی عملی و کوتاه‌مدت را برای کاهش مصرف انرژی در صنایع پتروشیمی، کاشی و سرامیک، و فولاد پیشنهاد می‌دهد. این راه‌حل‌ها شامل بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، استفاده از سیستم‌های بازیافت انرژی و ارتقای تجهیزات موجود بدون نیاز به تغییرات ساختاری گسترده است. هدف این است که با ارائه پیشنهادهایی کاربردی و مبتنی بر شواهد، این صنایع بتوانند ضمن حفظ سطح تولید، گام‌های مؤثری در جهت کاهش مصرف انرژی و حرکت به سوی پایداری بردارند.

۱-۴. سیستم هوای فشرده

هوای فشرده یکی از منابع اصلی انرژی در صنایع مختلف محسوب می‌شود و کاربرد گسترده‌ای در فرآیندهای تولیدی، اتوماسیون صنعتی، ابزارهای پنوماتیکی و سیستم‌های کنترلی دارد. با این حال، این منبع انرژی از لحاظ اقتصادی یکی از پرهزینه‌ترین بخش‌های یک واحد صنعتی به شمار می‌رود، به‌طوری‌که هزینه تولید و مصرف آن در بسیاری از کارخانه‌ها بخش قابل‌توجهی از هزینه‌های عملیاتی را تشکیل می‌دهد. بهینه‌سازی مصرف هوای فشرده و اجرای راهکارهای کاهش انرژی می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌ها، افزایش راندمان تجهیزات و کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از مصرف انرژی داشته باشد.

یکی از چالش‌های اساسی در سیستم‌های هوای فشرده، میزان بالای اتلاف انرژی است. مطالعات نشان می‌دهند که بین ۱۵ تا ۵۰ درصد از کل هوای تولیدشده در یک سیستم صنعتی ممکن است از طریق نشتی‌ها هدر رود که این امر منجر به افزایش مصرف انرژی و کاهش بازدهی سیستم می‌شود. همچنین، افزایش فشار بیش از مقدار مورد نیاز، عدم استفاده از سیستم‌های بازیابی حرارتی، طراحی نامناسب شبکه لوله‌کشی و استفاده از تجهیزات ناکارآمد، از دیگر عوامل افزایش هزینه‌های انرژی در این سیستم‌ها هستند. علاوه بر این، بررسی‌های انجام‌شده در صنایع مختلف نشان داده است که با اجرای راهکارهای بهینه‌سازی می‌توان تا ۲۵ درصد در مصرف انرژی سیستم‌های هوای فشرده صرفه‌جویی کرد. [۳۴]

سالانه حدود ۴۰۰ تراوات ساعت برق در سیستم‌های هوای فشرده در سراسر جهان مصرف می‌شود. این میزان انرژی معادل تولید برق ۱۱۰ نیروگاه زغال‌سنگی با ظرفیت ۶۰۰ مگاوات است که به انتشار ۴۰۰ میلیون تن دی‌اکسید کربن در سال منجر می‌شود. جالب است بدانید که ۱۰ درصد از کل برق صنعتی صرف تأمین انرژی کمپرسورهای هوا می‌شود، که نشان‌دهنده سهم قابل‌توجه این تجهیزات در مصرف انرژی و تأثیرات زیست‌محیطی آن‌هاست. [۳۵]

از دیدگاه فنی، بهینه‌سازی سیستم‌های هوای فشرده نیازمند یک رویکرد جامع و سیستماتیک است که شامل بهبود تولید، توزیع و مصرف هوای فشرده می‌شود. برخی از روش‌های کلیدی که در بهینه‌سازی این سیستم‌ها تأثیر بسزایی دارند، شامل کاهش نشتی‌ها، بهینه‌سازی طراحی شبکه لوله‌کشی، استفاده از کمپرسورهای هوشمند با کنترل سرعت متغیر (VSD)، کاهش فشار بیش از حد، بازیابی گرمای تولیدشده در کمپرسورها و مدیریت صحیح تجهیزات انتهایی است. در بسیاری از موارد، اجرای این اقدامات نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه زیادی نیست که بازگشت سرمایه آن‌ها به دلیل کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش طول عمر تجهیزات، معمولاً در بازه زمانی کوتاهی جبران می‌شود.

در این زیر فصل، به بررسی روش‌های مختلف کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های هوای فشرده پرداخته خواهد شد. هدف این مطالعه، ارائه یک دیدگاه جامع در مورد بهینه‌سازی سیستم‌های هوای فشرده به عنوان یکی از راه کارهای سریع الوصول و کم هزینه و عملی برای کاهش هزینه‌ها و بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع مختلف است.

۱-۱-۴. کاهش و رفع نشتی‌ها

نشتی در خطوط لوله و تجهیزات هوای فشرده یکی از مهم‌ترین عوامل هدررفت انرژی در صنایع محسوب می‌شود. همان طور که قبلاً هم بیان شد، مطالعات نشان می‌دهند که بین ۱۵ تا ۵۰ درصد از کل هوای فشرده تولیدشده در یک سیستم صنعتی ممکن است از طریق نشتی‌ها از بین برود که این امر منجر به افزایش مصرف انرژی و کاهش بهره‌وری سیستم می‌شود [۳۶]. نشتی نه تنها باعث افزایش هزینه‌های انرژی می‌شوند، بلکه افت فشار ایجادشده در اثر نشتی می‌تواند عملکرد ابزارهای پنوماتیکی و تجهیزات متصل به سیستم را تحت تأثیر قرار دهد و راندمان تولید را کاهش دهد.

یکی از روش‌های رایج برای تخمین میزان نشتی در سیستم، اندازه‌گیری زمان بارگذاری و تخلیه کمپرسور است. این روش شامل روشن کردن کمپرسور زمانی که تمام تجهیزات مصرف‌کننده هوای فشرده خاموش هستند و ثبت زمان‌های روشن شدن و زمان‌های خاموش بودن می‌شود. با استفاده از معادله زیر می‌توان میزان نشتی را به صورت درصدی از کل

$$LR = \frac{t_{on}}{t_{off} + t_{on}} \times 100$$

LR = نرخ نشتی بر حسب درصد

t_{on} = زمان روشن بودن کمپرسور (دقیقه)

t_{off} = زمان خاموش بودن کمپرسور (دقیقه)

ظرفیت سیستم محاسبه کرد:

در مقاله ای تحت عنوان (Energy savings opportunities in compressed air systems) محققان بیان می‌کنند که حداکثر میزان نشتی قابل قبول در یک سیستم بهینه، حدود ۱۵ درصد از کل تولید هوای فشرده است. اگر این مقدار از ۳۰ درصد تجاوز کند، سیستم به بازرسی و نگهداری فوری نیاز دارد [۳۷].

۱-۱-۴. روش های یافتن نشتی در خطوط لوله هوای فشرده در کارخانه ها

نام روش	جزئیات روش	مزایا	معایب
روش های سنتی (بازرسی چشمی و شنیداری)	بازرسی چشمی و گوش دادن به صدای نشت هوا در خطوط لوله	روش ارزان و ساده امکان تشخیص نشتی های کوچک	دقت پایین در محیط های پر صدا عدم امکان شناسایی نشتی های کوچک نیاز به اپراتور با تجربه
استفاده از کف صابون	محل های مشکوک به نشتی (مانند اتصالات، فلنج ها و شیرها) با محلول کف صابون پوشانده می شوند	روش ارزان و ساده امکان تشخیص نشتی های کوچک	نیاز به دسترسی مستقیم به محل نشتی عدم امکان استفاده در سیستم های با فشار بالا یا محیط های صنعتی بزرگ
استفاده از دوربین های تصویری حرارتی	خروج هوای فشرده از یک نشتی باعث تغییر دمای محیط اطراف می شود که با استفاده از دوربین های حرارتی قابل مشاهده است	امکان تشخیص نشتی در سیستم های پر فشار عدم نیاز به توقف عملیات صنعتی	هزینه بالای تجهیزات دقت پایین نسبت به روش های دیگر
نشتیابی اولتراسونیک	از دستگاه های اولتراسونیک برای شناسایی صداهای فرکانس بالای ناشی از نشتی استفاده می شود	قابلیت تشخیص نشتی در محیط های پر نویز دقت بالا حتی برای نشتی های بسیار کوچک سرعت بالای شناسایی	هزینه بالای تجهیزات نیاز به آموزش اپراتور برای استفاده صحیح

۲-۱-۴. سایر روش ها برای کاهش نشتی های خطوط لوله فشار هوا

الف) استفاده از شیرهای خودکار و کنترل فشار: بسیاری از سیستم های صنعتی هنگامی که تجهیزات در حال استفاده نیستند، همچنان هوای فشرده را درون لوله ها نگه می دارند که این امر می تواند باعث افزایش میزان نشتی شود. استفاده از شیرهای برقی خودکار برای قطع جریان هوا در زمان های غیرفعال می تواند نشتی ها را به حداقل برساند [۳۴].

ب) افزایش قطر لوله ها و کاهش افت فشار: افزایش قطر لوله های انتقال هوای فشرده و کاهش طول مسیرهای غیرضروری می تواند افت فشار را کاهش داده و نیاز به فشار بالاتر (که خود منجر به افزایش نشتی می شود) را از بین ببرد. تحقیقات نشان می دهند که افزایش قطر لوله ها و کاهش تعداد زانوها و اتصالات می تواند تا ۱۲٪ در کاهش اتلاف انرژی سیستم مؤثر باشد [۳۸].

ج) نگهداری و پایش منظم سیستم: برنامه ریزی منظم برای بازرسی و نگهداری سیستم هوای فشرده یکی از مهم ترین راهکارهای کاهش نشتی است. انجام تست های دوره ای و ثبت میزان مصرف هوای فشرده به اپراتورها کمک می کند تا نشتی ها را در مراحل اولیه شناسایی کرده و از افزایش هزینه های انرژی جلوگیری کنند [۳۹].

۲-۱-۴. بهینه سازی طراحی شبکه لوله کشی

علاوه بر کاهش نشتی، طراحی مناسب و بهینه سازی شبکه لوله کشی هوای فشرده تأثیر مستقیم بر کاهش افت فشار، افزایش بهره‌وری سیستم و کاهش مصرف انرژی دارد. خطوط لوله نه تنها وظیفه انتقال هوا را بر عهده دارند، بلکه نقش حیاتی در حفظ فشار مطلوب و جلوگیری از اتلاف انرژی ایفا می‌کنند. تحقیقات نشان می‌دهند که طراحی نامناسب شبکه لوله کشی می‌تواند تا ۱۲٪ افت فشار اضافی ایجاد کند که این امر موجب افزایش مصرف انرژی کمپرسورها و کاهش راندمان سیستم می‌شود [۳۴]. طراحی مناسب این شبکه نه تنها باعث افزایش بهره‌وری تجهیزات و کاهش افت فشار می‌شود، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز کاهش می‌دهد. یکی از مهم‌ترین راهکارها در این زمینه، استفاده از سیستم حلقه‌ای (Ring Main) است. در این سیستم، جریان هوای فشرده از دو جهت به تجهیزات مصرف کننده می‌رسد، که این امر باعث توزیع یکنواخت فشار، کاهش سرعت جریان و در نتیجه کاهش افت فشار در کل شبکه می‌شود. برخلاف سیستم‌های خطی که در آن‌ها جریان هوا فقط از یک مسیر حرکت می‌کند و افت فشار زیادی ایجاد می‌شود، سیستم حلقه‌ای باعث تثبیت فشار در تمام نقاط شبکه خواهد شد [۳۴، ۴۰].

یکی دیگر از عوامل کلیدی در کاهش افت فشار و بهینه سازی شبکه، افزایش قطر لوله‌ها است. مطالعات نشان داده‌اند که افزایش ۲۵ درصدی قطر لوله‌ها می‌تواند افت فشار را تا ۵۰ درصد کاهش دهد. این کاهش افت فشار به معنای کاهش نیاز به افزایش فشار در کمپرسور و در نتیجه کاهش مصرف انرژی است. البته، افزایش قطر لوله باید با در نظر گرفتن هزینه‌های نصب و بهره‌برداری انجام شود، زیرا استفاده از لوله‌های بیش از حد بزرگ می‌تواند هزینه‌های اولیه را افزایش دهد. علاوه بر این، طراحی مسیر لوله کشی باید به گونه‌ای باشد که از اتصالات غیرضروری، زانوها و شیرهای اضافی اجتناب شود، زیرا هر اتصال و خمیدگی در مسیر، باعث افزایش اصطکاک و کاهش فشار هوا خواهد شد. طبق استانداردهای صنعتی، هر زانویی ۹۰ درجه، معادل چند متر افزایش طول لوله محسوب می‌شود که می‌تواند تأثیر منفی بر عملکرد سیستم داشته باشد [۴۰].

برای حفظ پایداری فشار و جلوگیری از نوسانات ناگهانی در سیستم، استفاده از مخازن ذخیره هوای فشرده در نقاط کلیدی شبکه توصیه می‌شود. این مخازن می‌توانند در لحظات اوج مصرف، جریان هوای یکنواختی را تأمین کرده و از روشن و خاموش شدن مکرر کمپرسورها جلوگیری کنند. این امر نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی می‌شود، بلکه استهلاک تجهیزات را نیز کاهش داده و عمر مفید آن‌ها را افزایش می‌دهد. در نتیجه، طراحی صحیح شبکه لوله کشی با در نظر گرفتن این عوامل، موجب بهبود کارایی سیستم و کاهش هزینه‌های عملیاتی خواهد شد [۳۹].

تحقیقات نشان داده‌اند که بهینه سازی طراحی لوله کشی می‌تواند تا ۱۲ درصد افت فشار را کاهش داده و در نتیجه، مصرف انرژی کمپرسورها را تا ۱۰ درصد کاهش دهد. کاهش افت فشار به این معناست که کمپرسور نیازی به تولید هوای بیشتر برای جبران تلفات فشاری ندارد، که در نهایت موجب کاهش مصرف برق و هزینه‌های مرتبط با آن خواهد شد. از طرف دیگر، فشار یکنواخت و بدون نوسان در سیستم، عملکرد ابزارهای پنوماتیکی و تجهیزات مصرف کننده را بهبود می‌بخشد و از خرابی‌های ناشی از نوسانات فشار جلوگیری می‌کند [۳۴].

