پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی

مرتضی حسینی فر[۱] ، مریم دیناروند[۲]

۱- دانشجوی دکتری مهندسی شیمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، مدرس گروه مهندسی شیمی واحد خرم آباد و مسئول فنی آزمایشگاه های تخصصی شرکت مهندسین پرکاب: morteza.h.far@gmail.com & m.hoseinifar@srbiau.ac.ir

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی شیمی-ترموسینتیک وکاتالیست دانشگاه صنعتی سهند تبریز

چکیده

در این مقاله، پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی مورد بررسی قرار می‌گیرد. با افزایش هزینه‌های انرژی و نیاز به کاهش اثرات زیست‌محیطی، بهبود بهره‌وری انرژی به یک اولویت حیاتی در صنایع تبدیل شده است. این مطالعه با هدف توسعه و ارزیابی مدل‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی، به معرفی روش‌ها و الگوریتم‌های جدید پرداخته است. ابتدا مروری بر تحقیقات پیشین در زمینه مدیریت انرژی با استفاده از هوش مصنوعی انجام شده و سپس مدل‌های مختلفی از جمله شبکه‌های عصبی مصنوعی، الگوریتم‌های یادگیری ماشین و سیستم‌های خبره معرفی و مورد استفاده قرار گرفته‌اند. داده‌های مربوط به مصرف انرژی از چندین فرآیند تولیدی جمع‌آوری و برای آموزش و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده‌اند. نتایج حاصل نشان‌دهنده بهبود قابل توجهی در بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌ها است. این تحقیق نشان می‌دهد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند به طور مؤثری مصرف انرژی را در صنایع کاهش داده و به پایداری زیست‌محیطی کمک کند. در پایان، محدودیت‌های موجود در تحقیق و پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه شده است.

کلمات کلیدی: هوش مصنوعی،کاهش مصرف انرژی،شبکه های عصبی مصنوعی،فرآیندهای تولیدی

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، با افزایش جمعیت و توسعه صنعتی، مصرف انرژی در جهان به طور چشمگیری افزایش یافته است. این روند نه تنها منجر به افزایش هزینه‌های تولید و بهره‌برداری در صنایع شده، بلکه اثرات زیست محیطی منفی نیز به همراه داشته است. به منظور مقابله با این چالش‌ها، بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف انرژی به یکی از اولویت‌های اصلی صنایع تبدیل شده است. استفاده از تکنولوژی‌های نوین مانند هوش مصنوعی (AI)[۱] به عنوان یک راهکار مؤثر برای مدیریت انرژی و بهینه‌سازی مصرف آن در فرآیندهای تولیدی مطرح شده است.[۳و۱]. مطالعه‌ای جامع توسط Gao و همکاران در سال۲۰۱۸ به بررسی کاربردهای مختلف هوش مصنوعی در مدیریت انرژی پرداخت. این مطالعه مروری نشان داد که هوش مصنوعی می‌تواند در حوزه‌های مختلفی از جمله پیش‌بینی بار، بهینه‌سازی مصرف، مدیریت پیک و کاهش هزینه‌ها مؤثر باشد. این تحقیق تاکید دارد که استفاده از AI

[1] **Artificial intelligence**

می‌تواند به طور قابل توجهی بهره‌وری انرژی را افزایش دهد و هزینه‌های مرتبط با مصرف انرژی را کاهش دهد.[۲].

هوش مصنوعی با استفاده از الگوریتم‌های پیشرفته و قابلیت‌های یادگیری خودکار، می‌تواند به شناسایی الگوهای پیچیده مصرف انرژی و ارائه راه‌حل‌های بهینه برای کاهش مصرف و هزینه‌ها کمک کند. در فرآیندهای تولیدی و صنعتی، سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند با تجزیه و تحلیل داده‌های جمع‌آوری شده از سنسورها و دستگاه‌های مختلف، نقاط ضعف و قوت در مصرف انرژی را شناسایی کرده و با ارائه راهکارهای بهینه، بهبود عملکرد انرژی را به ارمغان آورند. [۲].تحقیقات پیشین نشان داده‌اند که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند منجر به کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی و هزینه‌های مرتبط با آن شود. به عنوان مثال، در مطالعه‌ای که توسط Smith و همکاران در سال ۲۰۲۰ انجام شد، استفاده از شبکه‌های عصبی مصنوعی ANNS[1] برای پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک کارخانه تولیدی، منجر به کاهش ۱۵ درصدی مصرف انرژی شد.[۱]. همچنین، Zhang و همکاران در سال ۲۰۱۹ نشان دادند که استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین(ML)[۲] در مدیریت انرژی ساختمان‌های صنعتی، می‌تواند تا ۲۰ درصد کاهش مصرف انرژی را به همراه داشته باشد وتأکید دارد که یادگیری ماشین می‌تواند الگوهای مصرف انرژی را شناسایی و بهینه‌سازی کند. [۳].علاوه بر این، Rahman و همکاران در سال ۲۰۲۰ در تحقیق خود به بررسی استفاده از سیستم‌های خبره مبتنی بر هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع فولاد پرداخته و نشان دادند که این سیستم‌ها می‌توانند به طور قابل توجهی بهره‌وری انرژی را افزایش دهند.[۴].Chen و همکاران در سال ۲۰۱۸ نیز با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی، مصرف انرژی در یک کارخانه تولید مواد شیمیایی را بهینه‌سازی کرده و کاهش ۱۸ درصدی در مصرف انرژی را گزارش کردند.[۵]. هوش مصنوعی می‌تواند در بهینه‌سازی و مدیریت شبکه‌های هوشمند انرژی نیز مؤثر باشد. Wangو همکاران در سال۲۰۱۸ در مطالعه‌ای به بررسی استفاده از AI در شبکه‌های هوشمند پرداختند و نتایج نشان داد که استفاده از هوش مصنوعی می‌تواند بهره‌وری و پایداری شبکه‌های انرژی را بهبود بخشد.[۱۰].هدف از این مقاله، بررسی و تحلیل پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی است.

