

نقش فناوری‌های نوین در افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای تولیدی

رضا زاهدی سعدآباد، کارشناسی ارشد مهندسی عمران سازه، دانشگاه غیر انتفاعی سراج تبریز

Reza_civil87@yahoo.com

چکیده

بهره‌وری انرژی یکی از عوامل کلیدی توسعه پایدار و افزایش رقابت پذیری واحدهای تولیدی است. با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی و محدودیت منابع، استفاده از فناوری‌های نوین به عنوان راهکاری موثر در بهبود کارایی مصرف انرژی اهمیت فزاینده یافته است. این پژوهش با هدف بررسی نقش فناوری‌های نوین در افزایش بهره‌وری انرژی در صنایع تولیدی انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که فناوری‌هایی مانند هوش مصنوعی، اینترنت اشیا، اتوماسیون و سیستم‌های مدیریت انرژی به طور قابل توجهی می‌توانند مصرف انرژی را کاهش داده و عملکرد تولید را بهینه سازند. علاوه بر این، این فناوری‌ها موجب بهبود کیفیت محصول، کاهش خطاهای انسانی و افزایش انعطاف پذیری فرآیندهای تولید می‌شوند. همچنین، تأثیر مثبت این فناوری‌ها بر کاهش آلاینده‌های زیست محیطی و کمک به تحقق اهداف توسعه پایدار مشهود است. با وجود مزایای فراوان، چالش‌هایی همچون هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری، کمبود نیروی متخصص و مقاومت سازمانی در مسیر پیاده‌سازی این فناوری‌ها وجود دارد که نیازمند برنامه‌ریزی دقیق و حمایت‌های سیاستی است. بنابراین، بهره‌گیری هدفمند از فناوری‌های نوین همراه با رفع موانع و بهبود زیرساخت‌ها می‌تواند منجر به افزایش چشمگیر بهره‌وری انرژی در واحدهای تولیدی و در نهایت توسعه پایدار صنعتی گردد.

کلیدواژه‌ها: بهره‌وری انرژی، فناوری‌های نوین، سیستم مدیریت انرژی، صنایع تولیدی، کاهش مصرف انرژی.

مقدمه

در دنیای معاصر، انرژی به عنوان یکی از پایه‌های اساسی توسعه اقتصادی، صنعتی و اجتماعی شناخته می‌شود و تامین پایدار و بهینه آن از اولویت‌های مهم دولت‌ها، صنایع و سازمان‌هاست. صنایع تولیدی به عنوان بزرگترین مصرف‌کنندگان انرژی در سطح جهان، نقش تعیین‌کننده‌ای در مصرف منابع انرژی و تأثیرگذاری بر محیط زیست ایفا می‌کنند. این بخش از اقتصاد با مصرف حجم وسیعی از انرژی، به ویژه انرژی‌های فسیلی، علاوه بر تحمیل هزینه‌های سنگین به واحدهای تولیدی، سهم قابل توجهی در آلودگی هوا، تغییرات اقلیمی و کاهش منابع طبیعی دارد (دی فوگیا،^۱ ۲۰۲۱). در این شرایط، بهره‌وری انرژی که به معنای افزایش کارایی استفاده از انرژی به منظور تولید کالاها و خدمات با کیفیت برابر یا بهتر است، به عنوان یک استراتژی کلیدی برای کاهش هزینه‌های انرژی، کاهش اثرات زیست محیطی و افزایش رقابت پذیری صنایع مطرح می‌شود. بهره‌وری انرژی نه تنها به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند بلکه به بهبود فرآیندهای تولید، افزایش کیفیت محصولات و حفظ منابع طبیعی برای نسل‌های آینده نیز یاری می‌رساند (لین و چن،^۲ ۲۰۱۸).

با توجه به رشد سریع فناوری‌های نوین و پیشرفت‌های شگرف در حوزه فناوری اطلاعات و ارتباطات، فرصت‌های جدیدی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع تولیدی فراهم شده است. فناوری‌های نوین مانند اینترنت

اشیا (IoT)، هوش مصنوعی (AI)، اتوماسیون صنعتی، سیستم‌های مدیریت انرژی پیشرفته و منابع انرژی تجدیدپذیر توانسته‌اند تحولاتی اساسی در نحوه استفاده از انرژی ایجاد کنند. این فناوری‌ها با امکان پایش لحظه‌ای و دقیق مصرف انرژی، تحلیل داده‌های حجیم، پیش‌بینی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولید، امکان اتخاذ تصمیمات هوشمند و کاهش هدررفت انرژی را فراهم می‌سازند (والترسمن^۳ و همکاران، ۲۰۲۱). علاوه بر این، فناوری‌های نوین زمینه استفاده گسترده‌تر از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را فراهم کرده و کمک می‌کنند تا واحدهای تولیدی با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، سهم خود را در حفاظت از محیط زیست ایفا کنند. این تحولات فناوری، علاوه بر افزایش بهره‌وری انرژی، مزیت‌های رقابتی برای صنایع ایجاد می‌کند و راه را برای تولید پایدار و اقتصاد سبز هموار می‌سازند (مینگ و همکاران، ۲۰۱۸).

با اینحال، بکارگیری فناوری‌های نوین در حوزه بهره‌وری انرژی با چالش‌ها و موانعی نیز همراه است که می‌تواند روند پذیرش و پیاده‌سازی این فناوری‌ها را پیچیده و زمانبر نماید. از جمله این موانع می‌توان به هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه برای خرید و نصب تجهیزات پیشرفته، کمبود نیروی متخصص و دانش فنی لازم، مقاومت سازمانی در برابر تغییرات و فرهنگ سنتی موجود در بسیاری از واحدهای تولیدی اشاره کرد. همچنین، نبود زیرساخت‌های فناورانه مناسب و محدودیت‌های مربوط به سیاست‌ها و حمایت‌های

^۴ Artificial Intelligence^۵ Waltersmann^۶ Meng^۱ Di Foggia^۲ Lin, B., & Chen^۳ Internet of Things

زیست محیطی است. این موضوع، به ویژه در عصر کنونی که منابع انرژی فسیلی محدود و هزینه بر هستند، و همچنین ضرورت کاهش گازهای گلخانه‌ای بیش از پیش احساس می‌شود، از اهمیت فوق‌العاده‌ای برخوردار است (کای^۳ و همکاران، ۲۰۱۹).