۳-۱-۴. استفاده از تجهیزات کنترل هوشمند در سیستم‌های هوای فشرده

سیستم‌های هوای فشرده به دلیل مصرف بالای انرژی، نیاز به بهینه‌سازی عملکرد کمپرسورها و مدیریت مصرف هوا دارند. یکی از پیشرفته‌ترین روش‌های بهینه‌سازی، استفاده از کمپرسورهای مجهز به کنترل سرعت متغیر (VSD - Variable Speed Drive) و سیستم‌های کنترلی خودکار است. این فناوری‌ها می‌توانند میزان هوای فشرده موردنیاز را براساس تقاضای واقعی تنظیم کرده و از کارکرد بی‌رویه کمپرسورها جلوگیری کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از کمپرسورهای VSD می‌تواند تا ۳۵٪ و سیستم‌های کنترلی هوشمند تا ۱۵٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی ایجاد کنند. [۳۴]

در سیستم‌های سنتی هوای فشرده، کمپرسورها اغلب در حالت خاموش/روشن کار می‌کنند. این روش‌ها باعث مصرف بی‌رویه انرژی و افزایش استهلاک تجهیزات می‌شوند، زیرا کمپرسور مجبور است در دوره‌های زمانی مشخص، روشن و خاموش شود. این چرخه‌های متناوب نه تنها مصرف انرژی را افزایش می‌دهند، بلکه باعث نوسانات فشار و کاهش بهره‌وری کلی سیستم می‌شوند [۳۶]. در مقابل، کنترل سرعت متغیر (VSD) این امکان را فراهم می‌کند که سرعت کمپرسور متناسب با نیاز واقعی تنظیم شود، در نتیجه از مصرف اضافی انرژی جلوگیری شده و فشار هوای خروجی در محدوده بهینه باقی می‌ماند.

۴-۱-۴. کاهش دمای ورودی هوا در سیستم‌های هوای فشرده

در سیستم‌های هوای فشرده، یکی دیگر از عوامل مهم در کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری کمپرسورها، مدیریت دمای هوای ورودی است. دمای بالای هوای ورودی به کمپرسور تأثیر مستقیمی بر افزایش توان مصرفی کمپرسور و کاهش راندمان آن دارد. این امر به دلیل افزایش حجم هوای گرم و کاهش چگالی آن رخ می‌دهد، که در نتیجه کمپرسور باید انرژی بیشتری مصرف کند تا میزان مشخصی از هوای فشرده را تولید کند. مطالعات نشان داده‌اند که کاهش دمای هوای ورودی به ازای هر ۳ درجه سانتی‌گراد، می‌تواند به‌طور متوسط ۱٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کند. [۳۴] این کاهش نه تنها باعث بهبود عملکرد کمپرسور می‌شود، بلکه دمای پایین‌تر هوا باعث کاهش فشار حرارتی بر روی قطعات مکانیکی کمپرسور و افزایش طول عمر آنها خواهد شد.

یکی از روش‌های مؤثر در کاهش دمای هوای ورودی، استفاده از مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های خنک‌کننده در مسیر ورود هوا به کمپرسور است. این سیستم‌ها قادرند دمای هوای ورودی را کاهش داده و چگالی آن را افزایش دهند، که در نتیجه هوای بیشتری در هر چرخه فشرده‌سازی جذب می‌شود و راندمان کمپرسور افزایش می‌یابد. تحقیقات نشان می‌دهند که با کاهش دمای ورودی کمپرسور از ۳۰ درجه سانتی‌گراد به ۲۰ درجه سانتی‌گراد، می‌توان تا ۳٪ در مصرف انرژی کمپرسور صرفه‌جویی کرد [۳۸]. به همین دلیل، بسیاری از واحدهای صنعتی که نیاز به عملکرد بهینه دارند، از سیستم‌های خنک‌کننده و مسیرهای ورودی هوای تنظیم‌شده برای به حداقل رساندن دمای هوای ورودی استفاده می‌کنند.

علاوه بر استفاده از مبدل‌های حرارتی، بهبود طراحی محل ورودی هوا به کمپرسور نیز می‌تواند نقش مهمی در کاهش دمای آن داشته باشد. به عنوان مثال، در برخی از محیط‌های صنعتی، کمپرسورها در فضاهای بسته و گرم نصب می‌شوند که این امر باعث افزایش دمای هوای ورودی و کاهش راندمان سیستم می‌شود. در چنین شرایطی، انتقال ورودی هوا به یک محیط سردتر یا نصب کانال‌های ورودی هوای تازه از بیرون کارخانه، می‌تواند دمای ورودی را کاهش داده و به بهبود عملکرد کمپرسور کمک کند [۳۹].

عامل دیگری که می‌تواند در کاهش دمای ورودی هوا تأثیرگذار باشد، کنترل دمای محیطی کمپرسورخانه است. در بسیاری از واحدهای صنعتی، عدم تهویه مناسب در کمپرسورخانه‌ها باعث تجمع گرما و افزایش دمای هوای ورودی می‌شود. این امر باعث می‌شود که هوای گرم تولیدشده توسط خود کمپرسور مجدداً به داخل سیستم بازگردد و راندمان کمپرسور کاهش یابد. استفاده از سیستم‌های تهویه مناسب، عایق‌بندی حرارتی دیوارها و کاهش انتشار گرمای تولیدشده در فضای کمپرسورخانه از جمله راهکارهایی است که می‌تواند به کاهش دمای ورودی هوا و در نتیجه کاهش مصرف انرژی کمک کند [۴۰].

همچنین، استفاده از فیلترهای ورودی هوا با راندمان بالا یکی دیگر از راهکارهای مهم در این زمینه است. فیلترهای مسدود یا آلوده باعث افزایش مقاومت در مسیر ورود هوا شده و می‌توانند باعث افزایش دمای آن شوند. نگهداری و تعویض دوره‌ای این فیلترها موجب بهبود کیفیت هوای ورودی، کاهش فشار بر روی کمپرسور و بهینه‌سازی دمای هوا می‌شود [۳۴].

کاهش دمای ورودی هوا نه تنها در بهبود عملکرد کمپرسور تأثیرگذار است، بلکه از نظر اقتصادی نیز بسیار مهم است. به دلیل اینکه هوای خنک‌تر دارای چگالی بیشتری است، میزان بیشتری از هوا در هر چرخه فشرده‌سازی وارد کمپرسور شده و به همین دلیل، فشار مطلوب با مصرف انرژی کمتر تولید می‌شود. این امر می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های انرژی در طولانی‌مدت شود [۳۸]. به طور کلی، استراتژی‌های کاهش دمای ورودی کمپرسور شامل استفاده از مبدل‌های حرارتی، تهویه مناسب، طراحی بهینه مسیر ورودی هوا و نگهداری صحیح فیلترها است که همگی می‌توانند به کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری سیستم کمک کنند.

۲-۴. الکتروموتورها و الکتروپمپ‌های صنعتی

تعمیر و نگهداری پیشگیرانه یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش مصرف انرژی و افزایش بهره‌وری الکتروموتورها و الکتروپمپ‌ها در صنایع است. این تجهیزات به دلیل کارکرد مداوم در شرایط مختلف عملیاتی، در معرض فرسودگی قطعات، افزایش مقاومت داخلی و کاهش راندمان عملکردی قرار دارند. این عوامل نه تنها باعث افزایش مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی می‌شوند، بلکه عمر مفید موتور را کاهش داده و نیاز به تعمیرات پرهزینه را افزایش می‌دهند [۴۱]. انجام یک برنامه نگهداری و پایش منظم می‌تواند از ایجاد مشکلات ناگهانی جلوگیری کرده و مصرف انرژی را تا ۱۰٪ کاهش دهد [۴۲].

تحقیقات نشان داده‌اند که سرویس منظم و بررسی دوره‌ای قطعات کلیدی موتور، نقش مهمی در کاهش هدررفت انرژی دارد. با گذر زمان، اجزای داخلی الکتروموتور مانند یاتاقان‌ها، سیم‌پیچ‌ها و هسته آهنی در اثر حرارت و اصطکاک دچار فرسودگی می‌شوند. این فرسودگی باعث افزایش تلفات الکتریکی و مکانیکی شده و در نتیجه، موتور برای تولید توان خروجی مشخص، انرژی بیشتری مصرف می‌کند [۴۲]. بنابراین، برنامه‌ریزی دقیق برای نگهداری پیشگیرانه و اجرای بازرسی‌های منظم، باعث کاهش اتلاف انرژی و افزایش بهره‌وری سیستم خواهد شد [۴۳].

۱-۲-۴. تعویض و روانکاری یاتاقان‌ها برای کاهش اصطکاک و تلفات مکانیکی

یاتاقان‌ها یکی از مهم‌ترین بخش‌های مکانیکی الکتروموتورها هستند که وظیفه کاهش اصطکاک بین قطعات دوار را بر عهده دارند. با گذشت زمان، یاتاقان‌ها در اثر فشار، دما و سایش، دچار خرابی شده و باعث افزایش تلفات مکانیکی می‌شوند. مطالعات نشان می‌دهند که یاتاقان‌های فرسوده می‌توانند باعث افزایش ۳ تا ۷ درصدی مصرف انرژی شوند. [۴۱]

برای کاهش این تلفات، تعویض به موقع یاتاقان‌های فرسوده و روانکاری مناسب آن‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. روانکاری نامناسب یا استفاده از گریس‌های غیراستاندارد می‌تواند باعث افزایش اصطکاک، افزایش دمای کارکرد موتور و کاهش راندمان شود [۴۲]. علاوه بر این، وجود آلودگی در روان‌کننده‌ها می‌تواند باعث آسیب به یاتاقان‌ها و در نتیجه، افزایش مصرف انرژی شود. توصیه می‌شود که برنامه‌ریزی مشخصی برای تعویض و روانکاری یاتاقان‌ها بر اساس شرایط عملیاتی موتور تدوین شود تا از افزایش اصطکاک و کاهش بهره‌وری جلوگیری گردد. [۴۳]

۲-۲-۴. بررسی سلامت سیم‌پیچ‌ها و جلوگیری از افزایش مقاومت الکتریکی

سیم‌پیچ‌های استاتور و روتور در موتورهای پمپ‌های الکتریکی به مرور زمان ممکن است دچار فرسودگی عایق، افزایش مقاومت الکتریکی و کاهش هدایت جریان شوند. افزایش مقاومت الکتریکی سیم‌پیچ‌ها باعث افزایش تلفات الکتریکی شده و به افزایش تولید گرما و کاهش راندمان موتور منجر می‌شود. [۴۱]

یکی از روش‌های مهم در نگهداری سیم‌پیچ‌ها، انجام آزمایش‌های دوره‌ای مانند تست مقاومت عایقی (Megger Test) و تحلیل طیف فرکانسی موتور (Motor Circuit Analysis) است. این آزمایش‌ها می‌توانند مشکلات احتمالی مانند کاهش مقاومت عایقی و افزایش دمای سیم‌پیچ‌ها را شناسایی کرده و با برطرف کردن آن موارد از کاهش بازدهی موتور جلوگیری کرد [۴۲]. همچنین، سیم‌پیچ‌هایی که دچار آسیب‌های مکانیکی یا حرارتی شده‌اند، باید مجدداً سیم‌پیچی شوند تا راندمان الکتریکی موتور حفظ گردد. [۳۲]

۳-۲-۴. بررسی فن‌ها و سیستم‌های خنک‌کننده موتور

افزایش دمای موتور یکی از عوامل اصلی کاهش عمر و افزایش مصرف انرژی در الکتروموتورها است. تحقیقات نشان می‌دهد که افزایش دمای کاری موتور به ازای هر ۱۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند عمر مفید آن را تا ۵۰٪ کاهش دهد [۴۲]. دمای بالای موتور می‌تواند به دلیل کثیفی سیستم‌های خنک‌کننده، عدم تهویه مناسب و کارکرد در شرایط دمایی بالا رخ دهد.

برای جلوگیری از این مشکلات، تمیز کردن منظم پره‌های خنک‌کننده، اطمینان از عملکرد صحیح فن‌ها و بررسی میزان جریان هوا در محفظه موتور ضروری است. [۴۱] در بسیاری از موارد، مسدود شدن مسیرهای تهویه موتور می‌تواند باعث افزایش دما و کاهش راندمان شود. در نتیجه، اجرای برنامه منظم نگهداری و تمیزکاری سیستم‌های خنک‌کننده، نقش کلیدی در بهبود مصرف انرژی الکتروموتورها دارد. [۴۳]

۴-۲-۴. تنظیم و بررسی بالانس مکانیکی موتور

بالانس نبودن بخش‌های دوار مانند روتور، پولی‌ها و کوپلینگ‌ها می‌تواند باعث افزایش ارتعاشات موتور، افزایش اصطکاک و کاهش راندمان کلی سیستم شود. وجود عدم تعادل در سیستم، علاوه بر کاهش کارایی، باعث افزایش

مصرف انرژی می‌شود. بررسی‌های انجام‌شده نشان می‌دهند که یک موتور نامتوازن می‌تواند تا ۵٪ انرژی بیشتری مصرف کند [۴۲].

برای جلوگیری از این مشکل، انجام تست‌های ارتعاش سنجی و آنالیز مکانیکی موتور به صورت دوره‌ای توصیه می‌شود. در بسیاری از موارد، یک برنامه تعمیر و نگهداری مناسب شامل تنظیم بالانس مکانیکی و کنترل ارتعاشات، می‌تواند عملکرد موتور را بهینه کند و از مصرف بی‌رویه انرژی جلوگیری نماید [۴۱].

۴-۲-۵. استفاده از درایوهای کنترل سرعت

موتورهای الکتریکی در بسیاری از کاربردهای صنعتی، تجاری و خانگی نقشی حیاتی ایفا می‌کنند و بخش قابل توجهی از مصرف انرژی الکتریکی را به خود اختصاص می‌دهند. یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش مصرف انرژی این موتورها، استفاده از سیستم‌های کنترل سرعت (Variable Speed Drives - VSDs) است. این سیستم‌ها با تنظیم دقیق سرعت موتور بر اساس نیاز بار، از هدررفت انرژی جلوگیری کرده و کارایی کلی سیستم را افزایش می‌دهند. در بسیاری از فرآیندهای صنعتی، موتورها با سرعت ثابت کار می‌کنند، در حالی که نیاز واقعی بار متغیر است. استفاده از درایوهای کنترل سرعت، به جای روش‌های سنتی مانند دريچه‌های مکانیکی در پمپ‌ها و فن‌ها، می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰-۵۰٪ کاهش دهد [۴۴].