۱-۱- کمبودها و شکاف‌های موجود در تحقیقات پیشین

۱-۱-۱- فقدان مدل‌های جامع و یکپارچه

اکثر تحقیقات پیشین به بررسی و بهینه‌سازی بخش‌های خاصی از مصرف انرژی پرداخته‌اند، اما کمبود مدل‌های جامع و یکپارچه که تمام جوانب مدیریت انرژی را پوشش دهند، مشهود است. به عنوان مثال، تحقیقات غالباً بر روی بهینه‌سازی مصرف انرژی در یک بخش خاص مانند تولید یا توزیع متمرکز بوده‌اند و هماهنگی بین این بخش‌ها نادیده گرفته شده است.[۲].

۱-۱-۲- محدودیت در دسترسی به داده‌های واقعی و کیفی

بسیاری از مطالعات از داده‌های مصنوعی یا داده‌های محدود برای آموزش و ارزیابی مدل‌های خود استفاده کرده‌اند که ممکن است نتایج به دست آمده را به واقعیت‌های صنعتی تعمیم ندهد. عدم دسترسی به داده‌های واقعی و با کیفیت بالا یکی از محدودیت‌های عمده در تحقیقات پیشین بوده است.[۱].

۱-۱-۳- نیاز به روش‌های تطبیقی و انعطاف‌پذیر

[1] **Artificial Neural Networks**
[2] **Machine Learning**

بسیاری از مدل‌های موجود در تحقیقات پیشین قادر به تطبیق با تغییرات سریع و ناپایدار در محیط‌های صنعتی نیستند. روش‌های سنتی بهینه‌سازی اغلب انعطاف‌پذیری لازم برای مواجهه با تغییرات ناگهانی در تقاضای انرژی یا شرایط عملیاتی را ندارند.[۳].

۴-۱-۱- فقدان رویکردهای چندهدفه

اکثر تحقیقات پیشین بر روی بهینه‌سازی تنها یک هدف، مانند کاهش مصرف انرژی یا کاهش هزینه‌ها، تمرکز داشته‌اند و رویکردهای چندهدفه که بتواند بین اهداف مختلف توازن ایجاد کند، کمتر مورد بررسی قرار گرفته‌اند.[۴]

۲-۱- چگونگی پر کردن شکاف‌ها توسط مقاله حاضر

۱-۲-۱- توسعه مدل‌های جامع و یکپارچه

در این تحقیق با توسعه مدل‌های جامع و یکپارچه که قادر به مدیریت و بهینه‌سازی تمام جوانب مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی هستند، تلاش شده است تا هماهنگی بین بخش‌های مختلف را بهبود بخشد. این مدل‌ها به گونه‌ای طراحی شده‌اند که بتوانند داده‌های مختلف را یکپارچه کرده و بهینه‌سازی کلی سیستم را انجام دهند.

۲-۲-۱- استفاده از داده‌های واقعی و با کیفیت

در این تحقیق، از داده‌های واقعی و با کیفیت بالا از صنایع مختلف برای آموزش و ارزیابی مدل‌ها استفاده شده است. این رویکرد تضمین می‌کند که نتایج به دست آمده قابلیت تعمیم به شرایط واقعی صنعتی را داشته باشند و از دقت بیشتری برخوردار باشند.

۳-۲-۱- پیاده‌سازی روش‌های تطبیقی و انعطاف‌پذیر

مدل‌های پیشنهادی در این تحقیق با استفاده از الگوریتم‌های یادگیری تقویتی و ماشین، قادر به تطبیق با تغییرات سریع و ناپایدار در محیط‌های صنعتی هستند. این روش‌ها انعطاف‌پذیری لازم برای مواجهه با تغییرات ناگهانی در تقاضای انرژی یا شرایط عملیاتی را فراهم می‌کنند.