علاوه بر صرفه‌جویی اقتصادی، بهره‌وری انرژی به بهبود پایداری زیست محیطی نیز کمک می‌کند، زیرا با کاهش مصرف انرژی، میزان انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای کاهش می‌یابد و فشار کمتری بر منابع طبیعی وارد می‌شود. از این رو، بهره‌وری انرژی، نه تنها یک مسئله فنی و اقتصادی، بلکه یک هدف کلان زیست محیطی و اجتماعی محسوب می‌شود، که در راستای توسعه پایدار قرار دارد. برای دستیابی به بهره‌وری انرژی بالا، لازم است که فناوری‌های نوین و سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی به کار گرفته شوند؛ به عنوان مثال، استفاده از حسگرها و سیستم‌های کنترل خودکار می‌تواند به بهینه‌سازی مصرف انرژی در زمان واقعی کمک کند، یا بهبود فرآیندهای تولید و جایگزینی تجهیزات قدیمی با نمونه‌های کم‌مصرف تر می‌تواند به کاهش مصرف انرژی منجر شود (جیباکات^۴ و همکاران، ۲۰۲۱). در نهایت، بهره‌وری انرژی یک فرآیند مستمر است، که نیازمند ارزیابی، بازنگری و بهبود دائمی است، تا بتواند پاسخگوی نیازهای متغیر تولید و بازار باشد و همزمان تأثیرات محیطی را کاهش دهد (لین و چن، ۲۰۱۸).

دولتی، نقش مهمی در کندی فرآیند توسعه و گسترش فناوری‌های نوین ایفا می‌کنند. شناخت این موانع و بررسی راهکارهای مقابله با آنها از جمله موضوعات حیاتی برای تحقق اهداف بهره‌وری انرژی در صنایع است که نیازمند همکاری و هم‌افزایی بین بخش‌های مختلف دولتی، خصوصی و پژوهشی می‌باشد. از اینرو، مطالعه و پژوهش در حوزه نقش فناوری‌های نوین در افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای تولیدی از اهمیت بسزایی برخوردار است.

بهره‌وری انرژی

بهره‌وری انرژی، به معنای استفاده بهینه و موثر از انرژی برای انجام یک فعالیت مشخص است، به گونه‌ای که کمترین میزان انرژی مصرف شود، در حالیکه خروجی یا نتیجه نهایی حفظ یا افزایش یابد. این مفهوم، نه تنها به کاهش مصرف انرژی خام اشاره دارد، بلکه به بهبود کارایی کل سیستم‌های انرژی نیز توجه می‌کند (ایریس و لام^۱، ۲۰۱۹). بهره‌وری انرژی، به معنای افزایش نسبت خروجی مفید به ورودی انرژی است، به این ترتیب که با استفاده از فناوری‌ها، فرایندها و مدیریت هوشمندانه، بتوان انرژی مصرفی را کاهش داد و در عین حال کیفیت و کمیت تولید یا خدمات ارائه شده را حفظ کرد یا بهبود بخشید (زاکاری^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). در سطح واحدهای تولیدی، بهره‌وری انرژی، به معنای کاهش هدررفت انرژی در فرآیندهای مختلف تولید، بهینه‌سازی عملکرد تجهیزات و افزایش بازده ماشین‌آلات است، که نتیجه آن صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش تأثیرات منفی

اهمیت بهره‌وری انرژی در صنایع تولیدی

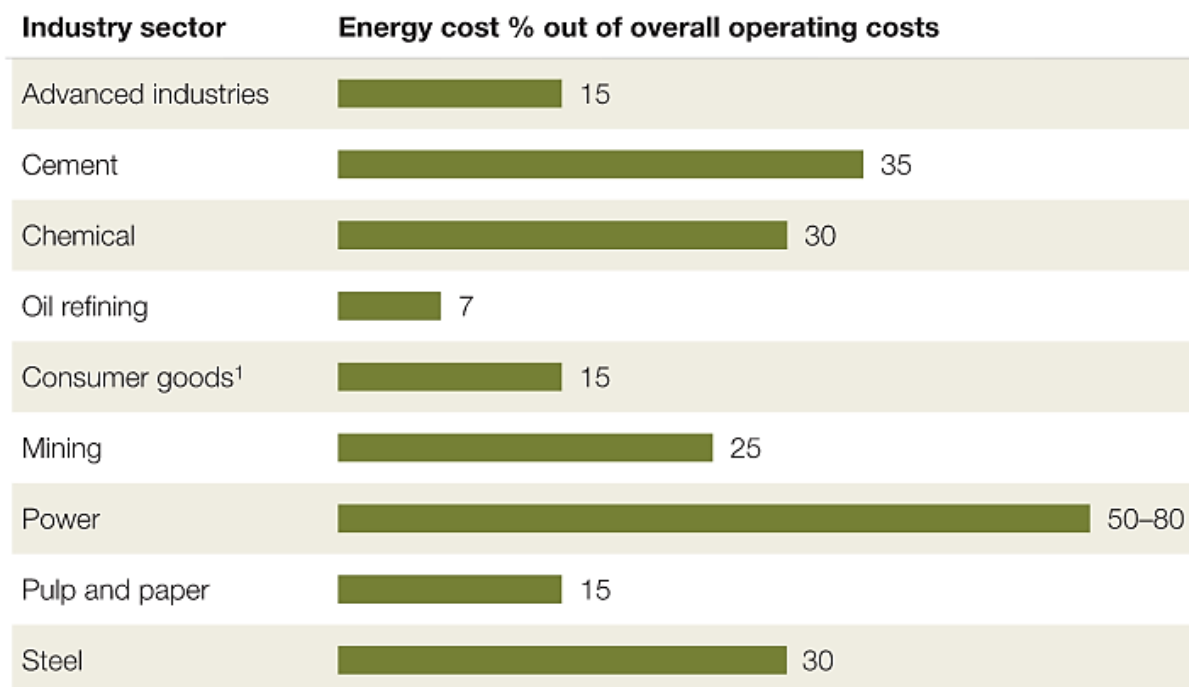
اهمیت بهره‌وری انرژی در صنایع تولیدی از چندین جنبه اقتصادی، زیست محیطی و استراتژیک قابل بررسی است. یکی از اصلی‌ترین دلایل اهمیت آن، کاهش هزینه‌های عملیاتی در واحدهای تولیدی است. انرژی یکی از بزرگ‌ترین اجزای هزینه در فرآیندهای صنعتی محسوب می‌شود، به ویژه در صناعی که مصرف انرژی بالایی دارند مانند فولاد، سیمان، پتروشیمی و صنایع غذایی. با افزایش بهره‌وری انرژی، واحدهای تولیدی می‌توانند بدون نیاز به افزایش تولید یا تغییر در ساختار اساسی، هزینه‌های خود را به میزان قابل توجهی کاهش دهند (دولگه^۱ و همکاران، ۲۰۲۱). این موضوع در شرایطی که قیمت انرژی در حال افزایش است، اهمیتی دوچندان می‌یابد. علاوه بر آن، با بهره‌وری انرژی، عمر مفید تجهیزات نیز افزایش می‌یابد، چرا که سیستم‌ها با بازدهی بالاتر و

فرسایش کمتر کار می‌کنند و این خود باعث کاهش هزینه‌های نگهداری و تعمیرات می‌شود (لین و چن، ۲۰۱۸).