یکی از مهم‌ترین روش‌های کنترل سرعت در موتورهای الکتریکی، استفاده از درایوهای فرکانس متغیر (Variable Frequency Drives - VFDs) است. این سیستم‌ها با تغییر فرکانس و ولتاژ ورودی موتور، سرعت آن را بر اساس نیاز فرآیند تنظیم می‌کنند. در سیستم‌های سنتی که از دریچه‌های کنترلی برای کاهش دبی یا فشار در پمپ‌ها و فن‌ها استفاده می‌شود، موتور همچنان با سرعت نامی خود کار می‌کند و بخش زیادی از انرژی به صورت تلفات مکانیکی در دریچه‌ها از بین می‌رود. اما درایوهای فرکانس متغیر مستقیماً توان الکتریکی مصرفی را متناسب با نیاز فرآیند کاهش داده و باعث کاهش چشمگیر تلفات انرژی می‌شوند. علاوه بر این، این سیستم‌ها افزایش جریان راه‌اندازی موتور را که معمولاً موجب پیک‌های مصرفی و استهلاک زود هنگام تجهیزات می‌شود، به حداقل می‌رسانند. [۴۵]

درایوهای کنترل سرعت همچنین نقش مهمی در بهینه‌سازی کنترل بارهای دینامیکی و بهبود ضریب توان دارند. در بسیاری از کاربردها، به‌ویژه در سیستم‌های تهویه مطبوع، کمپرسورها، و نوار نقاله‌ها، نیاز به تنظیم دقیق سرعت موتور برای هماهنگی با بار وجود دارد. سیستم‌های VSD نه تنها این تنظیمات را به صورت خودکار انجام می‌دهند، بلکه به دلیل کاهش جریان راه‌اندازی و کنترل دقیق توان مصرفی، بهبود ضریب توان شبکه را نیز به همراه دارند. این موضوع علاوه بر کاهش هزینه‌های برق مصرفی، فشار کمتری را به شبکه توزیع تحمیل کرده و پایداری سیستم را افزایش می‌دهد. [۴۶، ۴۷]

علاوه بر کنترل فرکانس و ولتاژ، برخی از درایوهای پیشرفته از الگوریتم‌های هوشمند کنترل تطبیقی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها با تحلیل شرایط کاری موتور و بار متصل به آن، می‌توانند تنظیمات بهینه را برای کاهش مصرف انرژی اعمال کنند. به عنوان مثال، درایوهای مبتنی بر کنترل برداری (Vector Control) قادرند گشتاور و سرعت موتور را به طور مستقل کنترل کنند و در نتیجه، بازده کلی سیستم را در شرایط بار متغیر افزایش دهند. همچنین، ترکیب این درایوها با سیستم‌های پایش و کنترل هوشمند (SCADA)، امکان نظارت دقیق بر عملکرد موتور و اجرای استراتژی‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی را فراهم می‌کند. [۴۷، ۴۸]

۳-۴. مشعل و سیستم بویلر

بویلرهای صنعتی یکی از بزرگ‌ترین مصرف‌کنندگان انرژی در فرایندهای تولیدی و گرمایشی هستند. با توجه به هزینه‌های بالای انرژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی در این سیستم‌ها می‌تواند کاهش هزینه‌های سوخت، افزایش راندمان و کاهش اثرات زیست‌محیطی را به همراه داشته باشد [۴۹].

۱-۳-۴. بهینه‌سازی دمای دودکش

دمای گازهای خروجی از دودکش، یکی از عوامل مهم در سنجش راندمان بویلرها است. مقدار زیادی از انرژی تولید شده در بویلر، به صورت حرارت از طریق گازهای خروجی هدر می‌رود. اگر دمای دودکش بیش از حد بالا باشد، نشان‌دهنده انتقال نامناسب حرارت در بویلر و کاهش بازدهی آن است.

تحقیقات نشان داده‌اند که کاهش دمای دودکش از ۱۷۰ درجه سانتی‌گراد به ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌تواند تا ۵٪ افزایش راندمان بویلر را به همراه داشته باشد [۴۹]. برای بهینه‌سازی دمای دودکش، استفاده از اکونومایزر (Economizer) و پیش‌گرم‌کن هوا (Air Preheater) توصیه می‌شود. این تجهیزات گرمای خروجی از دودکش را بازیافت کرده و آن را برای گرم کردن آب تغذیه‌ی بویلر یا هوای احتراق مورد استفاده قرار می‌دهند.

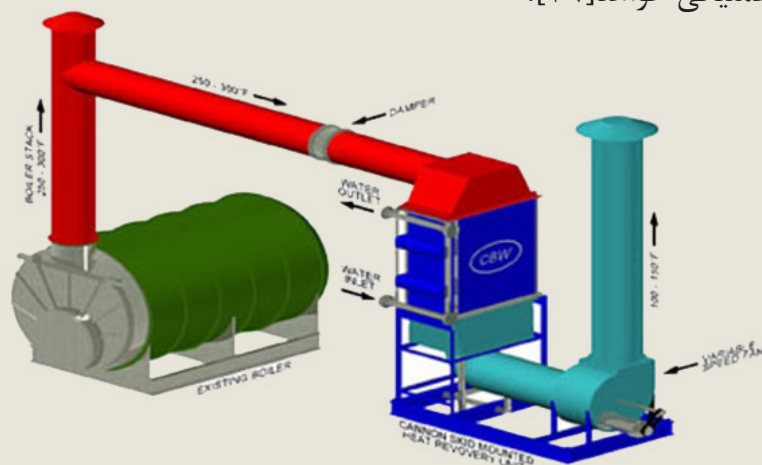
۱-۱-۳-۴. اکونومایزر

اکونومایزر یکی از تجهیزات کلیدی در بویلرهای صنعتی و نیروگاهی است که برای بازیافت گرمای هدررفته از گازهای خروجی دودکش و افزایش راندمان سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. در فرایند احتراق بویلرها، مقدار زیادی از انرژی تولید شده همراه با گازهای داغ از طریق دودکش هدر می‌رود. اکونومایزر این گرما را جذب کرده و برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه بویلر قبل از ورود به دیگ بخار استفاده می‌کند، که در نتیجه باعث کاهش مصرف سوخت و افزایش بهره‌وری انرژی می‌شود [۴۹].

عملکرد اکونومایزر به این صورت است که گازهای داغ خروجی از دودکش از روی لوله‌های حاوی آب تغذیه بویلر عبور می‌کنند. این گرمای بازیافتی باعث افزایش دمای آب قبل از ورود به بویلر شده و در نتیجه بویلر انرژی کمتری برای رساندن آب به دمای بخار مورد نیاز مصرف می‌کند. تحقیقات نشان داده‌اند که نصب اکونومایزر در سیستم‌های بویلر می‌تواند راندمان حرارتی بویلر را بین ۵٪ تا ۱۰٪ افزایش دهد که این مقدار منجر به کاهش مصرف سوخت و هزینه‌های عملیاتی خواهد شد [۴۹].



شکل شماره ۳: یک نمونه از دستگاه اکونومایزر نصب شده در صنعت



شکل شماره ۲: نحوه عملکرد اکونومایزر

در صنعت یکی دیگر از مزایای مهم اکونومایزر، کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای است. با کاهش مصرف سوخت، میزان انتشار دی‌اکسید کربن (CO_2) و سایر آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز کاهش می‌یابد. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از اکونومایزر در بویلرهای صنعتی می‌تواند سالانه هزاران تن از انتشار گازهای گلخانه‌ای جلوگیری کند، که این امر علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، از نظر زیست‌محیطی نیز بسیار حائز اهمیت است [۴۹].

علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف انرژی، استفاده از اکونومایزر موجب افزایش طول عمر بویلر و کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری می‌شود. ورود آب سرد به بویلر باعث ایجاد تنش‌های حرارتی در لوله‌ها و دیواره‌های داخلی شده که در بلندمدت منجر به آسیب‌های مکانیکی و کاهش عمر مفید تجهیزات خواهد شد. اما پیش گرم کردن آب تغذیه بویلر توسط اکونومایزر، این شوک حرارتی را کاهش داده و از فرسایش زودرس تجهیزات جلوگیری می‌کند [۴۹].

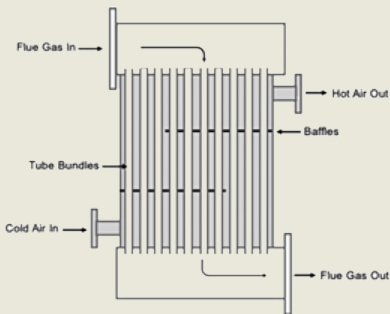
به‌طور کلی، اکونومایزر یکی از مؤثرترین تجهیزات برای افزایش راندمان بویلرهای صنعتی است که با بازیافت حرارت هدررفته، کاهش مصرف سوخت، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و افزایش طول عمر سیستم‌های حرارتی، تأثیر بسزایی در کاهش هزینه‌های انرژی و بهینه‌سازی فرایندهای صنعتی دارد. با توجه به هزینه‌های بالای سوخت در صنایع، استفاده از اکونومایزر می‌تواند بازگشت سرمایه سریعی داشته و به کاهش هزینه‌های عملیاتی در بلندمدت کمک کند [۴۹].

۴-۳-۲. پیش گرم کن هوا

پیش گرم کن هوا یکی از ابزارهای حیاتی در بویلرهای صنعتی است که برای افزایش راندمان و کاهش مصرف سوخت در سیستم‌های حرارتی استفاده می‌شود. در سیستم‌های بویلر، گازهای داغ خروجی از فرآیند احتراق معمولاً به‌طور مستقیم از طریق دودکش‌ها به محیط تخلیه می‌شوند. این گازهای داغ حاوی انرژی زیادی هستند که اگر بازیافت شوند، می‌توانند در فرآیندهای دیگر سیستم مورد استفاده قرار گیرند. پیش گرم کن هوا این امکان را فراهم می‌کند که حرارت گازهای دودکش بازیافت‌شده به هوای سرد ورودی منتقل شود و باعث گرم شدن هوای مورد نیاز برای احتراق در بویلر گردد. این فرآیند موجب کاهش نیاز به مصرف سوخت برای گرم کردن هوای سرد می‌شود و به افزایش بهره‌وری سیستم و کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کند. [۵۰]

پیش گرم کن هوا از طریق انتقال حرارت از گازهای داغ خروجی به هوای سرد ورودی عمل می‌کند. به‌طور معمول، گازهای دودکش از بویلر خارج می‌شوند و دمای آن‌ها می‌تواند بسیار بالا باشد. این گازها معمولاً بین ۱۵۴ تا ۳۱۵ درجه سانتی‌گراد در جریان هستند. هوای سرد که برای احتراق وارد بویلر می‌شود، از کنار لوله‌های حاوی گازهای داغ عبور می‌کند و به‌این ترتیب دمای آن افزایش می‌یابد. در نتیجه، هوای ورودی قبل از ورود به بویلر گرم شده و این امر باعث می‌شود که بویلر به انرژی کمتری برای رسیدن به دمای مورد نیاز برای تولید بخار نیاز داشته باشد. این فرآیند به‌طور قابل توجهی میزان مصرف سوخت را کاهش می‌دهد و راندمان سیستم را بهبود می‌بخشد. [۵۰]

در مقایسه با سیستم‌های بویلر بدون پیش گرم کن هوا، استفاده از این فناوری می‌تواند به‌طور متوسط تا ۴٪ مصرف سوخت را کاهش دهد. این کاهش مصرف سوخت در نتیجه بازیافت حرارت گازهای دودکش است که در غیر این صورت هدر می‌رفتند. همچنین، کاهش دمای دودکش که به‌واسطه استفاده از پیش گرم کن هوا اتفاق می‌افتد، باعث می‌شود که تلفات حرارتی کمتری از سیستم خارج شود. علاوه بر این، این کاهش دمای گازهای خروجی به کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از آلاینده‌هایی مانند دی‌اکسید کربن (CO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NOx) کمک می‌کند. با کاهش مصرف سوخت، میزان آلاینده‌ها به‌طور مستقیم کاهش می‌یابد، که این امر در راستای اهداف محیط‌زیستی بسیاری از صنایع قرار دارد. [۵۰]



شکل شماره ۴: نحوه عملکرد پیش گرم کن هوا

علاوه بر افزایش بهره‌وری و کاهش آلاینده‌ها، استفاده از پیش گرم کن هوا از لحاظ اقتصادی نیز حائز اهمیت است. با بهبود عملکرد بویلر و کاهش مصرف سوخت، هزینه‌های انرژی به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. از آنجایی که بویلرها معمولاً به‌طور مداوم در کارخانجات بزرگ و نیروگاه‌ها استفاده می‌شوند، کاهش مصرف سوخت در این مقیاس می‌تواند باعث صرفه‌جویی‌های مالی زیادی در طولانی مدت شود. همچنین، استفاده از پیش گرم کن هوا باعث کاهش استهلاک بویلرها و دیگر تجهیزات می‌شود، زیرا دمای بالاتر هوای ورودی باعث کاهش تنش‌های حرارتی و آسیب‌های ناشی از تغییرات دما می‌شود. در نتیجه، این تجهیزات عمر مفید سیستم را افزایش داده و نیاز به تعمیرات زود هنگام را کاهش می‌دهند [۵۰].

۲-۳-۴. کنترل میزان هوای اضافی در احتراق

احتراق در بویلرهای صنعتی فرآیندی است که نیاز به نسبت دقیق هوا به سوخت دارد تا بیشترین بازدهی انرژی حاصل شود. هر سوختی برای احتراق کامل نیازمند مقدار معینی اکسیژن است که در شرایط ایده‌آل، این مقدار دقیقاً برابر با نسبت استوکیومتری سوخت و اکسیژن خواهد بود. با این حال، در عمل برای جلوگیری از احتراق ناقص، مقدار بیشتری از هوای مورد نیاز به محفظه احتراق تزریق می‌شود. این هوای اضافی که به آن هوای اضافی احتراق (Excess Air) گفته می‌شود، اگر به‌درستی تنظیم نشود، می‌تواند موجب کاهش راندمان بویلر، افزایش مصرف سوخت و افزایش آلاینده‌های زیست‌محیطی شود [۵۱].

هوای اضافی بیش از حد باعث کاهش دمای شعله و افزایش حجم گازهای خروجی می‌شود که در نهایت موجب افزایش تلفات حرارتی از طریق دودکش خواهد شد. از سوی دیگر، اگر مقدار هوای اضافی کمتر از حد بهینه باشد، احتراق ناقص رخ می‌دهد که منجر به افزایش تولید مونوکسیدکربن (CO)، دوده و هیدروکربن‌های نسوخته می‌شود. علاوه بر این، احتراق ناقص می‌تواند باعث ایجاد رسوب در سطوح انتقال حرارت شود که بازده انتقال حرارت را کاهش داده و مصرف سوخت را افزایش می‌دهد. مطالعات نشان داده‌اند که کاهش میزان هوای اضافی از ۴۰٪ به ۱۵٪ می‌تواند راندمان بویلر را تا ۲٪ افزایش دهد، زیرا کاهش حجم گازهای خروجی و بهینه‌سازی دمای شعله باعث افزایش کارایی احتراق خواهد شد [۵۱].