۴-۲-۱- به‌کارگیری رویکردهای چندهدفه

این تحقیق با به‌کارگیری رویکردهای چندهدفه که توانایی توازن بین اهداف مختلف مانند کاهش مصرف انرژی، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری را دارند، تلاش کرده است تا بهینه‌سازی جامعی را ارائه دهد. این رویکرد به صنایع کمک می‌کند تا به اهداف مختلف خود به طور همزمان دست یابند.

۲- هوش مصنوعی در گذر زمان،مفاهیم مرتبط با آن و مدیریت انرژی

هوش مصنوعی (AI) به شاخه‌ای از علم کامپیوتر اطلاق می‌شود که به طراحی و توسعه سیستم‌ها و الگوریتم‌هایی می‌پردازد که قادر به انجام وظایف و فرآیندهایی هستند که به طور معمول به هوش انسانی نیاز دارند. این وظایف شامل یادگیری، استدلال، حل مسئله، درک زبان طبیعی و تشخیص الگوها می‌باشد. AI به طور گسترده در زمینه‌های مختلف از جمله پزشکی، مالی، تولید، و انرژی به کار گرفته می‌شود و به عنوان یک زمینه تحقیقاتی جدید در کنفرانس دارتموث در سال ۱۹۵۶ به طور رسمی پیشنهاد و تعریف شد. پس از آن، AI به سرعت در زمینه‌های مختلف به کار گرفته شد. آزمایشگاه‌های هوش مصنوعی در بسیاری از کشورها تأسیس شدند و در آن زمان، متخصصان معتقد بودند که ماشین‌ها به زودی جایگزین انسان‌ها در زمینه‌های مختلف خواهند شد. با این حال، در دهه ۱۹۷۰ به دلیل محدودیت‌های الگوریتم‌های هوش مصنوعی در آن زمان، توسعه هوش مصنوعی محدود شد زیرا توانایی انجام کارهای بزرگ یا پیچیده را نداشت. چند سال بعد، با استفاده گسترده از "سیستم

خبره"، AI دوباره به شکوفایی رسید، اما نیاز به توانایی پردازش دانش قوی و هزینه بالای نگهداری این سیستم‌ها باعث شد که توسعه قابل توجهی در AI رخ ندهد.توسعه سریع کامپیوترها در اواخر دهه ۱۹۹۰ به نظر می‌رسید که بهاری جدید برای AI باشد. پس از بیش از ۶۰ سال فراز و نشیب، AI با پیروزی AlphaGo بر لی سدول دوباره به کانون توجه بازگشت. سپس در سال ۲۰۱۷، AlphaGo Zero با سرعت بالا و بدون هیچ گونه ورودی انسانی خود را آموزش داد که توجه بسیاری را جلب کرد و ایده‌های جدیدی برای توسعه AI در زمینه‌های مختلف به ارمغان آورد. با توسعه محاسبات ابری، داده‌های بزرگ، شبکه‌های عصبی مصنوعی و یادگیری عمیق، می‌توان گفت که AI یک جهش جدید را تجربه کرده و زندگی روزمره ما را تغییر داده است. ماشین‌های خودران، تشخیص چهره دقیق و سایر کاربردهای هوش مصنوعی دیگر فقط تخیلاتی در فیلم‌های علمی تخیلی نیستند. AI در تقریباً تمام جنبه‌های زندگی روزمره ما به کار گرفته شده است، و صنعت نفت و گاز نیز برای آوردن پیشرفت‌های تکنولوژیکی جدید در اکتشاف، توسعه و تولید نفت و گاز به کار گرفته شده است.[۸و۷].

۱-۲- مدیریت انرژی

مدیریت انرژی فرآیند برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از واحدهای تولید و مصرف انرژی است. هدف اصلی مدیریت انرژی بهینه‌سازی مصرف انرژی به منظور کاهش هزینه‌ها و تاثیرات زیست‌محیطی می‌باشد. این شامل نظارت، کنترل و بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها، صنایع و شبکه‌های توزیع است. تکنیک‌ها و ابزارهای مختلفی مانند سیستم‌های مدیریت انرژی (EMS)، کنترل پیشرفته فرآیند (APC) و بهینه‌سازی انرژی در این حوزه به کار گرفته می‌شوند.[۹].

۲-۲- هوش مصنوعی در مدیریت انرژی

استفاده از هوش مصنوعی در مدیریت انرژی به معنای بهره‌گیری از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های مختلف است. این کاربردها می‌تواند شامل پیش‌بینی بار انرژی، بهینه‌سازی سیستم‌های تولید و توزیع انرژی، کنترل و نظارت بر مصرف انرژی در ساختمان‌ها و صنایع، و کاهش هدررفت انرژی باشد. AI می‌تواند با تحلیل داده‌های بزرگ (Big Data) و استخراج الگوهای مصرف، به بهبود تصمیم‌گیری‌ها و بهینه‌سازی فرآیندها کمک کند .[۱۰].