در بسیاری از صنایع، به ویژه صنایع پر انرژی بر، انرژی بخش عمده‌ای از هزینه‌های تولید را تشکیل می‌دهد. این موضوع اهمیت بالایی دارد زیرا هر گونه کاهش در مصرف انرژی یا بهبود بهره‌وری آن می‌تواند به طور قابل توجهی هزینه‌های عملیاتی را کاهش داده و در نهایت منجر به افزایش سودآوری شود. نمودار ۱ به بررسی میزان سهم انرژی در هزینه‌های عملیاتی چند صنعت عمده می‌پردازد. این نمودار نشان می‌دهد که انرژی چه نسبتی از کل هزینه‌های عملیاتی هر صنعت را تشکیل می‌دهد و اهمیت آن را در ساختار هزینه‌ای صنایع مختلف به تصویر می‌کشد.^۲

^۲ <https://www.mckinsey.com>

^۱ Dolge



نمودار ۱. سهم هزینه انرژی در هزینه‌های عملیاتی صنایع مختلف

برق و سوخت است که باعث افزایش سهم انرژی در هزینه‌ها می‌شود. صنایع با فرآیندهای کمتر انرژی بر یا صنایع خدماتی معمولاً سهم انرژی کمتری در هزینه‌های عملیاتی خود دارند که می‌تواند زیر ۱۰ درصد باشد. این موضوع نشان می‌دهد که اهمیت انرژی در هزینه‌های عملیاتی به شدت وابسته به ماهیت صنعتی و فرآیندهای تولیدی آن صنعت است.

با توجه به سهم بالای انرژی در هزینه‌های عملیاتی صنایع پر انرژی، بهینه‌سازی مصرف انرژی، ارتقای فناوری‌ها و بهبود کارایی انرژی می‌تواند به کاهش قابل توجه هزینه‌ها منجر شود. این موضوع باعث می‌شود سرمایه‌گذاری در فناوری‌های بهره‌وری انرژی و روش‌های نوین مدیریتی، به ویژه در صنایع شیمیایی، سیمان، فلزات و معدن، از اهمیت بالایی برخوردار باشد. نمودار ۱ به

صنعت شیمیایی دارای بالاترین سهم انرژی در هزینه‌های عملیاتی است که در بازه حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد قرار دارد. دلیل این سهم بالای انرژی، ماهیت فرآیندهای تولیدی پیچیده و انرژی بر این صنعت است. تولید محصولات شیمیایی نیازمند انرژی زیاد برای گرمادهی، سرمایش، واکنش‌های شیمیایی و فرآیندهای جانبی است. سیمان‌سازی نیز یکی از پر مصرف‌ترین صنایع از نظر انرژی است و سهم انرژی در هزینه‌های عملیاتی آن حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد است. این موضوع به دلیل نیاز به دمای بسیار بالا برای پختن مواد اولیه و مصرف گسترده سوخت در کوره‌های سیمان است. در بخش صنعت فلزات و معدن نیز انرژی سهم قابل توجهی (حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد) از هزینه‌های عملیاتی دارد. استخراج، خردایش، فرآوری و ذوب فلزات نیازمند مصرف بالای

چالش‌های انرژی در واحدهای تولیدی

چالش‌های انرژی در واحدهای تولیدی یکی از مسائل کلیدی و تأثیرگذار در عملکرد، بهره‌وری و سودآوری این واحدها به شمار می‌رود. یکی از اساسی‌ترین چالش‌ها، نوسانات قیمت انرژی در بازارهای داخلی و جهانی است. بسیاری از واحدهای تولیدی، به ویژه در کشورهای در حال توسعه، وابستگی بالایی به سوخت‌های فسیلی مانند گاز طبیعی، نفت و برق دارند و با تغییرات قیمت این منابع، به شدت تحت تأثیر قرار می‌گیرند. این نوسانات باعث می‌شود که برنامه‌ریزی‌های مالی و تولیدی با عدم قطعیت همراه شوند و ریسک اقتصادی برای صاحبان صنایع افزایش یابد (بی‌و همکاران، ۲۰۲۲).

چالش دیگر، اتلاف بالای انرژی در فرآیندهای صنعتی است که به دلیل فرسودگی تجهیزات، نبود سیستم‌های کنترل و مانیتورینگ دقیق، طراحی غیراستاندارد خطوط تولید و آموزش ناکافی نیروی انسانی ایجاد می‌شود. در بسیاری از واحدهای تولیدی، تجهیزات قدیمی با بازده پایین هنوز در حال استفاده هستند که علاوه بر مصرف انرژی بالا، هزینه‌های نگهداری بیشتری نیز به همراه دارند. نبود فرهنگ بهینه‌سازی مصرف انرژی در سازمان‌ها نیز یکی دیگر از موانع مهم است. در شرایطی که مدیران و کارکنان اهمیت بهره‌وری انرژی را درک نکنند و سیاست‌های مدیریتی در این زمینه نداشته باشند، حتی بهترین فناوری‌ها نیز نمی‌توانند تأثیر مطلوبی داشته باشند. همچنین، نبود ابزارهای دقیق برای اندازه‌گیری و تحلیل مصرف انرژی باعث می‌شود تصمیم‌گیری‌ها بر

خوبی نشان می‌دهد که انرژی یکی از عوامل کلیدی هزینه در صنایع پرانرژی بر است و کاهش مصرف انرژی نه تنها به حفظ منابع زیست محیطی کمک می‌کند، بلکه می‌تواند یک راهبرد مهم برای افزایش بهره‌وری و کاهش هزینه‌های عملیاتی در صنایع مختلف باشد. بنابراین، شناخت دقیق سهم انرژی در ساختار هزینه‌ای هر صنعت، پیش‌نیاز اجرای راهکارهای موفق بهینه‌سازی انرژی است.

بهره‌وری انرژی در صنایع تولیدی نقش مهمی در کاهش اثرات زیست محیطی دارد. با کاهش مصرف انرژی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای، آلاینده‌های هوا و پسماندهای صنعتی نیز کاهش می‌یابد، که در نتیجه آن، آسیب کمتری به محیط زیست وارد می‌شود و واحدهای صنعتی می‌توانند به الزامات قانونی و زیست محیطی پایبند بمانند (کای و همکاران، ۲۰۱۹). در بسیاری از کشورها، رعایت استانداردهای زیست محیطی و بهره‌وری انرژی به عنوان یک الزام قانونی و حتی شرط دریافت مجوزهای لازم برای ادامه فعالیت صنعتی مطرح شده است. همچنین، بهره‌وری انرژی باعث ارتقاء تصویر برند و افزایش مسئولیت‌پذیری اجتماعی شرکت‌ها می‌شود، که در بازار رقابتی امروز می‌تواند مزیت مهمی محسوب شود. براین اساس، در دنیای پرچالش امروز که منابع انرژی محدود و تقاضا برای تولید بیشتر است، بهره‌وری انرژی به عنوان یک راهبرد کلان و پایدار، نقشی کلیدی در تامین انرژی آینده و تداوم فعالیت‌های تولیدی ایفا می‌کند (دی فوگیا، ۲۰۲۱).