برای دستیابی به تنظیم دقیق میزان هوای اضافی، فناوری‌های مختلفی در سیستم‌های بویلر مورد استفاده قرار می‌گیرند. یکی از این روش‌ها، استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند اکسیژن (Oxygen Trim Control Systems) است. این سیستم‌ها به‌صورت لحظه‌ای میزان اکسیژن موجود در گازهای خروجی را اندازه‌گیری کرده و مقدار هوای ورودی را به‌طور خودکار تنظیم می‌کنند تا مقدار بهینه هوای اضافی حفظ شود. استفاده از این فناوری می‌تواند موجب کاهش مصرف سوخت تا ۳٪ شده و عملکرد بویلر را در بارهای مختلف بهینه کند. علاوه بر این، آنالایزهای گازهای دودکش (Flue Gas Analyzers) می‌توانند اطلاعات دقیقی درباره ترکیب گازهای حاصل از احتراق، شامل میزان اکسیژن، مونوکسیدکربن و اکسیدهای نیتروژن ارائه دهند. این اطلاعات به اپراتورها کمک می‌کند تا تنظیمات احتراق را بهینه کرده و از هدررفت انرژی جلوگیری کنند [۵۲].

استفاده از مشعل‌های پیشرفته که قابلیت تنظیم متغیر نسبت هوا به سوخت را دارند نیز می‌تواند نقش مهمی در کنترل میزان هوای اضافی داشته باشد. این مشعل‌ها می‌توانند به‌طور هوشمند، میزان هوای اضافی را بر اساس بار حرارتی بویلر تنظیم کنند و از افزایش غیرضروری حجم هوای احتراق جلوگیری نمایند. به این ترتیب، سیستم می‌تواند عملکرد پایداری داشته باشد و مصرف انرژی بهینه‌تری را تجربه کند.

کنترل دقیق میزان هوای اضافی علاوه بر افزایش راندمان بویلر و کاهش مصرف انرژی، موجب کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی نیز خواهد شد. با کاهش مقدار هوای اضافی، دمای گازهای خروجی کاهش یافته و میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند دی‌اکسید کربن (CO_2) و اکسیدهای نیتروژن (NO_x) کاهش می‌یابد. این امر به‌ویژه در صنایعی که به استانداردهای زیست‌محیطی پایبند هستند، از اهمیت بالایی برخوردار است. علاوه بر این، کاهش دوده و رسوبات ناشی از احتراق ناقص، موجب افزایش عمر مفید تجهیزات و کاهش هزینه‌های نگهداری خواهد شد. [۵۰]

در مجموع، کنترل میزان هوای اضافی در احتراق یک عامل کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد بویلرهای صنعتی است. کاهش میزان هوای اضافی، بهینه‌سازی دمای شعله و استفاده از سیستم‌های هوشمند کنترل اکسیژن و آنالیزهای گازهای دودکش می‌تواند مصرف سوخت را کاهش داده، راندمان احتراق را افزایش دهد و اثرات زیست‌محیطی فرآیندهای احتراقی را به حداقل برساند. با توجه به تأثیر مستقیم هوای اضافی بر عملکرد بویلر، سرمایه‌گذاری در فناوری‌های پیشرفته کنترل احتراق می‌تواند علاوه بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، موجب افزایش پایداری و کارایی سیستم‌های حرارتی در بلندمدت شود. [۴۹]



شکل شماره ۵: یک نمونه از سیستم Oxygen Trim Control Systems

۳-۳-۴. مدیریت آب تغذیه و کندانس

آب تغذیه و کندانس در بویلرهای صنعتی نقش بسیار مهمی در افزایش راندمان، کاهش مصرف انرژی و افزایش طول عمر تجهیزات ایفا می کنند. مدیریت صحیح این دو بخش از سیستم بخار می تواند تلفات انرژی را کاهش داده، مصرف سوخت را بهینه کند و از تشکیل رسوبات و خوردگی در بویلر جلوگیری نماید. آب مورد استفاده در بویلر باید دارای کیفیت مناسب باشد تا از تشکیل رسوبات در سطح لوله ها جلوگیری کرده و انتقال حرارت به صورت مؤثر انجام شود. علاوه بر این، بازیافت کندانس یکی از مؤثرترین روش ها برای کاهش هدررفت انرژی و بهینه سازی عملکرد سیستم های بخار صنعتی محسوب می شود [۴۹].

آب تغذیه ای که وارد بویلر می شود، می تواند حاوی املاح معدنی، گازهای محلول و آلاینده های دیگر باشد که در صورت عدم کنترل، منجر به ایجاد رسوبات، خوردگی و کاهش راندمان حرارتی خواهد شد. رسوب گذاری در لوله های بویلر یک مشکل رایج است که باعث کاهش نرخ انتقال حرارت، افزایش مصرف سوخت و در موارد شدید، خرابی زودهنگام بویلر می شود. بررسی ها نشان داده اند که یک لایه رسوب به ضخامت ۱ میلی متر می تواند راندمان انتقال حرارت را تا ۷٪ کاهش دهد [۴۹].

۳-۳-۴-۱. استفاده از سیستم های تصفیه آب تغذیه

برای جلوگیری از مشکلات ناشی از کیفیت نامناسب آب تغذیه، استفاده از سیستم های تصفیه آب مانند سیستم های اسمز معکوس (RO) و دی یونیزاسیون توصیه می شود. این فناوری ها می توانند ذرات معلق، کلسیم، منیزیم و سایر مواد معدنی را حذف کنند و مانع از تشکیل رسوبات شوند.



شکل شماره ۶: نمونه ای از سیستم اسمز معکوس یا RO

۴-۳-۳-۲. استفاده از سختی‌گیرها برای آب تغذیه



شکل شماره ۷: نمونه‌ای از سختی گیر

علاوه بر سیستم‌های بالا سختی‌گیرها با استفاده از فرایند تبادل یونی، یون‌های سختی‌زا مانند کلسیم و منیزیم را حذف کرده و از تشکیل رسوبات جلوگیری می‌کنند. این فناوری می‌تواند نه تنها از تشکیل رسوبات جلوگیری کند، بلکه باعث بهبود کیفیت آب تغذیه، کاهش مصرف مواد شیمیایی و افزایش طول عمر بویلر شود. [۵۳]

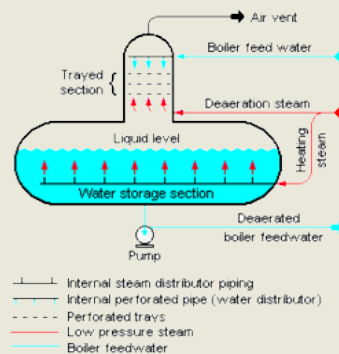
۴-۳-۳-۳. استفاده از هوازا یا دگازورهای حرارتی برای آب تغذیه

یکی دیگر از عوامل مهم کنترل pH و قلیائیت آب تغذیه می‌باشد، زیرا عدم تعادل در این پارامترها می‌تواند موجب خوردگی و در نتیجه کاهش کیفیت آب و افزایش رسوب‌گذاری در لوله‌های بویلر و تجهیزات جانبی و کاهش شدید بهره‌وری و افزایش مصرف انرژی در بویلرها شود. از این‌رو، استفاده از مواد شیمیایی ضد خوردگی و حذف گازهای خورنده مانند اکسیژن و دی‌اکسید کربن از طریق هواگیرهای حرارتی (Deaerators) به افزایش عمر بویلر کمک می‌کند [۴۹].

هوازاهای حرارتی یکی از تجهیزات مهم در سیستم‌های بخار صنعتی است که وظیفه حذف گازهای محلول از آب تغذیه بویلر را بر عهده دارد. آب خامی که به عنوان آب تغذیه بویلر استفاده می‌شود، حاوی گازهای نامطلوب مانند اکسیژن (O_2) و دی‌اکسید کربن (CO_2) است. این گازها در صورت باقی ماندن در سیستم، باعث خوردگی شدید در لوله‌ها، مبدل‌های حرارتی و تجهیزات بویلر و در نتیجه کاهش راندمان می‌شوند. هواگیرها با استفاده از حرارت و بخار فشار بالا، این گازهای نامطلوب را از آب جدا کرده و از ورود آن‌ها به سیستم جلوگیری می‌کند.



شکل شماره ۹: نمونه ای از هوازای حرارتی بویلر



شکل شماره ۸: نحوه عملکرد سیستم هوازای حرارتی

۴-۳-۳-۴. مدیریت بلودان در بویلرها

علاوه بر تصفیه آب، مدیریت بلودان (Blowdown) نیز نقش مهمی در حفظ عملکرد بهینه بویلر دارد. بلودان فرآیندی است که طی آن بخشی از آب بویلر که حاوی املاح و ناخالصی‌های محلول است به صورت پیوسته یا به صورت دوره‌ای تخلیه می‌شود تا از تجمع بیش از حد مواد معدنی جلوگیری شود. در صورتی که این فرآیند به درستی انجام نشود، می‌تواند منجر به رسوب‌گذاری و خوردگی در لوله‌های بویلر شود. با این حال، تخلیه بیش از حد آب بویلر باعث هدررفت انرژی و افزایش مصرف سوخت می‌شود. به همین دلیل، کنترل دقیق میزان بلودان با استفاده از سیستم‌های خودکار و حسگرهای پایش املاح محلول، می‌تواند موجب کاهش هدررفت انرژی و افزایش بهره‌وری سیستم بخار شود. [۵۴]

۴-۳-۵. سیستم بازیافت کندانس در بویلرها

یکی دیگر از روش‌های کلیدی برای افزایش بهره‌وری انرژی در بویلرها، بازیافت کندانس (Condensate Recovery) است. کندانس، آب حاصل از چگالش بخار است که دمای بالایی دارد (معمولاً بین ۶۰ تا ۹۰ درجه سانتی‌گراد). اگر این آب مجدداً به بویلر بازگردانده شود، مقدار انرژی موردنیاز برای پیش‌گرم کردن آب تغذیه کاهش می‌یابد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که بازیافت کندانس می‌تواند مصرف انرژی را تا ۱۰٪ کاهش دهد و در عین حال نیاز به آب تازه را کم کند، که این امر موجب صرفه‌جویی در هزینه‌های عملیاتی می‌شود. [۵۴]

برای بهینه‌سازی فرآیند بازیافت کندانس، لازم است که سیستم‌های جمع‌آوری و بازگردانی کندانس به درستی طراحی شوند. یکی از چالش‌های رایج در این زمینه، حفظ فشار مناسب در خطوط بازگشت کندانس و جلوگیری از پدیده ضربه قوچ (Water Hammer) است که می‌تواند به لوله‌ها و تجهیزات آسیب برساند. استفاده از تله‌های بخار (Steam Traps) با عملکرد مناسب و شیرهای کاهش فشار می‌تواند از این مشکلات جلوگیری کرده و انتقال کندانس را به بویلر تسهیل کند. همچنین، در مواردی که کندانس حاوی ناخالصی‌های محلول است، استفاده از سیستم‌های فیلتراسیون و دگازور برای حذف اکسیژن و دی‌اکسیدکربن محلول توصیه می‌شود.

۴-۳-۴. کاهش تلفات حرارتی از طریق عایق‌بندی

یکی از چالش‌های اساسی در عملکرد بویلرهای صنعتی، کاهش تلفات حرارتی و افزایش راندمان انرژی است. بخش زیادی از انرژی حرارتی تولیدشده در بویلرها از طریق سطوح خارجی بویلر، خطوط انتقال بخار و مخازن ذخیره بخار به محیط اطراف منتقل می‌شود. این انتقال حرارت ناخواسته، نه تنها باعث کاهش بهره‌وری سیستم می‌شود، بلکه هزینه‌های عملیاتی را نیز افزایش می‌دهد. بررسی‌ها نشان داده‌اند که عدم عایق‌بندی مناسب می‌تواند تا ۱۰٪ از انرژی تولیدی را هدر دهد که این مقدار در مقیاس صنعتی، منجر به اتلاف قابل توجهی از منابع سوختی و افزایش هزینه‌های اقتصادی می‌شود. [۴۹]

در فرآیندهای صنعتی که شامل تولید بخار و انتقال حرارت هستند، حفظ دمای مطلوب در سیستم‌های بخار و جلوگیری از کاهش راندمان حرارتی، یک اصل اساسی است. هرگونه اتلاف حرارتی از سطح بویلر و لوله‌های انتقال بخار، مستقیماً منجر به افزایش نیاز به سوخت و کاهش بازده کلی سیستم خواهد شد. این تلفات حرارتی می‌توانند در بخش‌های مختلف سیستم رخ دهند که مهم‌ترین آن‌ها شامل سطح بدنه بویلر، خطوط لوله بخار، اتصالات، دریچه‌ها و مخازن ذخیره بخار است. مطالعات نشان داده‌اند که یک لوله بخار بدون عایق می‌تواند در هر متر طول، سالانه مقدار قابل توجهی انرژی را هدر دهد که این امر در مقیاس یک کارخانه صنعتی، هزینه‌های سوخت و تولید را به شدت افزایش می‌دهد [۴۹].

علاوه بر کاهش مصرف سوخت، عایق‌بندی مناسب باعث افزایش ایمنی در محیط‌های صنعتی نیز می‌شود. بسیاری از اجزای سیستم بخار، دارای دمای بالایی هستند که می‌توانند در صورت تماس، خطر سوختگی برای کارکنان ایجاد کنند. همچنین، کاهش دمای سطوح خارجی تجهیزات از طریق عایق‌بندی، می‌تواند دمای کلی محیط را کاهش دهد که این امر به بهبود شرایط کاری و کاهش نیاز به سیستم‌های تهویه و سرمایشی کمک می‌کند. علاوه بر عایق‌بندی مناسب، شناسایی و رفع نقاط دارای نشتی حرارتی در بویلرها و خطوط انتقال بخار، یک اقدام حیاتی برای کاهش تلفات انرژی است. درزها، ترک‌ها و نقاطی که دارای اتصالات نادرست هستند، می‌توانند به عنوان مسیرهای ناخواسته برای اتلاف گرما عمل کنند و باعث کاهش بازده حرارتی شوند. در بسیاری از موارد، نشتی‌های بخار می‌توانند در نقاطی مانند فلنج‌ها، شیرهای کنترل بخار، دریچه‌های تخلیه و محل‌های اتصال لوله‌ها به تجهیزات رخ دهند.

برای تشخیص و کاهش این تلفات، انجام بازرسی‌های دوره‌ای و استفاده از تجهیزات تشخیص نشتی مانند دوربین‌های حرارتی و حسگرهای تشخیص بخار توصیه می‌شود. پس از شناسایی نقاط دارای نشتی حرارتی، می‌توان با استفاده از مواد درزبندی مقاوم در برابر حرارت و اجرای تعمیرات مکانیکی، این نقاط را ترمیم کرد. بررسی‌های صنعتی نشان داده‌اند که برطرف کردن نشتی‌های حرارتی در خطوط بخار و تجهیزات، می‌تواند تا ۵٪ در مصرف سوخت صرفه‌جویی کند که این میزان در مقیاس صنعتی، تأثیر اقتصادی قابل توجهی خواهد داشت [۴۹].