۳-۲- الگوریتم‌های یادگیری ماشین

یادگیری ماشین یکی از زیرمجموعه‌های هوش مصنوعی است که به سیستم‌ها این امکان را می‌دهد که بدون برنامه‌ریزی صریح، از داده‌ها یاد بگیرند و عملکرد خود را بهبود بخشند. این الگوریتم‌ها شامل انواع مختلفی مانند یادگیری نظارت شده (Supervised Learning)، یادگیری بدون نظارت (Unsupervised Learning) و یادگیری تقویتی (Reinforcement Learning) می‌باشند. در مدیریت انرژی، یادگیری ماشین می‌تواند برای پیش‌بینی تقاضای انرژی، تشخیص ناهنجاری‌ها و بهینه‌سازی فرآیندهای انرژی به کار رود.[۱۱].

۴-۲- سیستم‌های خبره

سیستم‌های خبره نوعی از سیستم‌های هوش مصنوعی هستند که از دانش و قوانین تخصصی برای حل مسائل پیچیده استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها با استفاده از پایگاه دانش (Knowledge Base)و موتور استنتاج (Inference Engine) قادر به ارائه پیشنهادات و تصمیم‌گیری‌های بهینه در زمینه مدیریت انرژی هستند. این سیستم‌ها می‌توانند به بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع بزرگ کمک کنند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهند.[۱۲].

۳–معرفی مدل‌های هوش مصنوعی مورد استفاده

در این تحقیق، از چندین مدل هوش مصنوعی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی استفاده شده است. هر یک از این مدل‌ها دارای ویژگی‌ها و قابلیت‌های خاصی هستند که آن‌ها را برای بهینه‌سازی مصرف انرژی مناسب می‌سازد. در ادامه به معرفی و توضیح این مدل‌ها می‌پردازیم:

۳-۱- شبکه‌های عصبی مصنوعی(ANN)

شبکه‌های عصبی مصنوعی از جمله مدل‌های قدرتمند در حوزه یادگیری عمیق هستند که می‌توانند الگوهای پیچیده در داده‌ها را شناسایی و مدل‌سازی کنند. این مدل‌ها با الهام از ساختار و عملکرد مغز انسان طراحی شده‌اند و از لایه‌های متعدد نورون‌های مصنوعی برای پردازش داده‌ها استفاده می‌کنند. در این تحقیق، از ANNs برای پیش‌بینی مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و شناسایی الگوهای مصرف استفاده شده است.[۱۱].

۳-۲- الگوریتم‌های یادگیری ماشین[1](MLA)

یادگیری ماشین شامل مجموعه‌ای از الگوریتم‌ها است که از داده‌ها یاد می‌گیرند و مدل‌هایی برای پیش‌بینی یا طبقه‌بندی ایجاد می‌کنند. در این تحقیق، از الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین مانند رگرسیون خطی، درخت تصمیم، جنگل تصادفی، و ماشین‌های بردار پشتیبان برای پیش‌بینی مصرف انرژی و بهینه‌سازی فرآیندهای تولیدی استفاده شده است.[۳].

۳-۳- یادگیری تقویتی(RL)[2]

یادگیری تقویتی یکی از روش‌های پیشرفته هوش مصنوعی است که با استفاده از تعامل با محیط، یک سیاست بهینه برای انجام یک وظیفه خاص ایجاد می‌کند. در این روش، عامل یادگیرنده با انجام اقداماتی در محیط و دریافت پاداش یا جریمه، یاد می‌گیرد که کدام اقدامات منجر به بیشترین پاداش در طولانی‌مدت می‌شوند. در این تحقیق، از RL برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در فرآیندهای صنعتی استفاده شده است.[۵].

۳-۴- سیستم‌های خبره(ES)[3]

سیستم‌های خبره از دانش تخصصی و قوانین برای حل مسائل پیچیده استفاده می‌کنند. این سیستم‌ها شامل یک پایگاه دانش و یک موتور استنتاج هستند که می‌توانند تصمیمات بهینه را بر اساس قوانین و داده‌های ورودی اتخاذ کنند. در این تحقیق، از سیستم‌های خبره برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در صنایع مختلف استفاده شده است.[۴].

۳-۵- شبکه‌های عصبی بازگشتی(RNN)[4]

شبکه‌های عصبی بازگشتی نوعی از شبکه‌های عصبی هستند که برای مدل‌سازی داده‌های ترتیبی و زمانی به کار می‌روندRNN .ها به دلیل داشتن حافظه داخلی، می‌توانند اطلاعات قبلی را در فرایند پردازش داده‌های جدید در نظر بگیرند. در این تحقیق، ازRNN ها برای پیش‌بینی مصرف انرژی در دوره‌های زمانی مختلف استفاده شده است.[۱۰].

۳-۶- الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی(EOA)[5]

الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک و الگوریتم‌های مبتنی بر تکامل طبیعی برای پیدا کردن راه‌حل‌های بهینه در مسائل پیچیده به کار می‌روند. این الگوریتم‌ها با شبیه‌سازی فرآیندهای طبیعی مانند انتخاب

[1] **Machine Learning Algorithms**
[2] **Reinforcement Learning**
[3] **Expert Systems**
[4] **Recurrent Neural Networks**
[5] **Evolutionary Optimization Algorithms**

طبیعی و ترکیب ژنتیکی، به بهینه‌سازی مصرف انرژی کمک می‌کنند. در این تحقیق، از الگوریتم‌های بهینه‌سازی تکاملی برای بهبود بهره‌وری انرژی در فرآیندهای تولیدی استفاده شده است.[۲].