اساس حدس و گمان باشد، نه داده‌های دقیق و علمی (سینگ^۱ و همکاران، ۲۰۲۴).

از دیگر چالش‌های مهم می‌توان به محدودیت در دسترسی به فناوری‌های نوین، سرمایه‌گذاری اولیه بالا برای اجرای پروژه‌های بهینه‌سازی انرژی و عدم حمایت کافی مالی و فنی از سوی دولت‌ها اشاره کرد. بسیاری از صنایع، به خصوص در کشورهای با زیرساخت‌های ضعیف، توانایی تأمین هزینه‌های مرتبط با نوسازی سیستم‌های انرژی را ندارند. نبود مشوق‌های مالی، تسهیلات بانکی مناسب و چارچوب‌های قانونی برای حمایت از پروژه‌های بهره‌وری انرژی، مانع مهمی در مسیر تحول انرژی در صنایع است (گبرسلاسی^۲، ۲۰۲۱). همچنین، نبود نیروی انسانی متخصص در حوزه انرژی و ضعف در سیستم آموزش فنی حرفه‌ای و دانشگاهی نیز باعث شده است که ظرفیت لازم برای اجرای طرح‌های علمی و مهندسی بهره‌وری انرژی در بسیاری از واحدهای تولیدی وجود نداشته باشد (اگولا^۳، ۲۰۱۸). در مجموع، چالش‌های انرژی در صنایع تولیدی، ترکیبی از عوامل اقتصادی، فنی، مدیریتی و ساختاری است که برای حل آن نیاز به یک نگاه جامع، هماهنگ و بلندمدت وجود دارد.

ضرورت استفاده از فناوری‌های نوین

رشد روزافزون مصرف انرژی، افزایش قیمت سوخت‌ها، محدودیت منابع طبیعی و فشارهای زیست‌محیطی باعث شده است که صنایع به سمت راهکارهای نوآورانه و کارآمد سوق پیدا کنند. فناوری‌های نوین می‌توانند با

ایجاد تحول در فرآیندهای تولید، بهره‌وری انرژی را به شکل چشمگیری افزایش دهند. برای مثال، استفاده از سیستم‌های هوشمند کنترل انرژی، اینترنت اشیا، حسگرهای پیشرفته، داده‌کاوی و الگوریتم‌های یادگیری ماشین، این امکان را فراهم می‌کند که میزان مصرف انرژی در زمان واقعی پایش شود و به صورت خودکار بهینه‌گردد (گانو^۴ و همکاران، ۲۰۲۰). این فناوری‌ها به صنایع اجازه می‌دهند تا مصرف انرژی را دقیق‌تر تحلیل کرده، نقاط پرهزینه را شناسایی کنند و برای کاهش مصرف اقدامات هدفمند انجام دهند، که نتیجه آن صرفه‌جویی در هزینه‌ها و کاهش تأثیرات منفی زیست‌محیطی خواهد بود.

از سوی دیگر، فناوری‌های نوین نقش مهمی در رقابت پذیری صنایع دارند. در دنیای امروز، صرفاً تولید بیشتر ملاک موفقیت نیست، بلکه تولید با کیفیت‌تر، سریع‌تر و با مصرف منابع کمتر اهمیت دارد. استفاده از فناوری‌های نوین انرژی به واحدهای تولیدی این امکان را می‌دهد که با کاهش وابستگی به منابع محدود انرژی، پایداری بیشتری داشته باشند و از ریسک‌های ناشی از نوسانات بازار انرژی در امان بمانند. همچنین، با بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر، سیستم‌های بازیافت انرژی و فناوری‌های سبز، صنایع می‌توانند علاوه بر کاهش هزینه، مسئولیت اجتماعی خود را نیز ایفا کنند. بسیاری از بازارهای جهانی و شرکت‌های بزرگ، اکنون به دنبال تأمین‌کنندگانی هستند که استانداردهای زیست‌محیطی و بهره‌وری انرژی را رعایت می‌کنند، بنابراین سرمایه‌گذاری در فناوری‌های نوین، نه تنها یک

³ Agolla

⁴ Gao

¹ Singh

² Gebreslassie

ضرورت فنی، بلکه یک استراتژی مهم برای بقا و رشد در بازارهای رقابتی جهانی است.

فناوری‌های نوین در بهره‌وری انرژی

فناوری‌های نوین در بهره‌وری انرژی، مجموعه‌ای از ابزارها، سیستم‌ها و رویکردهای فناورانه هستند که با هدف کاهش مصرف انرژی، افزایش بازدهی و بهینه‌سازی فرآیندهای صنعتی توسعه یافته‌اند. این فناوری‌ها در حوزه‌های مختلفی به کار گرفته می‌شوند و به صنایع کمک می‌کنند تا مصرف انرژی را به صورت هوشمندانه مدیریت کنند.

- فناوری‌های هوشمند

فناوری‌های هوشمند از جمله پیشرفته‌ترین ابزارهایی هستند که در بهینه‌سازی مصرف انرژی در واحدهای تولیدی به کار گرفته می‌شوند. اینترنت اشیا با اتصال دستگاه‌ها، ماشین‌آلات و تجهیزات به شبکه‌ای هوشمند، امکان جمع‌آوری داده‌های دقیق و لحظه‌ای از مصرف انرژی را فراهم می‌کند. این داده‌ها از طریق حسگرهای مختلف دریافت شده و به یک مرکز داده ارسال می‌شوند تا مورد تحلیل قرار گیرند. سیستم‌های مانیتورینگ انرژی مبتنی بر به مدیران این امکان را می‌دهند که مصرف انرژی را در بخش‌های مختلف خط تولید رصد کنند، نقاطی که انرژی به طور غیرضروری مصرف می‌شود یا هدر می‌رود را شناسایی کنند و در

نهایت راهکارهای بهبود را پیاده‌سازی کنند (ریچارد^۱ و همکاران، ۲۰۲۵).

یکی از مزایای کلیدی این فناوری‌ها، واکنش سریع به تغییرات مصرف انرژی است؛ به گونه‌ای که سیستم می‌تواند به صورت خودکار تجهیزات را در زمان‌هایی که مصرف انرژی بهینه نیست، خاموش یا تنظیم کند. این امر باعث کاهش هزینه‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی می‌شود. علاوه بر این، تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده توسط سیستم‌های هوشمند، امکان پیش‌بینی مشکلات احتمالی در تجهیزات و انجام تعمیرات پیشگیرانه را نیز فراهم می‌کند که در نهایت باعث افزایش عمر مفید ماشین‌آلات و کاهش هزینه‌های نگهداری می‌شود (وانگ^۲ و همکاران، ۲۰۱۸).