۴-۴. ضریب توان و بارهای سلفی و خازنی

ضریب توان یکی از معیارهای اساسی در بهره‌وری انرژی الکتریکی در صنایع محسوب می‌شود. این پارامتر نشان‌دهنده میزان کارایی یک سیستم در تبدیل توان ظاهری به توان مفید است. در بسیاری از صنایع، به‌ویژه در بارهای القایی مانند موتورهای الکتریکی، ضریب توان پایین منجر به افزایش مصرف توان راکتیو شده و در نتیجه تلفات انرژی، افزایش هزینه‌های برق، و کاهش ظرفیت عملیاتی تجهیزات شبکه برق را در پی دارد. مدیریت بهینه ضریب توان از طریق روش‌هایی نظیر اصلاح توان راکتیو، کنترل هارمونیک‌ها و استفاده از بانک‌های خازنی، می‌تواند به‌طور مؤثری مصرف انرژی را کاهش داده و بهره‌وری سیستم را افزایش دهد [۵۵].

مدیریت صحیح ضریب توان نه تنها موجب کاهش هزینه‌های برق و تلفات انرژی می‌شود، بلکه طول عمر تجهیزات الکتریکی را نیز افزایش می‌دهد. بسیاری از کشورها قوانین و مقرراتی برای تشویق صنایع به بهبود ضریب توان دارند، به‌طوری‌که در صورت پایین بودن ضریب توان از حد مجاز (معمولاً ۰.۹)، جریمه‌های مالی برای مصرف‌کنندگان صنعتی اعمال می‌شود. از این‌رو، سرمایه‌گذاری در تجهیزات بهبود ضریب توان نه تنها از نظر فنی و زیست‌محیطی بلکه از نظر اقتصادی نیز توجیه‌پذیر است [۵۶].

۴-۴-۱. استفاده از بانک‌های خازنی

یکی از روش‌های اصلی برای بهبود ضریب توان در صنایع، استفاده از بانک‌های خازنی است. این بانک‌ها توان راکتیو القایی را که توسط بارهای موتوری ایجاد می‌شود، جبران کرده و در نتیجه، توان ظاهری موردنیاز را کاهش می‌دهند. نصب این تجهیزات در نقاط مناسب شبکه، مانند نزدیک بارهای بزرگ یا در محل اتصال اصلی، باعث کاهش بارگذاری ترانسفورماتورها و خطوط انتقال شده و منجر به بهبود راندمان کلی سیستم توزیع انرژی می‌شود. با این حال، هنگام استفاده از بانک‌های خازنی باید اثرات جانبی مانند تشدید هارمونیک در نظر گرفته شود، زیرا این موضوع می‌تواند باعث افزایش اعوجاج شکل موج و کاهش کیفیت توان شود [۵۶].

بانک خازنی مجموعه‌ای از خازن‌ها است که به‌صورت سری یا موازی به شبکه الکتریکی متصل می‌شوند تا توان راکتیو القایی را که توسط بارهای الکتریکی مانند موتورهای القایی و ترانسفورماتورها ایجاد می‌شود، جبران کنند. در سیستم‌های الکتریکی صنعتی، بسیاری از تجهیزات دارای خاصیت القایی هستند که باعث ایجاد اختلاف فاز بین ولتاژ و جریان و کاهش ضریب توان می‌شود. این امر منجر به افزایش جریان مصرفی، بالا رفتن تلفات انرژی و کاهش ظرفیت شبکه برق می‌شود. بانک‌های خازنی با تأمین توان راکتیو موردنیاز، جریان را اصلاح کرده و موجب بهبود ضریب توان، کاهش هزینه‌های برق و افزایش راندمان شبکه می‌شوند [۵۷].

برای استفاده بهینه از بانک‌های خازنی در صنایع، ابتدا باید میزان توان راکتیو موردنیاز شبکه مشخص شود. این کار با استفاده از آنالیز شبکه الکتریکی و اندازه‌گیری ضریب توان در نقاط مختلف انجام می‌شود. سپس، متناسب با مقدار

توان راکتیو مورد نیاز، یک بانک خازنی با ظرفیت مناسب انتخاب شده و در محل مناسبی از شبکه نصب می‌شود. این محل می‌تواند نزدیک به بارهای بزرگ، در تابلوهای برق اصلی یا در بخش‌هایی از شبکه باشد که بیشترین نیاز به اصلاح ضریب توان را دارند. نصب صحیح بانک‌های خازنی نه تنها باعث کاهش جریان عبوری از ترانسفورماتورها و کابل‌ها می‌شود، بلکه ولتاژ شبکه را تثبیت کرده و از اضافه بار جلوگیری می‌کند. [۵۷]



شکل شماره ۱۰: نمونه ای از تابلو برق بانک خازنی

یکی از نکات مهم در طراحی و نصب بانک‌های خازنی، توجه به تأثیرات هارمونیک در شبکه است. اگر در یک سیستم الکتریکی هارمونیک‌های بالایی وجود داشته باشد، استفاده از بانک خازنی می‌تواند منجر به تشدید هارمونیک شود که باعث افزایش اعوجاج شکل موج، کاهش کیفیت توان و حتی آسیب دیدن تجهیزات می‌شود. به همین دلیل، در شبکه‌هایی که دارای بارهای غیرخطی مانند درایوهای کنترل سرعت، منابع تغذیه سوئیچینگ و تجهیزات الکترونیک صنعتی هستند، استفاده از فیلترهای هارمونیک

در کنار بانک‌های خازنی توصیه می‌شود. این فیلترها می‌توانند از بروز تشدید جلوگیری کرده و کیفیت توان را در سطح مطلوبی نگه دارند. [۵۷]

در برخی از صنایع، نیاز به جبران سازی توان راکتیو متغیر و وابسته به بارهای لحظه‌ای است. در چنین شرایطی، استفاده از بانک‌های خازنی اتوماتیک (Automatic Capacitor Banks) راهکار مناسبی خواهد بود. این سیستم‌ها به وسیله کنترلرهای هوشمند، مقدار خازن مورد نیاز را بر اساس شرایط بار و تغییرات ضریب توان، به صورت لحظه‌ای تنظیم می‌کنند. این روش علاوه بر جلوگیری از جبران بیش از حد یا ناکافی، باعث افزایش بهره‌وری سیستم شده و نیاز به مداخله دستی را کاهش می‌دهد. [۵۷]

۴-۲. استفاده از کندانسورهای سنکرون

علاوه بر بانک‌های خازنی، استفاده از کندانسورهای سنکرون یکی دیگر از راهکارهای مدیریت ضریب توان است. کندانسور سنکرون در اصل یک ژنراتور سنکرون بدون بار مکانیکی است که با تنظیم مناسب جریان تحریک، می‌تواند توان راکتیو را جبران کند. این روش به ویژه در سیستم‌هایی که بارهای متغیر و ناپایدار دارند، مفید است. مزیت این سیستم در مقایسه با بانک‌های خازنی این است که برخلاف خازن‌ها، کندانسورهای سنکرون تحت تأثیر تغییرات فرکانس قرار نمی‌گیرند و قادر به تنظیم دقیق‌تر توان راکتیو هستند. با این حال، هزینه‌های بالاتر نصب و نگهداری، یکی از محدودیت‌های این روش محسوب می‌شود. [۵۸]

کندانسورهای سنکرون نوعی ماشین الکتریکی سنکرون هستند که برای جبران سازی توان راکتیو و بهبود ضریب توان در شبکه‌های الکتریکی استفاده می‌شوند. این تجهیزات در اصل همان ژنراتورهای سنکرون هستند که بدون هیچ بار مکانیکی کار می‌کنند و از طریق تنظیم جریان تحریک، توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تأمین می‌کنند. برخلاف بانک‌های خازنی که یک مقدار ثابت از توان راکتیو را جبران می‌کنند، کندانسورهای سنکرون قادرند به صورت پویا و متغیر توان راکتیو مورد نیاز شبکه را تنظیم کرده و به همین دلیل، در سیستم‌هایی که دارای بارهای ناپایدار یا متغیر هستند، عملکرد بهتری دارند. [۵۸]

یکی از مهم‌ترین مزایای کندانسورهای سنکرون این است که می‌توانند علاوه بر تولید توان راکتیو برای جبران بارهای القایی، در شرایطی که نیاز به جذب توان راکتیو باشد نیز عمل کنند. به عبارت دیگر، اگر شبکه دچار اضافه‌ولتاژ شود، این تجهیزات قادرند با جذب توان راکتیو، سطح ولتاژ را کنترل کرده و از نوسانات شدید جلوگیری کنند. این ویژگی، کندانسورهای سنکرون را به گزینه‌ای ایده‌آل برای استفاده در شبکه‌های انتقال و توزیع، صنایع سنگین و کارخانه‌هایی که بارهای دینامیکی و ناپایدار دارند تبدیل کرده است. [۵۸]

برای استفاده بهینه از کندانسورهای سنکرون در صنایع، ابتدا باید تحلیل دقیقی از پروفایل بار شبکه، میزان نوسانات توان راکتیو و نیازهای پایداری ولتاژ انجام شود. در سیستم‌هایی که تغییرات ناگهانی بار دارند، نصب کندانسورهای سنکرون در نقاط استراتژیک شبکه، مانند پست‌های توزیع، ورودی کارخانه‌ها و مراکز صنعتی بزرگ، می‌تواند به تثبیت ولتاژ و کاهش تلفات انرژی کمک کند. همچنین، این تجهیزات برای افزایش پایداری سیستم‌های متصل به منابع انرژی تجدیدپذیر مانند نیروگاه‌های بادی و خورشیدی، که نوسانات فرکانسی و ولتاژی دارند، کاربرد گسترده‌ای دارند. [۵۸]



شکل شماره ۱۱: نمونه‌ای از کندانسور سنکرون

نکته مهم در استفاده از کندانسورهای سنکرون، هزینه‌های اولیه و نیاز به نگهداری منظم است. این سیستم‌ها نسبت به بانک‌های خازنی، هزینه خرید، نصب و تعمیر و نگهداری بالاتری دارند. با این حال، در صنایعی که تغییرات شدید بار وجود دارد، مقرون به صرفه‌تر از بانک‌های خازنی هستند زیرا جبران‌سازی آن‌ها به صورت تطبیقی انجام می‌شود و باعث کاهش نیاز به خازن‌های اضافی یا سیستم‌های پیچیده‌تر برای کنترل ضریب توان می‌شوند. برای بهینه‌سازی عملکرد این تجهیزات،

استفاده از سیستم‌های کنترل هوشمند و اتصال آن‌ها به سیستم‌های مدیریت انرژی (EMS) توصیه می‌شود تا تنظیمات تحریک به صورت خودکار و متناسب با تغییرات بار شبکه انجام شود. [۵۸]

در نهایت، صنایع می‌توانند با ترکیب کندانسورهای سنکرون و بانک‌های خازنی، یک راهکار بهینه برای کاهش مصرف انرژی و بهبود پایداری شبکه اتخاذ کنند. در حالی که بانک‌های خازنی یک راه حل اقتصادی و ثابت برای اصلاح توان راکتیو ارائه می‌دهند، کندانسورهای سنکرون انعطاف‌پذیری و کنترل دقیق‌تری را برای مدیریت نوسانات بار فراهم می‌کنند. بنابراین، انتخاب بین این دو روش یا ترکیب آن‌ها، باید بر اساس نوع بار، میزان تغییرات توان راکتیو، هزینه‌های عملیاتی و نیازهای بهره‌برداری انجام شود تا بهترین نتیجه از نظر کاهش مصرف انرژی و بهینه‌سازی عملکرد سیستم الکتریکی حاصل شود.

۳-۴. استفاده از جبران ساز استاتیک توان راکتیو (SVC)

جبران ساز استاتیک توان راکتیو (SVC) به عنوان یکی از تجهیزات سیستم های انتقال و توزیع انعطاف پذیر AC (FACTS)، نقش مهمی در کاهش تلفات انرژی در شبکه های شعاعی دارد. مقاله "Review of Impacts of Static Var Compensator Allocation on Radial Distribution Networks" بیان می کند که SVC با تزریق توان راکتیو به گره های شبکه، تقاضای توان راکتیو را کاهش داده و پروفیل ولتاژ را بهبود می بخشد. این ویژگی برای صنایعی مانند فولاد که با بارهای سنگین مثل کوره های قوس الکتریکی مواجه هستند و اغلب افت ولتاژ و افزایش تلفات توان را تجربه می کنند، بسیار مناسب است. SVC با محدود کردن جریان حداکثری خطوط از طریق تزریق جریان شنت، تلفات توان کل را کاهش می دهد و پایداری شبکه را افزایش می دهد، که در محیط های صنعتی با مصرف انرژی بالا اهمیت زیادی دارد [۵۹، ۶۰].

در صنعت فولاد، SVC معمولاً نزدیک به بارهای سنگین نصب می شود تا افت ولتاژ را جبران کرده و توان راکتیو مورد نیاز را تأمین کند. SVC از خازن ها و راکتورهای شنت تشکیل شده که با سوئیچینگ تایریستوری کنترل می شوند و از مدل سوسپتانس ثابت برای طراحی استفاده می کند. این مدل بر اساس محدودیت های ولتاژ گره ها و افت ولتاژ مجاز تنظیم می شود، که در یک کارخانه فولاد می تواند از افت ولتاژ در نقاط دورتر جلوگیری کرده و عملکرد تجهیزات حساس به ولتاژ را بهبود دهد [۶۱].

نحوه استفاده از SVC در صنایع فولاد نیازمند تحلیل دقیق شبکه و مکان یابی بهینه است. مقاله پیشنهاد می کند که با استفاده از الگوریتم پس رو-پیش رو و در نظر گرفتن اهدافی مانند کمینه سازی تلفات توان و بهبود ولتاژ، بهترین مکان برای نصب SVC تعیین شود. در یک کارخانه فولاد، این مکان ممکن است نزدیک به کوره ها یا نقاط با افت ولتاژ بالا باشد. SVC باید با توجه به میزان افت ولتاژ (مثلاً ۲۰٪، ۴۰٪ یا ۶۰٪ طبق موارد مطالعه مقاله) طراحی شود تا ظرفیت VA آن با نیازهای سیستم هماهنگ باشد. این انعطاف پذیری، SVC را به ابزاری مؤثر برای کاهش تلفات انرژی در صنایع سنگین مانند فولاد تبدیل می کند، جایی که پایداری و بهره وری انرژی از اولویت های اصلی هستند [۶۲].