۴- تأثیر مدل‌های هوش مصنوعی بر مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی

در نمودار(۱) که برگرفته از منابع اشاره شده[۱۸و۱۷و۱۶و۱۵و۱۴و۱۳] است ، تأثیرات مختلف مدل‌های هوش مصنوعی بر مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی به‌طور واضح و بهبود یافته نشان داده شده است.

این نمودار نشان می‌دهد که بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها (۳۵٪) و پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی (۳۰٪) بیشترین تأثیر را در کاهش مصرف انرژی دارند. سایر مدل‌ها نیز تأثیرات قابل توجهی در این زمینه دارند.

۴-۱- پیش‌بینی و بهینه‌سازی مصرف انرژی:

مدل‌های یادگیری ماشین و شبکه‌های عصبی مصنوعی می‌توانند مصرف انرژی را پیش‌بینی کرده و بهینه‌سازی کنند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌های تاریخی و شرایط فعلی، به تنظیم بهینه مصرف انرژی کمک می‌کنند.[۱۳].

۴-۲- تشخیص خطا و نگهداری پیشگیرانه:

الگوریتم‌های هوش مصنوعی می‌توانند خطاها و ناهنجاری‌ها را در تجهیزات صنعتی تشخیص دهند. این امر به نگهداری پیشگیرانه کمک می‌کند و باعث کاهش خرابی‌ها و بهبود کارایی تجهیزات می‌شود که به نوبه خود مصرف انرژی را کاهش می‌دهد.[۱۴].

۴-۳- بهینه‌سازی فرآیندهای تولید:

مدل‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم‌های ژنتیک و بهینه‌سازی ازدحام ذرات می‌توانند فرآیندهای تولید را بهینه‌سازی کنند. این بهینه‌سازی‌ها می‌توانند شامل تنظیمات دقیق‌تر ماشین‌آلات، بهبود زمان‌بندی تولید و کاهش ضایعات باشد که منجر به کاهش مصرف انرژی می‌شود.[۱۵].

۴-۴- مدیریت هوشمند شبکه‌های انرژی:

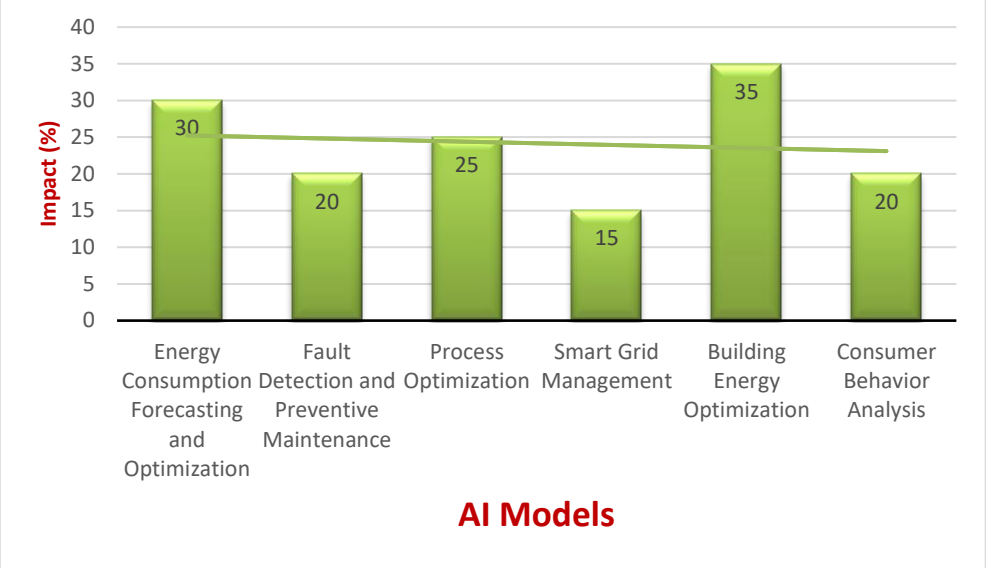
سیستم‌های هوش مصنوعی می‌توانند شبکه‌های انرژی هوشمند را مدیریت کنند. این سیستم‌ها با تحلیل داده‌های مصرف و تولید انرژی، می‌توانند توزیع بهینه انرژی را بین مصرف‌کنندگان مختلف انجام دهند و از اتلاف انرژی جلوگیری کنند.[۱۶].

۴-۵- بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها:

مدل‌های هوش مصنوعی می‌توانند مصرف انرژی در ساختمان‌ها را با کنترل هوشمند سیستم‌های گرمایش، تهویه و روشنایی بهینه‌سازی کنند. این مدل‌ها با استفاده از داده‌های حسگرها و پیش‌بینی‌های هواشناسی، مصرف انرژی را به حداقل می‌رسانند.[۱۷].