استفاده از فناوری‌های هوشمند همچنین به بهبود تصمیم‌گیری‌های استراتژیک در واحدهای تولیدی کمک می‌کند. با داشتن داده‌های واقعی و به‌روز، مدیران می‌توانند برنامه‌ریزی‌های بلندمدت بهتری برای مصرف انرژی داشته باشند و به صورت موثرتر منابع خود را مدیریت کنند. این فناوری‌ها همچنین قابلیت ادغام با سیستم‌های مدیریتی سازمان را دارند و می‌توانند بخشی از یک سیستم جامع مدیریت انرژی باشند که به صورت پیوسته عملکرد انرژی را بهبود می‌بخشد و به واحد تولیدی کمک می‌کند تا به استانداردهای بین‌المللی بهره‌وری انرژی نزدیک‌تر شود (سوری^۳ و همکاران، ۲۰۲۳).

- اتوماسیون و کنترل فرآیندها

³ Soori

¹ Reichardt

² Wang

یکی از مزایای مهم اتوماسیون و کنترل فرآیندها، امکان یکپارچه سازی آنها با سایر فناوری‌های نوین مانند هوش مصنوعی و اینترنت اشیا است. این ترکیب فناوری‌ها می‌تواند منجر به ایجاد سیستم‌های کاملاً هوشمند شود که نه تنها مصرف انرژی را بهینه می‌کنند، بلکه قابلیت یادگیری و بهبود مستمر عملکرد را نیز دارند. در نهایت، اتوماسیون باعث افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت تولید نیز می‌شود که این عوامل به طور غیرمستقیم بهره‌وری انرژی را افزایش می‌دهند و به کاهش هزینه‌های عملیاتی کمک می‌کنند (راچمن و همکاران، ۲۰۲۵).

- استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین

هوش مصنوعی AI و یادگیری ماشین^۳ به عنوان فناوری‌های نوین در بهره‌وری انرژی نقش بسیار مهمی ایفا می‌کنند. این فناوری‌ها با تحلیل حجم عظیمی از داده‌های مصرف انرژی و فرآیندهای تولید، الگوهای پنهان و پنهان را شناسایی کرده و مدل‌های پیش‌بینی دقیق برای مصرف آینده ارائه می‌دهند. با استفاده از این مدل‌ها، واحدهای تولیدی قادر خواهند بود برنامه ریزی دقیق‌تری برای مصرف انرژی داشته باشند و به شکل بهینه‌تر منابع خود را تخصیص دهند. همچنین، هوش مصنوعی می‌تواند در بهینه سازی پارامترهای عملیاتی، کاهش هدررفت انرژی و بهبود راندمان تجهیزات به کار گرفته شود (والترسمن و همکاران، ۲۰۲۱).

یکی از کاربردهای برجسته هوش مصنوعی در صنایع، مدیریت بهینه سیستم‌های سرمایش و گرمایش است. این

اتوماسیون صنعتی و سیستم‌های کنترل فرآیند یکی از فناوری‌های کلیدی در بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع تولیدی هستند. با استفاده از این فناوری‌ها، فرآیندهای تولید به صورت خودکار و با دقت بسیار بالا کنترل می‌شوند که منجر به کاهش خطاها، افزایش سرعت و کاهش هدررفت انرژی می‌گردد. کنترل دقیق پارامترهای فرآیند مانند دما، فشار، سرعت و زمان عملکرد تجهیزات باعث می‌شود که انرژی بهینه مصرف شود و از مصرف اضافی و غیرضروری جلوگیری شود. همچنین، اتوماسیون اجازه می‌دهد که فرآیندها به صورت پیوسته و بدون توقف انجام شوند، که این موضوع به افزایش بهره‌وری کلی واحد تولید کمک می‌کند (راچمن و همکاران، ۲۰۲۵).

در بسیاری از صنایع، سیستم‌های کنترل پیشرفته به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند بر اساس داده‌های لحظه‌ای و شرایط محیطی، به صورت هوشمند پارامترهای تولید را تنظیم کنند. به عنوان مثال، در یک کارخانه تولید مواد شیمیایی، کنترل دقیق دما و فشار در راکتورها می‌تواند به طور چشمگیری مصرف انرژی را کاهش دهد، چرا که هرگونه نوسان یا بی‌ثباتی در این پارامترها باعث افزایش مصرف انرژی و کاهش کیفیت محصول می‌شود. همچنین این سیستم‌ها می‌توانند به طور خودکار در مواقعی که تجهیزات در حالت آماده به کار هستند، مصرف انرژی آنها را به حداقل برسانند (لو و همکاران، ۲۰۲۰).

³ Machine Learning

¹ Rachman

² Lu

سیستم‌ها با تحلیل داده‌های محیطی، مصرف انرژی و عملکرد گذشته، بهترین تنظیمات را برای سیستم‌های HVAC پیشنهاد می‌دهند تا ضمن حفظ شرایط مطلوب، مصرف انرژی کاهش یابد. همچنین در خطوط تولید، الگوریتم‌های یادگیری ماشین می‌توانند به صورت خودکار نقاط ناکارآمد و پرمصرف را شناسایی کرده و راهکارهایی برای اصلاح آنها ارائه دهند که این امر باعث افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها می‌شود (لی، ۲۰۲۴).

علاوه بر این، هوش مصنوعی می‌تواند نقش مهمی در نگهداری پیش‌بینانه تجهیزات ایفا کند. با تحلیل داده‌های حسگرهای نصب شده بر روی ماشین‌آلات، AI می‌تواند زمان وقوع خرابی یا نیاز به تعمیرات را پیش‌بینی کند و از توقف ناگهانی خط تولید جلوگیری نماید. این موضوع نه تنها هزینه‌های نگهداری را کاهش می‌دهد، بلکه باعث صرفه‌جویی در مصرف انرژی نیز می‌شود، زیرا تجهیزات در بهترین حالت عملکرد خود کار می‌کنند و از مصرف انرژی اضافی جلوگیری می‌شود (لیو^۲ و همکاران، ۲۰۲۲). به این ترتیب، استفاده از هوش مصنوعی و یادگیری ماشین به عنوان یک فناوری نوین، فرصت‌های گسترده‌ای برای بهبود بهره‌وری انرژی در صنایع فراهم می‌آورد.

- فناوری‌های مربوط به انرژی‌های تجدیدپذیر در صنایع

فناوری‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، به ویژه پنل‌های خورشیدی و توربین‌های بادی، به عنوان منابع انرژی پاک و پایدار، نقش مهمی در کاهش وابستگی صنایع به سوخت‌های فسیلی و افزایش بهره‌وری انرژی ایفا می‌کنند. این فناوری‌ها می‌توانند بخشی از انرژی مورد نیاز واحدهای تولیدی را از منابع طبیعی و تجدیدپذیر تامین کنند، که این امر باعث کاهش هزینه‌های انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای می‌شود. استفاده از انرژی خورشیدی در بام‌ها یا زمین‌های اطراف کارخانه‌ها و توربین‌های بادی در مناطق مستعد، می‌تواند به کاهش مصرف برق شبکه‌ای و بهبود پایداری انرژی منجر شود (گبرسلاسی، ۲۰۲۱).