شکل شماره ۱۲: یک نمونه از سیستم SVC در کارخانه فولاد

۴-۴. استفاده از جبران‌ساز سنکرون استاتیکی (STATCOM)

جبران‌ساز سنکرون استاتیک (STATCOM) یکی از دستگاه‌های کلیدی در خانواده سیستم‌های انتقال انعطاف‌پذیر (FACTS) است که به کاهش تلفات انرژی و بهبود کیفیت توان در سیستم‌های قدرت کمک می‌کند. STATCOM با استفاده از روش کنترل مستقیم جریان، قادر به حذف هارمونیک‌ها و جبران توان راکتیو است که این امر منجر به کاهش تلفات انرژی می‌شود. در این روش، STATCOM با تنظیم ولتاژ خروجی خود نسبت به ولتاژ سیستم (بیشتر یا کمتر از ولتاژ سیستم)، توان راکتیو را تزریق یا جذب می‌کند و از این طریق جریان‌های اضافی ناشی از بارهای غیرخطی را کاهش می‌دهد. در صنایعی مانند فولاد، که بارهای غیرخطی مانند مبدل‌های قدرت و کوره‌های قوس الکتریکی باعث افزایش هارمونیک‌ها و کاهش ضریب توان می‌شوند، این کاهش جریان‌های هارمونیکی و بهبود ضریب توان به طور مستقیم تلفات انرژی را کاهش داده و کارایی سیستم را بالا می‌برد [۶۳].



شکل شماره ۱۳: یک نمونه از سیستم STATCOM در صنایع فولادی

مزیت اصلی این روش در صنعت فولاد، توانایی آن در پاسخگویی سریع و جبران همزمان هارمونیک‌ها و توان راکتیو است که به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش عمر تجهیزات منجر می‌شود. در این روش کنترل مستقیم جریان، اگرچه پیچیده‌تر از روش غیرمستقیم است، اما به دلیل دقت بالا و پاسخ سریع، برای محیط‌هایی با تغییرات بار سریع (مانند کوره‌های قوس الکتریکی در فولادسازی) مناسب‌تر است. در عمل، STATCOM می‌تواند هم ولتاژ را پایدار نگه دارد و هم از انتقال هارمونیک‌ها به شبکه

اصلی جلوگیری کند. این امر نه تنها تلفات انرژی را کاهش می‌دهد، بلکه از جریمه‌های مربوط به کیفیت توان پایین که توسط شرکت‌های برق اعمال می‌شود، جلوگیری می‌کند. این روش با بهبود ضریب توان و کاهش THD، راه حلی مؤثر برای کاهش انرژی تلف‌شده در سیستم‌های صنعتی ارائه می‌دهد [۶۴].

۴-۵. سیستم‌های اصلاح ضریب مبتنی بر اینترنت اشیا

یکی دیگر از رویکردهای نوین در مدیریت ضریب توان، استفاده از کنترل تطبیقی و سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) است. در این روش، داده‌های لحظه‌ای مربوط به ضریب توان و توان راکتیو از طریق حسگرها و تجهیزات پایش آنلاین جمع‌آوری شده و به کمک الگوریتم‌های هوشمند تحلیل می‌شود. سیستم کنترل با توجه به شرایط بار و نیاز شبکه، مقدار بهینه‌ای از جبران‌سازی توان راکتیو را تنظیم کرده و از اضافه‌بار یا جبران بیش از حد توان راکتیو جلوگیری می‌کند. استفاده از این فناوری در قالب شبکه‌های هوشمند می‌تواند نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی در صنایع ایفا کند.

ضریب توان یکی از عوامل کلیدی در بهره‌وری سیستم‌های الکتریکی صنعتی است که مستقیماً روی مصرف انرژی و هزینه‌های عملیاتی تأثیر می‌گذارد. در کارخانه‌ها و صنایع، بارهای القایی مثل موتورهای و ترانسفورماتورها اغلب ضریب توان را پایین می‌آورند، که نتیجه‌اش افزایش جریان، تلفات بیشتر در خطوط انتقال، و جریمه‌های اضافی از سوی شرکت‌های برق است. سیستم‌های مبتنی بر اینترنت اشیا (IoT) با امکان اندازه‌گیری لحظه‌ای، کنترل از راه



دور و تحلیل داده‌ها، ابزارهای عملی برای بهینه‌سازی ضریب توان و کاهش هزینه‌های انرژی فراهم می‌کنند. این روش‌ها به‌طور خاص در محیط‌های صنعتی که مصرف انرژی بالا است، کارایی زیادی دارند [۶۵].

شکل شماره ۱۴: نمونه ای از سیستم های IOT قرائت ضریب توان

۵-۴. سیستم روشنایی

سیستم‌های روشنایی در ساختمان‌های صنعتی، سوله‌ها و تأسیسات تولیدی سهم قابل‌توجهی از مصرف برق را به خود اختصاص می‌دهند. بهینه‌سازی این سیستم‌ها می‌تواند تأثیر مستقیمی بر کاهش هزینه‌های عملیاتی، افزایش بهره‌وری و بهبود پایداری زیست‌محیطی داشته باشد [۶۶].

در صنایع، نیاز به روشنایی گسترده در محیط‌های بزرگ و سقف‌های مرتفع، چالش‌های ویژه‌ای در مصرف انرژی ایجاد می‌کند. عواملی مانند نوع منبع نوری، طراحی روشنایی، توزیع مناسب نور، کنترل هوشمند و ادغام با سایر سیستم‌های صنعتی می‌توانند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف برق داشته باشند. علاوه بر این، استانداردهای جدید و الزامات بهره‌وری انرژی، صنایع را ملزم به استفاده از فناوری‌های نوین و روش‌های کارآمدتر در تأسیسات روشنایی کرده‌اند [۶۶].

با توجه به اهمیت بهینه‌سازی مصرف انرژی در روشنایی ساختمان‌های صنعتی، بررسی روش‌های نوین و کارآمد در این حوزه می‌تواند به کاهش مصرف برق، افزایش طول عمر تجهیزات و بهبود شرایط کاری کارکنان منجر شود. در ادامه، راهکارهای مختلف برای کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های روشنایی صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

۱-۵-۴. استفاده از نور طبیعی

استفاده از نور طبیعی یکی از مؤثرترین راهکارهای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های صنعتی و سوله‌ها است. بهره‌گیری از روشنایی روز به جای منابع مصنوعی نه تنها مصرف برق را کاهش می‌دهد، بلکه محیط کاری را نیز بهبود می‌بخشد. طراحی مناسب نورگیرها و پنجره‌ها، انتخاب مصالح بازتابنده و استفاده از فناوری‌های هوشمند می‌تواند تأثیر قابل‌توجهی در افزایش بهره‌وری سیستم‌های روشنایی داشته باشد.

یکی از روش‌های اصلی برای استفاده بهینه از نور طبیعی، طراحی مناسب پنجره‌ها و نورگیرهای سقفی است. در سوله‌های صنعتی، نورگیرهای سقفی می‌توانند میزان ورود نور خورشید را افزایش داده و نیاز به روشنایی مصنوعی را کاهش دهند. تحقیقات نشان داده‌اند که با طراحی صحیح این نورگیرها، می‌توان تا ۲۸٪ در مصرف انرژی صرفه‌جویی کرد. علاوه بر این، تنظیم جهت‌گیری ساختمان و پنجره‌ها بر اساس موقعیت جغرافیایی و مسیر حرکت خورشید می‌تواند میزان بهره‌گیری از نور طبیعی را به حداکثر برساند [۶۶].

علاوه بر طراحی مناسب ساختمان، استفاده از مصالح بازتابنده و رنگ‌های روشن در دیوارها و سقف‌ها نیز می‌تواند تأثیر بسزایی در افزایش روشنایی محیط داشته باشد. دیوارها و سقف‌هایی با رنگ‌های روشن باعث افزایش بازتاب نور و کاهش نیاز به منابع نوری اضافی می‌شوند. یک مطالعه نشان داده است که استفاده از مواد بازتابنده در سقف‌ها می‌تواند بهره‌وری نور طبیعی را تا ۲۰٪ افزایش دهد و در نتیجه مصرف انرژی را کاهش دهد. همچنین، استفاده از پوشش‌های شفاف و نیمه‌شفاف برای پنجره‌ها و نورگیرها می‌تواند تعادل مناسبی بین ورود نور و کنترل گرما ایجاد کند که در بهینه‌سازی مصرف انرژی بسیار مهم است [۶۶].

فناوری‌های نوین نیز نقش مهمی در بهبود بهره‌وری روشنایی روز دارند. سیستم‌های کنترل هوشمند می‌توانند میزان ورود نور طبیعی را بر اساس شرایط محیطی تنظیم کنند. به عنوان مثال، حسگرهای شدت نور می‌توانند میزان نور ورودی را اندازه‌گیری کرده و در صورت کافی بودن نور طبیعی، سیستم‌های روشنایی مصنوعی را خاموش یا کم‌نور کنند. چنین سیستم‌هایی در ساختمان‌های صنعتی و سوله‌ها می‌توانند مصرف انرژی را تا ۳۰٪ کاهش دهند. همچنین، در برخی صنایع، ترکیب نور طبیعی با سیستم‌های روشنایی LED که قابلیت تنظیم شدت نور دارند، می‌تواند به ایجاد تعادل در روشنایی محیط کمک کند و بازدهی انرژی را بهبود بخشد [۶۶].

در نهایت، استفاده از نور طبیعی نه تنها موجب کاهش مصرف انرژی می‌شود، بلکه مزایای دیگری نیز به همراه دارد. تحقیقات نشان داده‌اند که قرارگیری در معرض نور طبیعی می‌تواند بهبود بهره‌وری کارکنان، کاهش خستگی و افزایش تمرکز را به دنبال داشته باشد. این امر به ویژه در محیط‌های صنعتی که نیاز به دقت بالا دارند، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند. با این حال، برای دستیابی به حداکثر بهره‌وری از روشنایی روز، طراحی صحیح، انتخاب مصالح مناسب و استفاده از فناوری‌های کنترل هوشمند ضروری است [۶۶].



شکل شماره ۱۵: نمونه‌هایی از استفاده از روشنایی روز در ساختمان‌ها و سوله‌های صنعتی

۴-۵-۲. بهره‌گیری از روشنایی مبتنی بر حضور افراد

استفاده از سیستم‌های روشنایی مبتنی بر حضور افراد یکی از روش‌های مؤثر برای کاهش مصرف انرژی در ساختمان‌های صنعتی و سوله‌ها است. در این سیستم‌ها، حسگرهای هوشمند حضور افراد را تشخیص داده و روشنایی را تنها در مواقع مورد نیاز فعال یا تنظیم می‌کنند. این روش باعث کاهش مصرف برق در زمان‌های عدم نیاز به روشنایی شده و در عین حال، سطح مناسب روشنایی را برای محیط‌های کاری صنعتی فراهم می‌کند.

یکی از مهم‌ترین فناوری‌های مورد استفاده در این سیستم‌ها، حسگرهای حرکتی و نوری است که با تشخیص حرکت کارکنان یا سطح روشنایی محیط، چراغ‌ها را روشن یا خاموش می‌کنند. تحقیقات نشان داده‌اند که استفاده از حسگرهای حرکتی در محیط‌های صنعتی می‌تواند مصرف انرژی را تا ۳۰٪ کاهش دهد. این حسگرها معمولاً در نقاطی مانند راهروها، انبارها، سالن‌های تولید و مناطقی که کارکنان به‌طور مداوم حضور ندارند، نصب می‌شوند. در برخی موارد، حسگرهای ترکیبی که قادر به تشخیص صدا، گرما و حرکت هستند، عملکرد بهتری داشته و باعث صرفه‌جویی بیشتری در انرژی می‌شوند. [۶۶]



علاوه بر حسگرهای حرکتی، استفاده از سیستم‌های کنترل مبتنی بر شدت نور محیط نیز نقش مهمی در بهینه‌سازی مصرف روشنایی دارد. این سیستم‌ها میزان نور طبیعی را اندازه‌گیری کرده و در صورت کافی بودن آن، شدت روشنایی مصنوعی را کاهش می‌دهند یا به‌طور کامل خاموش می‌کنند. برای مثال، در سوله‌های صنعتی که نور طبیعی از طریق پنجره‌ها یا نورگیرهای سقفی تأمین می‌شود، سیستم‌های کنترل نور می‌توانند با تنظیم میزان روشنایی چراغ‌ها، از اتلاف انرژی جلوگیری کنند. مطالعات انجام‌شده نشان داده‌اند که ترکیب این سیستم‌ها با حسگرهای حرکتی می‌تواند کاهش مصرف انرژی تا ۵۰٪ را در برخی صنایع به همراه داشته باشد [۶۶].

علاوه بر کاهش مصرف انرژی، سیستم‌های روشنایی مبتنی بر حضور افراد می‌توانند تأثیر مثبتی بر بهره‌وری و ایمنی محیط‌های صنعتی داشته باشند. خاموش شدن خودکار چراغ‌ها در مناطق غیرضروری باعث کاهش بار گرمایی ناشی از روشنایی و در نتیجه کاهش نیاز به تهویه مطبوع می‌شود که این امر به کاهش مصرف کلی انرژی در تأسیسات صنعتی کمک می‌کند. همچنین، این سیستم‌ها می‌توانند با تنظیم شدت نور بر اساس ساعات کاری و میزان فعالیت کارکنان، خستگی چشمی را کاهش داده و محیط کاری راحت‌تری را فراهم کنند.

با پیشرفت فناوری، سیستم‌های مدیریت روشنایی مبتنی بر حضور افراد به‌طور فزاینده‌ای با اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی (AI) ترکیب شده‌اند. این سیستم‌ها داده‌های حسگرهای مختلف را پردازش کرده و الگوهای رفتاری کارکنان را تحلیل می‌کنند تا بهینه‌ترین راهکار برای روشنایی محیط ارائه شود. برخی از این سیستم‌ها می‌توانند به‌مرور زمان میزان روشنایی موردنیاز را یاد گرفته و به‌طور خودکار تنظیمات خود را بهینه کنند. چنین راهکارهایی در محیط‌های صنعتی می‌توانند مصرف انرژی را به حداقل برسانند و بهره‌وری انرژی را بهبود بخشند.

۳-۵-۴. ارتقای تجهیزات روشنایی و استفاده از فناوری‌های جدید

استفاده از تجهیزات روشنایی پیشرفته و فناوری‌های نوین یکی از مؤثرترین راهکارها برای کاهش مصرف انرژی در محیط‌های صنعتی، سوله‌ها و ساختمان‌های تولیدی است. پیشرفت‌های اخیر در زمینه منابع نوری، سیستم‌های کنترلی و مدیریت هوشمند انرژی موجب شده است که صنایع بتوانند با بهینه‌سازی سیستم‌های روشنایی، علاوه بر کاهش مصرف برق، طول عمر تجهیزات را افزایش داده و هزینه‌های عملیاتی را کاهش دهند.