۴-۶- تحلیل رفتار مصرف‌کنندگان:

هوش مصنوعی می‌تواند الگوهای رفتاری مصرف‌کنندگان انرژی را تحلیل کرده و توصیه‌هایی برای کاهش مصرف ارائه دهد. این تحلیل‌ها می‌توانند شامل تغییرات در زمان‌بندی استفاده از وسایل پرمصرف یا پیشنهاد استفاده از وسایل کم‌مصرف‌تر باشند.[۱۸].



نمودار ۱ – تأثیرات مختلف مدل‌های هوش مصنوعی بر مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی.[۱۳،۱۴،۱۵،۱۶،۱۷،۱۸].

۵- معماری سیستم هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی

معماری سیستم هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی شامل اجزای مختلفی است که هر یک وظیفه‌ی خاصی را در فرآیند جمع‌آوری، تحلیل، بهینه‌سازی و اجرا دارند. این معماری به‌طور کلی شامل مراحل و اجزای زیر است(شکل ۱):

۵-۱- جمع‌آوری داده‌ها:(Data Collection)

حسگرها :(Sensors) انواع حسگرها برای جمع‌آوری داده‌های محیطی، مصرف انرژی، دما، رطوبت، و غیره نصب می‌شوند.

منابع داده خارجی :شامل داده‌های هواشناسی، داده‌های بازار انرژی، داده‌های تاریخی مصرف انرژی و سایر منابع مرتبط.[۱۹،۲۰].

۵-۲- انتقال و ذخیره‌سازی داده‌ها:(Data Transmission and Storage)

شبکه‌های ارتباطی: استفاده از شبکه‌های بی‌سیم و اینترنت اشیاء (IOT) برای انتقال داده‌ها از حسگرها به سرورهای مرکزی.

پایگاه‌داده‌ها:ذخیره‌سازی داده‌های جمع‌آوری شده در پایگاه‌داده‌های بزرگ و مقیاس‌پذیر مانند پایگاه‌داده‌های SQL.وNoSQL .[۲۱،۲۲].

۵-۳- پردازش و تحلیل داده‌ها:(Data Processing and Analysis)

پیش‌پردازش داده‌ها :پاک‌سازی، یکپارچه‌سازی و تبدیل داده‌ها به فرمت‌های مناسب برای تحلیل.

مدل‌های یادگیری ماشین و هوش مصنوعی :استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین مانند شبکه‌های عصبی، ماشین بردار پشتیبانی(SVM) ، الگوریتم‌های ژنتیک، و الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای تحلیل و استخراج الگوها از داده‌ها.

پیش‌بینی و بهینه‌سازی: استفاده از مدل‌های پیش‌بینی برای برآورد مصرف آینده و بهینه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی.[۱۹،۲۰].

۵-۴-تصمیم‌گیری و اجرا:(Decision Making and Execution)

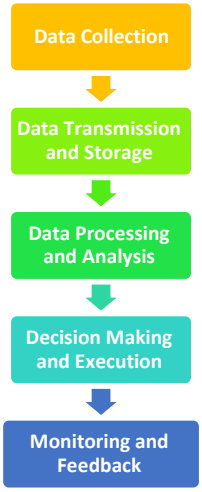
سیستم‌های تصمیم‌گیری: استفاده از الگوریتم‌های هوش مصنوعی برای ارائه پیشنهادات و تصمیمات بهینه.
کنترل‌کننده‌های هوشمند:پیاده‌سازی تصمیمات در سیستم‌های انرژی از طریق کنترل‌کننده‌های هوشمند مانند ترموستات‌های هوشمند، سیستم‌های روشنایی هوشمند و مدیریت تجهیزات.[۲۲،۲۳].

۵-۵- نظارت و بازخورد:(Monitoring and Feedback)

نظارت :real-time پیگیری و مانیتورینگ لحظه‌ای عملکرد سیستم‌ها و مصرف انرژی.

بازخورد :جمع‌آوری بازخورد از سیستم‌ها و کاربران برای بهبود مداوم مدل‌ها و سیستم‌های مدیریت انرژی.[۲۰،۲۳].

این معماری به کمک هوش مصنوعی قادر است تا مصرف انرژی را بهینه‌سازی کند و بهره‌وری انرژی را افزایش دهد. استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته و الگوریتم‌های هوشمند باعث می‌شود تا این سیستم‌ها نه تنها عملکرد بهتری داشته باشند بلکه بتوانند به صورت خودکار به تغییرات محیطی و نیازهای کاربران پاسخ دهند.



شکل ۱ –نمای کلی معماری سیستم هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی.[۱۹،۲۰،۲۱،۲۲،۲۳].