علاوه بر تامین مستقیم انرژی، فناوری‌های تجدیدپذیر با ادغام در سیستم‌های مدیریت انرژی، به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کنند. به طور مثال، استفاده از باتری‌ها و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در کنار پنل‌های خورشیدی این امکان را می‌دهد که انرژی تولید شده در ساعات اوج تولید ذخیره شده و در زمان‌های نیاز مصرف شود. این امر باعث می‌شود که واحدهای تولیدی کمتر به انرژی شبکه وابسته باشند و بتوانند در مواقع قطع برق یا نوسانات، بدون وقفه به فعالیت خود ادامه دهند (احمدآو همکاران، ۲۰۲۱).

با توجه به اهمیت روزافزون کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی و رعایت استانداردهای بین‌المللی، بسیاری از صنایع در سراسر جهان در حال سرمایه‌گذاری گسترده بر روی فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر هستند. این

³ Ahmad

¹ Lee

² Liu

آلودگی‌های محیط زیستی دارند، زیرا با کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی، میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای و آلاینده‌ها نیز کاهش می‌یابد (منگ و همکاران، ۲۰۱۸). پیاده‌سازی این فناوری‌ها نیازمند سرمایه‌گذاری اولیه و طراحی دقیق است، اما بازگشت سرمایه از طریق کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش بهره‌وری، آن را به گزینه‌ای بسیار مقرون به صرفه تبدیل کرده است (واتسون و تمینگر، ۲۰۱۸). در نتیجه، سیستم‌های بازیافت انرژی جزو فناوری‌های نوین کلیدی به شمار می‌روند که می‌توانند تأثیر قابل توجهی در توسعه پایدار صنایع داشته باشند.

تأثیر فناوری‌های نوین بر بهره‌وری انرژی

فناوری‌های نوین با ورود به صنایع تولیدی تحولات گسترده‌ای در نحوه مصرف انرژی ایجاد کرده‌اند که این امر مستقیماً بر افزایش بهره‌وری انرژی تأثیرگذار است. استفاده از ابزارها و سیستم‌های هوشمند مانند اینترنت اشیا و هوش مصنوعی باعث شده است که مدیران و مهندسان بتوانند به صورت لحظه‌ای و دقیق میزان مصرف انرژی را پایش و کنترل کنند. این قابلیت امکان شناسایی نقاط ضعف و هدررفت انرژی را فراهم می‌آورد و با انجام تنظیمات بهینه و اتخاذ تصمیمات سریع، از مصرف بی‌رویه انرژی جلوگیری می‌کند (منگ و همکاران، ۲۰۱۸). علاوه بر این، فناوری‌های نوین باعث شده‌اند که فرآیندهای تولید به صورت خودکار و بهینه اجرا شوند که این موضوع کاهش

حرکت نه تنها به حفظ محیط زیست کمک می‌کند، بلکه باعث افزایش اعتبار و مسئولیت اجتماعی شرکت‌ها می‌شود. به علاوه، با توسعه این فناوری‌ها و کاهش هزینه‌های مرتبط، انتظار می‌رود که استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در صنایع بیش از پیش گسترش یابد و به یکی از ارکان اصلی بهره‌وری انرژی تبدیل شود (گبرسلاسی، ۲۰۲۱).

- سیستم‌های بازیافت انرژی

سیستم‌های بازیافت انرژی به منظور استفاده مجدد از انرژی تلف شده در فرآیندهای تولید طراحی شده‌اند و نقش مهمی در بهبود بهره‌وری انرژی ایفا می‌کنند. در بسیاری از واحدهای صنعتی، بخشی از انرژی مصرفی به صورت حرارت، بخار یا انرژی مکانیکی تلف می‌شود که با به کارگیری فناوری‌های بازیافت انرژی، می‌توان این انرژی را دوباره جذب و در فرآیندهای دیگر مورد استفاده قرار داد. برای مثال، سیستم‌های بازیابی حرارت از دودکش‌ها یا خروجی‌های گرمایی ماشین‌آلات، انرژی حرارتی را جمع‌آوری کرده و برای پیش‌گرمایش مواد خام یا تولید بخار مجدد به کار می‌برند (واتسون و تمینگر، ۲۰۱۸).

استفاده از سیستم‌های بازیافت انرژی نه تنها باعث کاهش مصرف انرژی کلی واحد تولید می‌شود، بلکه به کاهش هزینه‌های عملیاتی نیز کمک می‌کند. این سیستم‌ها می‌توانند بازدهی فرآیندهای صنعتی را بهبود بخشند و از مصرف بی‌رویه سوخت جلوگیری کنند. علاوه بر این، سیستم‌های بازیافت انرژی نقش مهمی در کاهش

خطاهای انسانی، بهبود کیفیت تولید و در نهایت صرفه جویی قابل توجهی در انرژی را به دنبال دارد.

علاوه بر بهینه سازی مصرف انرژی در سطح عملیاتی، فناوری‌های نوین امکان پیش بینی دقیق نیازهای انرژی آینده را فراهم می کنند که این امر به واحدهای تولیدی کمک می کند برنامه ریزی های بلند مدت خود را بر اساس داده های واقعی و مدل های هوشمند انجام دهند (احمد و همکاران، ۲۰۲۱). سیستم های یادگیری ماشین با تحلیل داده های گذشته و شرایط متغیر محیطی، روندهای مصرف انرژی را پیش بینی کرده و توصیه هایی برای بهبود بهره وری ارائه می دهند. این پیش بینی ها باعث می شود که کارخانه ها بتوانند منابع خود را به صورت بهینه تخصیص دهند، تجهیزات را در زمان مناسب راه اندازی یا خاموش کنند و مصرف انرژی را در ساعات اوج یا کم مصرف مدیریت نمایند. به این ترتیب، فناوری های نوین به عنوان یک ابزار کلیدی در مدیریت هوشمند انرژی نقش ایفا می کنند (والترسمن و همکاران، ۲۰۲۱).

از سوی دیگر، فناوری های نوین زمینه استفاده گسترده تر از منابع انرژی تجدیدپذیر را در صنایع فراهم کرده اند که این موضوع به کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی و بهبود پایداری انرژی کمک میکند. بکارگیری پنل های خورشیدی، توربین های بادی و سیستم های ذخیره انرژی هوشمند باعث می شود که واحدهای تولیدی بتوانند بخشی از انرژی مورد نیاز خود را از منابع پاک تامین کنند و به این ترتیب هزینه ها و اثرات زیست محیطی را کاهش دهند (گبرسلاسی، ۲۰۲۱). همچنین، فناوری های بازیافت انرژی و سیستم های اتوماسیون پیشرفته باعث می

شوند که انرژی تلف شده در فرآیندهای مختلف به طور موثر مجدداً استفاده شود. تمامی این عوامل در کنار هم باعث می شوند که بهره وری انرژی در واحدهای تولیدی به طور چشمگیری افزایش یابد و به تحقق توسعه پایدار صنایع کمک کند (سینگ و همکاران، ۲۰۲۴).