یکی از مهم‌ترین فناوری‌های جدید در این حوزه، استفاده از لامپ‌های LED به‌عنوان جایگزین منابع نوری قدیمی مانند لامپ‌های فلورسنت و بخار سدیم است. LEDها به دلیل بازدهی بالا، مصرف انرژی کمتر و عمر طولانی‌تر، در بسیاری از صنایع به‌عنوان استاندارد روشنایی پذیرفته شده‌اند. مطالعات نشان داده‌اند که جایگزینی لامپ‌های سنتی با LED می‌تواند میزان مصرف انرژی را تا ۶۰٪ کاهش دهد و درعین حال، کیفیت روشنایی را بهبود بخشد. علاوه بر این، LEDها گرمای کمتری نسبت به لامپ‌های سنتی تولید می‌کنند که این امر باعث کاهش نیاز به سیستم‌های خنک‌کننده و تهویه مطبوع در محیط‌های صنعتی می‌شود. [۶۶]

علاوه بر استفاده از منابع نوری کارآمدتر، ارتقای بالاست‌های الکترونیکی نیز نقش مهمی در افزایش بهره‌وری انرژی دارد. در سیستم‌های روشنایی فلورسنت قدیمی، بالاست‌های مغناطیسی موجب اتلاف انرژی قابل توجهی می‌شوند. اما جایگزینی آن‌ها با بالاست‌های الکترونیکی می‌تواند بازدهی لامپ‌ها را افزایش داده و مصرف انرژی را کاهش دهد. تحقیقات نشان داده‌اند که این تغییر می‌تواند تا ۳۰٪ در کاهش مصرف برق مؤثر باشد و همچنین نوسانات نور و نویزهای الکترومغناطیسی را کاهش دهد که موجب بهبود کیفیت روشنایی در محیط‌های صنعتی می‌شود [۶۶].



سیستم‌های کنترل هوشمند روشنایی یکی دیگر از فناوری‌های جدید در بهینه‌سازی مصرف انرژی است. این سیستم‌ها شامل کنترل‌کننده‌های بی‌سیم، حسگرهای نور و حرکت، و نرم‌افزارهای مدیریت و زمان بندی انرژی هستند که امکان تنظیم خودکار شدت روشنایی بر اساس نیاز محیط را فراهم می‌کنند. برای مثال، حسگرهای نوری می‌توانند میزان نور طبیعی را اندازه‌گیری کرده و در صورت کافی بودن نور محیط، شدت روشنایی مصنوعی را کاهش دهند یا چراغ‌ها را خاموش کنند. استفاده از این سیستم‌ها در محیط‌های صنعتی و سوله‌ها نشان داده است که می‌توان تا ۴۰٪ در مصرف برق صرفه‌جویی کرد [۶۶].

فناوری‌های مرتبط با اینترنت اشیا (IoT) و هوش مصنوعی نیز به‌طور فزاینده‌ای در بهینه‌سازی سیستم‌های روشنایی صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم‌های روشنایی متصل به شبکه هوشمند می‌توانند الگوهای مصرف انرژی را تحلیل کرده و روشنایی را به‌صورت پویا و بر اساس نیاز واقعی محیط تنظیم کنند. برخی از این سیستم‌ها دارای قابلیت یادگیری ماشینی هستند و می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های حسگرها، مصرف انرژی را در طول زمان بهینه‌سازی کنند. این فناوری‌ها در ساختمان‌های صنعتی پیشرفته به‌طور گسترده‌ای استفاده می‌شوند و موجب افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی می‌گردند.

در نهایت، ارتقای تجهیزات روشنایی و بهره‌گیری از فناوری‌های جدید نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی در صنایع می‌شود، بلکه موجب کاهش هزینه‌های تعمیر و نگهداری، افزایش عمر مفید تجهیزات و بهبود شرایط کاری کارکنان نیز خواهد شد. با توجه به پیشرفت‌های سریع در این حوزه، استفاده از فناوری‌های نوین روشنایی به‌عنوان یکی از راهکارهای اصلی مدیریت انرژی در صنایع مدرن محسوب می‌شود.

۴-۵-۴. بهینه‌سازی طراحی روشنایی در فضاهای صنعتی

طراحی مناسب روشنایی در فضاهای صنعتی و سوله‌ها نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی و بهبود کارایی سیستم‌های روشنایی ایفا می‌کند. با توجه به اینکه این محیط‌ها معمولاً دارای مساحت‌های بزرگ، ارتفاع سقف زیاد و نیاز به نورپردازی گسترده هستند، انتخاب یک طراحی بهینه می‌تواند تأثیر بسزایی در کاهش مصرف برق و افزایش بهره‌وری داشته باشد. برای این منظور، عوامل مختلفی مانند چیدمان صحیح منابع نوری، استفاده از بازتابنده‌ها، بهینه‌سازی ارتفاع نصب چراغ‌ها و ترکیب نور طبیعی با نور مصنوعی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

یکی از اصول کلیدی در طراحی بهینه روشنایی صنعتی، چیدمان مناسب چراغ‌ها است. در بسیاری از سوله‌های صنعتی، نصب نامناسب چراغ‌ها منجر به توزیع غیر یکنواخت نور، ایجاد نقاط تاریک و در نتیجه افزایش مصرف انرژی می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که استفاده از چیدمان بهینه که در آن چراغ‌ها به‌صورت منظم و متناسب با نوع فعالیت صنعتی قرار می‌گیرند، می‌تواند باعث کاهش ۱۵ تا ۲۰ درصدی مصرف برق شود. علاوه بر این، بهره‌گیری از چراغ‌هایی با قابلیت تنظیم زاویه تابش نیز می‌تواند به افزایش بهره‌وری سیستم روشنایی کمک کند [۶۶].

استفاده از بازتابنده‌های مناسب و سطوح با رنگ روشن نیز یکی از راهکارهای مؤثر در بهینه‌سازی طراحی روشنایی صنعتی محسوب می‌شود. بازتابنده‌ها می‌توانند میزان انتشار نور را افزایش داده و از هدررفت آن جلوگیری کنند. به‌عنوان مثال، در برخی سوله‌ها با استفاده از پوشش‌های بازتابنده در سقف و دیوارها، میزان روشنایی تا ۲۵٪ افزایش یافته و نیاز به منابع نوری اضافی کاهش یافته است. همچنین، استفاده از رنگ‌های روشن در دیوارها و کف سالن‌های صنعتی باعث افزایش انعکاس نور شده و در نتیجه مصرف انرژی برای دستیابی به سطح مطلوب روشنایی کاهش می‌یابد. [۶۶]



عامل دیگری که در بهینه‌سازی طراحی روشنایی صنعتی تأثیر دارد، ارتفاع و زاویه نصب چراغ‌ها است. در بسیاری از تأسیسات صنعتی، چراغ‌ها در ارتفاع‌های نامناسب نصب شده‌اند که باعث کاهش بازدهی نورپردازی و افزایش مصرف انرژی می‌شود. تحقیقات نشان داده‌اند که تنظیم بهینه ارتفاع چراغ‌ها و استفاده از لنزهای متمرکزکننده نور می‌تواند مصرف برق را تا ۳۰٪ کاهش دهد. در سوله‌هایی که دارای سقف‌های بسیار بلند هستند، استفاده از چراغ‌های صنعتی با شدت نور بالا و بازتاب مناسب می‌تواند به کاهش تعداد چراغ‌های مورد نیاز و در نتیجه کاهش مصرف انرژی کمک کند [۶۶].

۴-۶. جمع بندی و نتیجه گیری

۴-۶-۱. صنایع فولاد

زنجیره تولید فولاد را می‌توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد: معدن و استخراج سنگ آهن که شامل استخراج سنگ آهن از معادن و حمل آن به واحدهای فرآوری است، فرآوری که در آن سنگ آهن خرد، تغلیظ و به شکل گندله یا کنسانتره آماده می‌شود، فولادسازی که طی آن مواد اولیه در روش‌هایی مانند احیای مستقیم و کوره‌های القایی به آهن اسفنجی یا فولاد مذاب تبدیل می‌شوند، و در نهایت نورد که در آن فولاد مذاب یا شمش تولید شده در فرآیندهای نورد گرم و سرد به محصولات نهایی مانند میلگرد، تیرآهن و ورق فولادی تبدیل می‌شود. گلوگاه‌های مصرف انرژی در هر یک از این قسمت‌های متفاوت بوده اما به طور کلی یک سری از مصرف‌ها به صورت مشترک در قسمت‌های متفاوت از این صنایع مشترک بوده که می‌توان با استفاده از راه کارهای ارائه شده درصد قابل توجهی بهینه سازی انرژی در آن موارد ایجاد کرد. به عنوان مثال سیستم‌های هوای فشرده و راهکارهای مربوط به کاهش مصرف انرژی در سیستم‌های هوای فشرده، استفاده از انواع الکتروموتورها و راه کارهای مرتبط با بهینه سازی انرژی در آن سیستم‌ها، استفاده از روش‌های اصلاح ضریب توان در کارخانه‌های فولاد به خصوص کارگاه‌های مجهز به کوره‌های القایی می‌تواند گام‌های اولیه‌ی مناسبی در کاهش مصرف انرژی در این صنایع با هزینه‌ی کم و بازدهی نسبتاً مناسب تلقی گردد.

برای صنایع فولادی پیشنهاد می‌گردد که در قالب یک طرح مستقل و با در نظر گرفتن امکان تغییر ساختارهای اساسی تجهیزات صنایع فولادی استان و کشور مباحث مرتبط با بهینه سازی مصرف انرژی به صورت تخصصی بررسی شود، و جدیدترین روش‌های بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع فولادی به صورت تخصصی استخراج و به عنوان سند توسعه فولاد در استان و کشور مطرح شود. در این راستا مرجع زیر به عنوان یکی از به روزترین مراجع این بحث معرفی می‌گردد. این کتاب یک راهنمای جامع درباره جدیدترین فناوری‌های پاک در صنعت فولادسازی است. این کتاب که توسط U.S. Department of Energy و دیگر نهادهای تخصصی تدوین شده، بر کاهش مصرف انرژی، کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و بهبود بهره‌وری فرآیندهای تولید فولاد تمرکز دارد.



The State-of-the-Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook (2nd Edition)

Raw materials through Steelmaking, including Recycling Technologies, Common Systems, and General Energy Saving Measures

Asia Pacific Partnership for Clean Development and Climate

December 2010

در این کتاب، روش‌های مدرن و پایدار برای تولید فولاد، شامل فناوری‌های بهینه‌سازی در احیای مستقیم، کوره‌های قوس الکتریکی، بهینه‌سازی مصرف گاز طبیعی، بازیافت حرارت و کاهش انتشار کربن بررسی شده است. همچنین، مطالعات موردی و تحلیل عملکرد فناوری‌های نوین در صنایع مختلف فولاد ارائه شده تا تولیدکنندگان بتوانند بهترین راهکارهای بهینه‌سازی را انتخاب کنند.

این راهنما یک منبع ارزشمند برای مهندسان فولاد، محققان، مدیران صنعتی و سیاست‌گذاران محسوب می‌شود که به دنبال ارتقای بهره‌وری انرژی، کاهش هزینه‌های تولید و سازگاری بیشتر با محیط زیست هستند.

The State of the Art Clean Technologies (SOACT) for Steelmaking Handbook

۴-۶-۲. صنایع کاشی و سرامیک

زنجیره تولید کاشی و سرامیک را نیز می توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد: استخراج و تأمین مواد اولیه که شامل استخراج خاک های صنعتی مانند کائولن و فلدسپات از معادن و حمل آن ها به واحدهای فرآوری است، فرآوری مواد اولیه که در آن مواد خام خرد، آسیاب و به صورت دوغاب یا پودر آماده سازی می شوند، شکل دهی و پخت که طی آن مواد اولیه با استفاده از روش هایی مانند پرس به شکل کاشی و سرامیک در می آیند و سپس در کوره های پخت در دماهای بالا فرآوری می شوند، و در نهایت لعاب زنی و پرداخت نهایی که در آن محصولات سرامیکی لعاب دار شده و پس از پخت نهایی، بسته بندی و آماده عرضه به بازار می شوند.

مصرف انرژی در هر یک از مراحل تولید کاشی و سرامیک متفاوت است، اما برخی از منابع مصرف انرژی در این صنعت مشترک بوده و می توان با اجرای راهکارهای بهینه سازی، کاهش چشمگیری در مصرف انرژی ایجاد کرد. به عنوان نمونه، بهینه سازی سیستم های هوای فشرده، الکتروموتورها و پیاده سازی روش های کاهش تلفات انرژی در این تجهیزات از جمله اقداماتی است که تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه های انرژی دارد. علاوه بر این، اصلاح ضریب توان در کارخانه های کاشی و سرامیک به دلیل وجود تعداد زیادی از موتورهای القایی و بارهای سلفی، یکی از راهکارهای کلیدی در بهینه سازی مصرف برق و افزایش بهره وری سیستم های الکتریکی محسوب می شود. به جز این موارد لیست روش های تخصصی تر برای این صنعت نیز پیشنهاد می شود که بررسی دقیق این موارد در صنعت کاشی و سرامیک منوط به طرح یک پژوهش مختص این صنعت می باشد. روش های پیشنهادی برای این صنعت به صورت زیر می باشد [۶۷].

۱. استفاده از فن دمنده به جای هوای فشرده در خطوط کاشی و لعاب.
۲. استفاده از ظرفیت بهینه تجهیزات، از جمله بالمیل های تهیه بدنه، اسپری درایر و سنگ شکن ها.
۳. مدیریت پیک بار در تجهیزاتی نظیر بالمیل های بدنه ناپیوسته و سنگ شکن ها.
۴. استفاده از خروجی خنک کاری کوره ها برای گرمایش سالن تولید.
۵. استفاده از خروجی خنک کاری کوره ها برای پیش گرم کردن هوای احتراق مشعل های کوره.
۶. استفاده از خروجی خنک کاری کوره ها برای تغذیه هوای ورودی به اسپری درایر.