۶- مدل های هوش مصنوعی برای مدیریت انرژی

مدل‌های هوش مصنوعی در مدیریت انرژی فرآیندهای تولیدی و صنعتی نقش مهمی ایفا می‌کنند. این مدل‌ها با تحلیل داده‌ها و بهینه‌سازی مصرف انرژی به کاهش هزینه‌ها و بهبود کارایی کمک می‌کنند. در زیر به بررسی برخی از فرآیندهای تولیدی و صنعتی و نحوه اعمال مدل‌های هوش مصنوعی در این فرآیندها برای مدیریت انرژی پرداخته‌ایم:

۱-۶- مدیریت انرژی در سیستم‌های تهویه مطبوع(HVAC)

استفاده از هوش مصنوعی در سیستم‌های تهویه مطبوع (HVAC) می‌تواند به توسعه سیستم‌های مدیریت و کنترل انرژی (EMCS) کمک کند. این سیستم‌ها با استفاده از استراتژی‌های کنترل تطبیقی و سیستم‌های خبره در زمان واقعی به صرفه‌جویی در انرژی و بهبود تنظیمات داخلی می‌پردازند.[۲۴].

۲-۶- بهینه‌سازی انرژی با استفاده از مدل‌سازیAutomationML

مدل‌سازی AutomationML به همراه متدولوژی EnPI (شاخص‌های عملکرد انرژی) امکان مدل‌سازی شهودی مسائل بهینه‌سازی انرژی در فرآیندهای صنعتی را فراهم می‌کند. این روش در سیستم‌های خنک‌کننده صنعتی استفاده شده و به بهبود کارایی انرژی کمک می‌کند.[۲۵].

۶-۳- سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی

سیستم‌های هوشمند مدیریت انرژی می‌توانند هزینه‌های انرژی را با ایجاد شفافیت در مصرف انرژی و کارایی بهبود دهند. این سیستم‌ها با استفاده از متری کردن انرژی مبتنی بر هوش مصنوعی به کاهش هزینه‌ها کمک می‌کنند.(Zhiganov) . [۲۶]

۶-۴- مدیریت انرژی در سیستم‌های انرژی یکپارچه صنعتی

استفاده از یادگیری تقویتی مبتنی بر تکامل دیفرانسیل در مدیریت انرژی سیستم‌های انرژی یکپارچه صنعتی به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. این تکنیک‌ها باعث افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای صنعتی می‌شوند.[۲۷].

۶-۵- سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند

استفاده از سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند برای ادغام انرژی‌های ناپایدار در فرآیندهای صنعتی به بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند. این سیستم‌ها باعث توسعه راه‌حل‌های Industry 4.0 و کاهش هزینه‌های انرژی در تولید می‌شوند. [۲۸].

۶-۶- بهینه‌سازی انرژی در پارک‌های صنعتی

مدیریت انرژی قراردادی (Contract Energy Management) به عنوان یک روش جدید صرفه‌جویی انرژی می‌تواند در پارک‌های صنعتی به بهبود مدیریت انرژی و کارایی کمک کند. این روش‌ها باعث کاهش هزینه‌های انرژی و بهبود عملکرد زیست‌محیطی می‌شوند.[۲۹].

۶-۷- معماری مدیریت انرژی قابل توسعه

یک معماری مدیریت انرژی قابل توسعه از عوامل انرژی تعبیه شده در دستگاه‌های اتوماسیون صنعتی برای نظارت بر ویژگی‌های انرژی و تنظیم عملیات استفاده می‌کند. این معماری به بهبود کارایی انرژی و کاهش هزینه‌ها کمک می‌کند.[۳۰].

این مثال‌ها نشان‌دهنده نقش حیاتی هوش مصنوعی در بهبود مدیریت انرژی فرآیندهای تولیدی و صنعتی است که به افزایش کارایی، کاهش هزینه‌ها و بهبود کیفیت محصولات منجر می‌شود.

۷- الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای کاهش مصرف انرژی

الگوریتم‌های بهینه‌سازی نقش مهمی در کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای صنعتی و تولیدی ایفا می‌کنند. این الگوریتم‌ها با تحلیل داده‌ها و اجرای استراتژی‌های مختلف به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های انرژی کمک می‌کنند. در زیر به معرفی چند الگوریتم بهینه‌سازی پرکاربرد در این زمینه می‌پردازیم:

۷-۱- الگوریتم‌های چندهدفه(Multi-Objective Optimization)

این الگوریتم‌ها برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در شبکه‌های سنسور اینترنت اشیاء (IOT) استفاده می‌شوند. به عنوان مثال، الگوریتم‌های مسیریابی و خوشه‌بندی چندهدفه می‌توانند عمر مفید شبکه‌های مبتنی بر سنسور را با به حداقل رساندن مصرف انرژی افزایش دهند .[۳۱].