موانع و چالش ها در استفاده از فناوری های نوین

استفاده از فناوری های نوین در صنایع تولیدی با وجود مزایای فراوان، با موانع و چالش های متعددی نیز مواجه است که می تواند روند پذیرش و اجرای این فناوری ها را کند یا پیچیده کند. یکی از مهم ترین چالش ها هزینه های اولیه بالای سرمایه گذاری در تجهیزات و سیستم های پیشرفته است. بسیاری از واحدهای تولیدی به ویژه کسب و کارهای کوچک و متوسط توان مالی کافی برای خرید و نصب فناوری های هوشمند، سیستم های اتوماسیون پیشرفته یا تجهیزات انرژی تجدیدپذیر را ندارند. این هزینه ها علاوه بر خرید تجهیزات شامل هزینه های آموزش نیروی انسانی، نگهداری و به روز رسانی سیستم ها نیز می شود که به طور کلی بار مالی قابل توجهی به شرکت ها تحمیل می کند و ممکن است آنها را از به کارگیری این فناوری ها منصرف سازد (منگ و همکاران، ۲۰۱۸).

علاوه بر مشکلات مالی، کمبود دانش فنی و تخصص لازم برای پیاده سازی و بهره برداری موثر از فناوری های نوین نیز یکی از موانع اساسی به شمار می رود. فناوری های پیشرفته نیازمند مهندسان و کارشناسان آموزش دیده ای هستند که بتوانند این سیستم ها را به درستی نصب، راه

نتیجه‌گیری

در دنیای امروز که بحران‌های انرژی و تغییرات اقلیمی به عنوان چالش‌های بزرگ جهانی مطرح هستند، افزایش بهره‌وری انرژی در واحدهای تولیدی به عنوان یکی از راهکارهای اساسی برای کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌های عملیاتی و حفظ محیط زیست اهمیت فراوانی یافته است. واحدهای تولیدی به عنوان بخش بزرگی از مصرف‌کنندگان انرژی، نقش تعیین‌کننده‌ای در میزان مصرف سوخت‌های فسیلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند که در نهایت بر توسعه پایدار و سلامت کره زمین اثرگذار است. در این راستا، فناوری‌های نوین به عنوان ابزارهای قدرتمندی شناخته می‌شوند که با بهره‌گیری از فناوری‌های هوشمند، اتوماسیون، هوش مصنوعی و انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توانند تحولات اساسی در بهینه‌سازی مصرف انرژی ایجاد کنند و نقش کلیدی در بهبود عملکرد واحدهای تولیدی ایفا نمایند.

مطالعات و بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که به کارگیری فناوری‌های هوشمند مانند اینترنت اشیا (IoT) و سیستم‌های مانیتورینگ انرژی، امکان پایش لحظه‌ای و دقیق مصرف انرژی را فراهم می‌آورد که این امر مدیران را قادر می‌سازد نقاط ضعف و هدررفت انرژی را شناسایی کنند و با اقدامات اصلاحی سریع، مصرف انرژی را بهینه نمایند. همچنین، اتوماسیون و سیستم‌های کنترل فرآیندها با دقت بالا و کنترل مستمر پارامترهای تولید، علاوه بر افزایش کیفیت و سرعت تولید، از مصرف اضافی انرژی جلوگیری می‌کنند و کاهش خطاهای انسانی را به دنبال دارند. هوش مصنوعی و یادگیری ماشین نیز با تحلیل داده‌های گسترده و پیش

اندازی و مدیریت کنند. در بسیاری از مناطق یا کشورها، کمبود نیروی متخصص و همچنین فقدان برنامه‌های آموزشی و کارگاه‌های تخصصی، استفاده بهینه از فناوری‌های نوین را محدود می‌کند. این کمبود دانش فنی موجب می‌شود که برخی شرکت‌ها حتی پس از سرمایه‌گذاری اولیه، نتوانند به بهره‌وری کامل از فناوری‌ها دست یابند یا مشکلات فنی و عملکردی را به موقع رفع کنند که در نهایت منجر به ناامیدی و کاهش انگیزه برای ادامه استفاده می‌شود (اگولا، ۲۰۱۸).

یکی دیگر از چالش‌های مهم، مقاومت سازمانی و فرهنگی در برابر تغییرات و پذیرش فناوری‌های جدید است. در بسیاری از واحدهای تولیدی، کارکنان و مدیران ممکن است به دلیل عادت به روش‌های سنتی کاری، ترس از بیکاری ناشی از اتوماسیون یا عدم اطمینان نسبت به کارایی فناوری‌های نوین، در برابر تغییرات مقاومت نشان دهند. این مقاومت می‌تواند موجب کندی روند پیاده‌سازی و حتی شکست پروژه‌های نوآورانه شود (سینگ و همکاران، ۲۰۲۴). همچنین، نبود زیرساخت‌های مناسب فناوری اطلاعات و ارتباطات در برخی صنایع و مناطق جغرافیایی، مشکلاتی را در اتصال دستگاه‌ها و اجرای سیستم‌های هوشمند ایجاد می‌کند. در نهایت، عدم وجود سیاست‌ها و حمایت‌های کافی از سوی دولت و نهادهای مرتبط نیز می‌تواند مانع توسعه و گسترش فناوری‌های نوین در بخش تولید گردد (احمد و همکاران، ۲۰۲۱).

بینی روندهای مصرف انرژی، به مدیران امکان برنامه‌ریزی دقیق‌تر و اتخاذ تصمیمات هوشمندانه‌تر را می‌دهند که منجر به صرفه‌جویی چشمگیر در مصرف انرژی و بهبود راندمان فرآیندها می‌شود.

یکی دیگر از ابعاد مهم بهره‌وری انرژی، استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر است که فناوری‌های مرتبط با پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، زمینه کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش آلاینده‌های زیست‌محیطی را فراهم می‌سازد. ترکیب این فناوری‌ها با سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند و بازیافت انرژی تلف شده، به طور چشمگیری پایداری انرژی واحدهای تولیدی را افزایش می‌دهد و باعث کاهش هزینه‌های بلندمدت می‌شود. علاوه بر مزایای فنی و اقتصادی، استفاده از فناوری‌های نوین در بهره‌وری انرژی، مزیت رقابتی برای شرکت‌ها ایجاد می‌کند که می‌توانند در بازارهای جهانی با استانداردهای بالاتر محیط زیستی و انرژی رقابت نمایند و به مسئولیت اجتماعی خود عمل کنند.