۴-۶-۳. صنایع پتروشیمی

صنعت پتروشیمی یکی از صنایع بزرگ و انرژی بر است که نقش مهمی در تولید مواد اولیه مورد نیاز بسیاری از صنایع دیگر دارد. زنجیره تولید محصولات پتروشیمی را می توان به چهار مرحله اصلی تقسیم کرد:

۱. تأمین و استخراج مواد اولیه که شامل استخراج نفت خام و گاز طبیعی از میادین نفتی و گازی و انتقال آن ها به واحدهای پتروشیمی برای فرآوری است.
۲. فرآوری و پالایش اولیه که در آن نفت و گاز به اجزای مختلفی مانند اتان، پروپان، بوتان و نفتا تجزیه می شوند و این ترکیبات به عنوان خوراک واحدهای پتروشیمی مورد استفاده قرار می گیرند.
۳. فرآیندهای شیمیایی و تولید محصولات میانی که طی آن خوراک های پتروشیمیایی در واحدهایی مانند کراکرها، بخار، ریفورمرهای بخار و فرآیندهای پلیمریزاسیون به محصولات میانی مانند اتیلن، پروپیلن، بنزن، آمونیاک و متانول تبدیل می شوند.

۴. تولید محصولات نهایی و بسته‌بندی که در آن محصولات میانی به مواد شیمیایی نهایی مانند پلیمرها، کودهای شیمیایی، حلال‌ها و سایر مواد پتروشیمیایی تبدیل شده و سپس برای عرضه به بازار بسته‌بندی و آماده ارسال می‌شوند. مصرف انرژی در مراحل مختلف تولید پتروشیمی متفاوت است، اما برخی از منابع مصرف انرژی در این صنعت مشترک بوده و می‌توان با اجرای راهکارهای بهینه‌سازی، کاهش چشمگیری در مصرف انرژی ایجاد کرد. به عنوان نمونه، بهینه‌سازی عملکرد بویلرها طبق روش‌های شرح داده شده، افزایش راندمان کمپرسورها و الکترومپ‌ها با استفاده از روش‌هایی مانند سیستم‌های کنترل سرعت و سایر روش‌های شرح داده شده از جمله اقداماتی هستند که تأثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های انرژی دارند. علاوه بر این، اصلاح ضریب توان در کارخانه‌های پتروشیمی به دلیل وجود تعداد زیادی از تجهیزات الکتریکی و کمپرسورهای بزرگ، یکی از راهکارهای کلیدی در بهینه‌سازی مصرف برق و افزایش بهره‌وری سیستم‌های الکتریکی محسوب می‌شود.

۴-۶-۴. سایر صنایع استان مانند صنایع نساجی، لاستیک، سیمان، کاغذ و کارتن سازی و صنایع غذایی

هر یک از صنایع به دلیل ماهیت فرآیندهای تولیدی و تجهیزات مورداستفاده، ویژگی‌ها و چالش‌های خاص خود را در مصرف انرژی دارند. به همین دلیل، هر صنعت نیازمند بررسی و پژوهش تخصصی برای شناسایی و اجرای راهکارهای بهینه‌سازی مصرف انرژی است. با این حال، بسیاری از روش‌های کاهش مصرف انرژی که در یک صنعت موفق بوده‌اند، در سایر صنایع نیز قابل اجرا هستند، البته با در نظر گرفتن شرایط و نیازهای خاص هر صنعت.

به عنوان مثال، در صنایع نساجی، بهینه‌سازی سیستم‌های هوای فشرده و الکتروموتورها که در ریسندگی و بافندگی مورداستفاده قرار می‌گیرند، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش مصرف انرژی داشته باشد. در صنایع سیمان، استفاده از مبدل‌های حرارتی برای بازیافت انرژی از گازهای خروجی کوره‌های سیمان مشابه فرآیندهای بازیافت حرارت در صنایع پتروشیمی یا کاشی و سرامیک است. صنایع غذایی نیز می‌توانند از بهینه‌سازی سیستم‌های برودتی و تهویه و اصلاح ضریب توان تجهیزات الکتریکی بهره ببرند، همان‌طور که این روش‌ها در صنایع لاستیک و کاغذسازی نیز قابل پیاده‌سازی هستند.

بنابراین، اگرچه هر صنعت نیازمند بررسی‌های تخصصی برای تدوین یک راهبرد بهینه‌سازی متناسب با ویژگی‌های خود است، اما بسیاری از راهکارهای کاهش مصرف انرژی ذکر شده در فصل چهار مانند مدیریت مصرف الکتروموتورها، بهینه‌سازی سیستم‌های گرمایشی و بویلرها، بهبود عملکرد تجهیزات هوای فشرده و پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی، در اکثر صنایع قابلیت اجرا و بهره‌وری دارند.

۵. منابع

۱. اسلامی، م. پ. ه. م. ش.، پایش شاخصهای کلان بخش برق ۲۳ شش ماهه اول سال، د. م. ا. ی. ص. و. معدن، Editor، ۱۴۰۳.
۲. اسلامی، م. پ. ه. م. ش.، بررسی الگو و پتانسیل صرفه جویی در صنایع منتخب و انرژی بر کشور، د. م. ا. ص. و. معدن، Editor، ۱۳۸۸.
3. Palm, J. and P. Thollander, An interdisciplinary perspective on industrial energy efficiency. *Applied Energy*, 2010. 87(10): p. 3255-3261.
۴. خارجه، م. د. ا. و.، بهبود سازی مصرف انرژی در آلمان. ۱۴۰۰؛ <https://economic.mfa.ir/portal/>؛ ۶۳۷۷۳۸/newsview
5. Strategie, N.D., Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi). 2015, Öffentlichkeitsarbeit.
۶. نادری، م. پ. ج. ح.، بررسی بازارهای در حال توسعه شرکت های خدمات انرژی (اسکو) و ارائه راهکارهایی جهت توسعه پروژه های کارایی انرژی در ایران. نشریه علمی انرژی های تجدید پذیر و نو، آذر ۱۳۹۷. دوره ۵، شماره پیاپی ۱۰ p. ۲۳-۳۸.
7. Eccleston, C.H., F. March, and T. Cohen, Inside energy: Developing and managing an ISO 50001 energy management system. 2011: CRC Press.
8. Ahrens, K., An Energy Policy for Europe. *Annals of Public and Cooperative Economics*, 1974. 45(3-4): p. 447-457.
9. Commission, E., A European Strategic Energy Technology Plan (Set-Plan): Towards a low carbon future. Brussels: Commission of the European Communities, 2007.
10. Kanellakis, M., G. Martinopoulos, and T. Zachariadis, European energy policy—A review. *Energy Policy*, 2013. 62: p. 1020-1030.
11. Bundgaard, A.M., M.A. Mosgaard, and A. Remmen, From energy efficiency towards resource efficiency within the Ecodesign Directive. *Journal of cleaner production*, 2017. 144: p. 358-374.
12. JAP, A., New Energy and Industrial Technology Development Organization (NEDO). 1998.
13. Aayog, N., Draft national energy policy. Niti Aayog, 2017.
14. Efficiency, N.A.P.f.E., Vision for 2025: A framework for change. 2008, US Environmental Protection Agency Washington, DC.
15. Council, N.R., et al., Decreasing Energy Intensity in Manufacturing: Assessing the Strategies and Future Directions of the Industrial Technologies Program. 2005: National Academies Press.
16. Almaguer, J., et al., Superior Energy Performance: A Roadmap for Achieving Continual Energy Performance Improvement.





۱۷. م.ن.ن.ع.ر.، کمک مالی وزارت نیرو به صنایع جهت اجرای طرح های بهبود سازی مصرف انرژی، in پنجمین همایش ملی انرژی. ۱۳۸۴.

۱۸. مبحث ۱۹ مقررات ملی ساختمان ویرایش ۱۳۹۹. صرفه جویی در انرژی. ۱۳۹۹.

۱۹. شهرسازی، و.و.و.، دستورالعمل اجرایی مبحث ۱۹. ۱۴۰۲.

۲۰. بودجه، س.ب.و.، گزارش عملکرد اجرای مبحث ۱۹. ۱۴۰۱.

۲۱. ایران، س.م.ا.، سیستمهای مدیریت انرژی -

الزامات همراه با راهنمای استفاده. ۱۳۹۹.

۲۲. شاهین-جوادی، et al.، اظهار نظر کارشناسی درباره: «طرح جهش تولید دانش بنیان» (۲). مصوبات کمیسیون آموزش، تحقیقات و فناوری. ۲۰۲۰.

23. Von Hirschhausen, C., The German “Energiewende”—An Introduction. *Economics of Energy & Environmental Policy*, 2014. 3(2): p. 1-12.

24. Bonvillian, W.B. and R. Van Atta, ARPA-E and DARPA: Applying the DARPA model to energy innovation. *The Journal of Technology Transfer*, 2011. 36(5): p. 469-513.

25. Veugelers, R., et al., The impact of horizon 2020 on innovation in Europe. *Intereconomics*, 2015. 50(1): p. 4-30.

26. Donnelly, K.A., Energy Efficiency and Conservation Block Grant (EECBG): Better Buildings Neighborhood Program Final Report. 2014, CEFIA-CT Clean Energy Finance and Investment Authority.

27. Inoue, N. and S. Matsumoto, An examination of losses in energy savings after the Japanese Top Runner Program? *Energy Policy*, 2019. 124: p. 312-319.

28. Eyre, N., B. Flanagan, and K. Double, Engaging people in saving energy on a large scale: Lessons from the programmes of the Energy Saving Trust in the UK, in *Engaging the Public with Climate Change*. 2012, Routledge. p. 141-159.

29. Kimura, O., et al., A prototype tool for automatically generating energy-saving advice based on smart meter data. *Energy Efficiency*, 2018. 11: p. 1247-1264.

30. www.shana.ir. 1403; 31. <https://ostanyazd.ir/>, 1403.

32. www.irna.ir.

33. IEA, P., World energy outlook 2022. Paris, France: International Energy Agency (IEA), 2022.

34. Dindorf, R., Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering*, 2012. 39: p. 204-211.

35. in Energy Audit 2006 seminar Finland.



36. Marshall, R., Compressed Air System Leaks, Best Practices to Compressed Air. Compressed Air Challenge. US DOE, 2005. 169.
37. Dindorf, R., Energy savings opportunities in compressed air systems. Napedy i Sterowanie, 2010. 10.
38. Bhatia, A., Compressors and compressed air systems. Continuing Education and Development. NY, USA, 2009.
39. BERTOLDI, P. and M. ELLE, The european motor challenge programme. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2010.
40. Kaya, D., et al., Energy conservation in compressed-air systems. International journal of energy research, 2002. 26(9): p. 837-849.
41. Capehart, B.L., W.C. Turner, and W.J. Kennedy, Guide to energy management. 2003: The Fairmont Press, Inc.
42. Saidur, R., A review on electrical motors energy use and energy savings. Renewable and sustainable energy reviews, 2010. 14(3): p. 877-898.
43. Nadel, S. and N. Elliott, Overview of programmes to promote energy efficient motor systems in the United States, in Energy Efficiency Improvements in Electric Motors and Drives. 1997, Springer. p. 365-376.
44. Chalmers, B.J., Electric motor handbook. 2013: Elsevier.
45. Rowan, T.M. and T.A. Lipo, A quantitative analysis of induction motor performance improvement by SCR voltage control. IEEE transactions on industry applications, 1983(4): p. 545-553.
46. Kirschen, D.S., D.W. Novotny, and W. Suwanwisoot, Minimizing induction motor losses by excitation control in variable frequency drives. IEEE Transactions on Industry Applications, 1984(5): p. 1244-1250.
47. Hanitsch, R., Energy efficient electric motors. Energy, 2002. 645: p. 227.
48. Adkins, B. and R.G. Harley, The general theory of alternating current machines: application to practical problems. 2013: Springer.
49. Bhatia, A., Improving energy efficiency of boiler systems. Continuing education and development engineering, 2012: p. 1-55.
50. Mallikarjuna, V., N. Jashuva, and B. Reddy, Improving boiler efficiency by using air preheater. International journal of advanced research in engineering and applied sciences, 2014. 3(2): p. 11-24.
51. Kilicaslan, I. and E. Ozdemir, Energy economy with a variable speed drive in an oxygen trim controlled boiler house. J. Energy Resour. Technol., 2005. 127(1): p. 59-65.
52. Miller, J., An Advanced Oxygen Trim Control System. 1985.



- 53.Kose, A.B., et al., A review on methods of water softening processes for improving efficiency of bio-mass fired boiler. Materials Today: Proceedings, 2023.
- 54.Gilman, G.J. and J. Gilman, Boiler control systems engineering. 2010: Isa.
- 55.Hadjidemetriou, L. and E. Kyriakides. Accurate and efficient modelling of grid tied inverters for investigating their interaction with the power grid. in 2017 IEEE Manchester PowerTech. 2017. IEEE.
- 56.Coman, C.M., A. Florescu, and C.D. Oancea, Improving the efficiency and sustainability of power systems using distributed power factor correction methods. Sustainability, 2020. 12(8): p. 3134.
- 57.Islam, F., et al., Power quality improvement of distribution network using bess and capacitor bank. Journal of Modern Power Systems and Clean Energy, 2020. 9(3): p. 625-632.
- 58.Nedd, M., C. Booth, and K. Bell. Potential solutions to the challenges of low inertia power systems with a case study concerning synchronous condensers. in 2017 52nd International Universities Power Engineering Conference (UPEC). 2017. IEEE.
- 59.Chopade, P., et al. Reactive power management and voltage control of large Transmission System using SVC (Static VAR Compensator). in 2011 Proceedings of IEEE Southeastcon. 2011. IEEE.
- 60.Taylor, C.W., G. Scott, and A. Hammad, Static var compensator models for power flow and dynamic performance simulation. IEEE Transactions on Power Systems (Institute of Electrical and Electronics Engineers);(United States), 1994. 9(1).
- 61.Noroozian, M., et al. Benefits of SVC and STATCOM for electric utility application. in 2003 IEEE PES Transmission and Distribution Conference and Exposition (IEEE Cat. No. 03CH37495). 2003. IEEE.
- 62.Savir, J. and D. Das, Impact of network reconfiguration on loss allocation of radial distribution systems. IEEE Transactions on Power Delivery, 2007. 22(4): p. 2473-2480.
- 63.Padiyar, K.R., FACTS controllers in power transmission and distribution. 2007.
- 64.Kadu, A.D., et al. Application of STATCOM for harmonic mitigation and power factor improvement using direct current control technique. in 2017 Second International Conference on Electrical, Computer and Communication Technologies (ICECCT). 2017. IEEE.
- 65.Surya, I. and J. Kustija, Implementation of the electricity load monitoring trainer and internet of things-based power factor improvement. International journal of scientific and Research Publications, 2022. 12(11): p. 206-215.
- 66.Chew, I., et al., Smart lighting: The way forward? Reviewing the past to shape the future. Energy and Buildings, 2017. 149: p. 180-191.

۶۷. ویسری، م.ا.س. - ا.ر.ز. ا.د.ن.س.ف.، نقشه راه بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنعت کاشی و سرامیک کشور in نهمین کنفرانس بین‌المللی انرژی.