با این حال، موانع متعددی نیز بر سر راه استفاده از فناوری‌های نوین وجود دارد که شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه بالا، کمبود نیروی متخصص و دانش فنی لازم، مقاومت سازمانی در برابر تغییر و عدم وجود زیرساخت‌های مناسب است. این چالش‌ها می‌توانند اجرای کامل و موفق فناوری‌های نوین را محدود کنند و نیازمند حمایت‌های مالی، آموزشی و سیاستگذاری از سوی دولت‌ها و نهادهای مرتبط هستند. بنابراین، برای بهره‌برداری کامل از پتانسیل فناوری‌های نوین در بهبود بهره‌وری انرژی، لازم است رویکردی جامع و سیستماتیک

اتخاذ شود که در آن سرمایه‌گذاری در فناوری، آموزش نیروی انسانی، فرهنگ‌سازی سازمانی و توسعه زیرساخت‌ها به صورت همزمان مورد توجه قرار گیرد.

در پایان می‌توان نتیجه گرفت که فناوری‌های نوین به عنوان محرک‌های اصلی تحول در بهره‌وری انرژی واحدهای تولیدی شناخته می‌شوند که می‌توانند ضمن کاهش مصرف انرژی و هزینه‌ها، کیفیت تولید را ارتقا داده و اثرات زیست‌محیطی را کاهش دهند. توسعه و گسترش این فناوری‌ها نیازمند همکاری همه‌جانبه بین بخش خصوصی، دولت و مراکز علمی و پژوهشی است تا با رفع موانع موجود، مسیر رسیدن به تولید پایدار و بهره‌ور از انرژی هموار شود. با توجه به اهمیت استراتژیک بهره‌وری انرژی در مقابله با چالش‌های زیست‌محیطی و اقتصادی جهانی، سرمایه‌گذاری هوشمندانه در فناوری‌های نوین و ایجاد بسترهای مناسب برای استفاده از آنها از ضروریات غیرقابل انکار برای آینده صنایع تولیدی است که می‌تواند به تحقق اهداف توسعه پایدار و اقتصاد سبز کمک شایانی نماید.

منابع

- Agolla, J. E. (2018). Human capital in the smart manufacturing and industry 4.0 revolution. *Digital transformation in smart manufacturing*, 2, 41-58.
- Ahmad, T., Zhang, D., Huang, C., Zhang, H., Dai, N., Song, Y., & Chen, H. (2021). Artificial intelligence in sustainable energy industry: Status Quo, challenges and opportunities. *Journal of cleaner production*, 289, 125834.

- industry. *Materials Today: Proceedings*, 47, 4298-4305.
- Lee, S. J. (2024). Energy-Efficient Operation Simulation of Factory HVAC System based on Machine Learning. *Journal of Korea Society of Industrial Information Systems*, 29(2), 47-54.
 - Lin, B., & Chen, G. (2018). Energy efficiency and conservation in China's manufacturing industry. *Journal of cleaner production*, 174, 492-501.
 - Liu, J., Qian, Y., Yang, Y., & Yang, Z. (2022). Can artificial intelligence improve the energy efficiency of manufacturing companies? Evidence from China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(4), 2091.
 - Lu, Y., Xu, X., & Wang, L. (2020). Smart manufacturing process and system automation—a critical review of the standards and envisioned scenarios. *Journal of Manufacturing Systems*, 56, 312-325.
 - Meng, Y., Yang, Y., Chung, H., Lee, P. H., & Shao, C. (2018). Enhancing sustainability and energy efficiency in smart factories: A review. *Sustainability*, 10(12), 4779.
 - Rachman, G. A., Saiful, R., Ariati, R., Nur, S. M., & Yandri, E. (2025). A Energy Efficiency Strategy in Manufacturing Industry Through Implementation of Automation Technology. *JOURNAL OF MECHANICAL ENGINEERING MANUFACTURES MATERIALS AND ENERGY*, 9(1), 126-139.
 - Cai, W., Lai, K. H., Liu, C., Wei, F., Ma, M., Jia, S., ... & Lv, L. (2019). Promoting sustainability of manufacturing industry through the lean energy-saving and emission-reduction strategy. *Science of the Total Environment*, 665, 23-32.
 - Di Foggia, G. (2021). Energy-efficient products and competitiveness in the manufacturing sector. *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 7(1), 33.
 - Dolge, K., Āzis, R., Lund, P. D., & Blumberga, D. (2021). Importance of energy efficiency in manufacturing industries for climate and competitiveness. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 25(1), 306-317.
 - Gao, K., Huang, Y., Sadollah, A., & Wang, L. (2020). A review of energy-efficient scheduling in intelligent production systems. *Complex & Intelligent Systems*, 6(2), 237-249.
 - Gebreslassie, M. G. (2021). Development and manufacturing of solar and wind energy technologies in Ethiopia: Challenges and policy implications. *Renewable Energy*, 168, 107-118.
 - Iris, Ç., & Lam, J. S. L. (2019). A review of energy efficiency in ports: Operational strategies, technologies and energy management systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 112, 170-182.
 - Jibhakate, R. A., Nirwan, N. W., & Rambhad, K. S. (2021). Enhancing the effectiveness of green technology in manufacturing

- energy efficiency optimisation method for energy-intensive manufacturing enterprises. *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, 31(4-5), 362-379.
- Watson, J. K., & Taminger, K. M. B. (2018). A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. *Journal of Cleaner Production*, 176, 1316-1322.
 - Yi, L., Langlotz, P., Hussong, M., Glatt, M., Sousa, F. J., & Aurich, J. C. (2022). An integrated energy management system using double deep Q-learning and energy storage equipment to reduce energy cost in manufacturing under real-time pricing condition: A case study of scale-model factory. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 38, 844-860.
 - Zakari, A., Khan, I., Tan, D., Alvarado, R., & Dagar, V. (2022). Energy efficiency and sustainable development goals (SDGs). *Energy*, 239, 122365.
 - Reichardt, A., Murawski, M., & Bick, M. (2025). The use of the Internet of Things to increase energy efficiency in manufacturing industries. *International Journal of Energy Sector Management*, 19(2), 369-388.
 - Singh, M. P., Sharma, P., Dubey, Y., Rao, G. S., Mohammad, Q., & Lakhanpal, S. (2024). Energy-efficient manufacturing: Opportunities and challenges. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 505, p. 01032). EDP Sciences.
 - Soori, M., Arezoo, B., & Dastres, R. (2023). Internet of things for smart factories in industry 4.0, a review. *Internet of Things and Cyber-Physical Systems*, 3, 192-204.
 - Waltersmann, L., Kiemel, S., Stuhlsatz, J., Sauer, A., & Miehe, R. (2021). Artificial intelligence applications for increasing resource efficiency in manufacturing companies—a comprehensive review. *Sustainability*, 13(12), 6689.
 - Wang, W., Yang, H., Zhang, Y., & Xu, J. (2018). IoT-enabled real-time