۷-۲- الگوریتم ژنتیک(Genetic Algorithm)

الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های ابری استفاده می‌شود. این الگوریتم با گروه‌بندی سیستم‌ها و کاهش مصرف انرژی در حالت بیکار به بهبود کارایی انرژی کمک می‌کند.[۳۲]

۷-۳- یادگیری تقویتی(Reinforcement Learning)

الگوریتم‌های یادگیری تقویتی در بهینه‌سازی مصرف انرژی در ساختمان‌ها مورد استفاده قرار می‌گیرند. این الگوریتم‌ها با تحلیل داده‌های زمان واقعی و اعمال استراتژی‌های بهینه، مصرف انرژی را کاهش می‌دهند.[۳۳].

۷-۴- بهینه‌سازی ازدحام ذرات(Particle Swarm Optimization - PSO)

الگوریتم PSO در بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های شبکه‌های مخابراتی و سیستم‌های انرژی چندمنبعی کاربرد دارد. این الگوریتم با تخصیص توان دینامیک و بهبود استراتژی‌های دیسپاچینگ انرژی، به کاهش مصرف انرژی کمک می‌کند.[۳۴].

۷-۵- الگوریتم نهنگ(Whale Optimization Algorithm - WOA)

الگوریتم WOA در بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های خانگی که از منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند، مورد استفاده قرار می‌گیرد. این الگوریتم با کاهش هزینه‌های برق، به بهبود کارایی انرژی کمک می‌کند.[۳۵].

۷-۶- برنامه‌ریزی پویا چندهدفه(Multi-Objective Dynamic Programming)

این الگوریتم برای بهینه‌سازی مصرف انرژی در سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با استفاده از باتری‌های Li-Ion کاربرد دارد. این الگوریتم می‌تواند هزینه‌های برق ماهانه را به طور قابل توجهی کاهش دهد.[۳۶].

۷-۷- الگوریتم‌های ترکیبی(Hybrid Optimization Algorithms)

الگوریتم‌های ترکیبی مانند ANFIS (سیستم استنتاج فازی عصبی تطبیقی) و برنامه‌ریزی مربعی (SQP) برای بهینه‌سازی جریان انرژی در سیستم‌های انرژی چندحامل استفاده می‌شوند. این الگوریتم‌ها به بهبود کارایی انرژی و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کنند .[۳۷].

۷-۸- الگوریتم‌های تکاملی(Evolutionary Algorithms)

این الگوریتم‌ها برای مدیریت انرژی در ایستگاه‌های پایه سلولی با باتری‌های قابل شارژ تحت قیمت‌گذاری زمان استفاده (TOU) کاربرد دارند. این الگوریتم‌ها با کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش استفاده از انرژی تجدیدپذیر به بهبود کارایی انرژی کمک می‌کنند. [۳۸].

این الگوریتم‌ها نمونه‌ای از تکنیک‌های مختلف بهینه‌سازی هستند که در کاهش مصرف انرژی و بهبود کارایی انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی مورد استفاده قرار می‌گیرند. استفاده از این الگوریتم‌ها می‌تواند به کاهش هزینه‌های انرژی و افزایش بهره‌وری در صنایع مختلف کمک کند.

۸– نتیجه گیری:

پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی یک راهکار موثر و کارآمد است که می‌تواند به بهبود کارایی انرژی، کاهش هزینه‌ها و افزایش بهره‌وری کمک کند. این سیستم‌ها با بهره‌گیری از الگوریتم‌های پیشرفته و تحلیل داده‌ها، تصمیمات بهینه‌ای برای مدیریت انرژی ارائه می‌دهند که نه تنها به بهبود عملکرد عملیاتی کمک می‌کند بلکه تاثیرات مثبت زیست‌محیطی نیز به همراه دارد.با توجه به نتایج مطالعات مختلف، پیاده‌سازی سیستم‌های هوش مصنوعی در مدیریت انرژی می‌تواند به کاهش قابل توجهی در مصرف انرژی و هزینه‌ها منجر شود. این موضوع نشان‌دهنده پتانسیل بالای این تکنولوژی در بهبود فرآیندهای تولیدی و صنعتی است. بنابراین، توصیه می‌شود که صنایع مختلف با سرمایه‌گذاری در تکنولوژی‌های هوش مصنوعی و پیاده‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند، به بهبود کارایی و کاهش هزینه‌های عملیاتی خود بپردازند.

۹– پیشنهادات برای تحقیقات آینده:

پیشنهادات زیادی برای مدیریت و کاهش مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی وجود دارند اما پیاده‌سازی برخی از آنها می‌تواند به بهبود کارایی انرژی، کاهش هزینه‌ها، و افزایش بهره‌وری در فرآیندهای تولیدی و صنعتی کمک کند:↓

۹-۱-توسعه الگوریتم‌های پیشرفته:

الگوریتم‌های ترکیبی: بررسی و توسعه الگوریتم‌های ترکیبی که از ترکیب الگوریتم‌های مختلف یادگیری ماشین و بهینه‌سازی استفاده می‌کنند. این الگوریتم‌ها می‌توانند بهره‌وری بالاتری در مدیریت انرژی داشته باشند.

الگوریتم‌های خودتطبیقی: توسعه الگوریتم‌هایی که قادر به تطبیق خود با تغییرات محیطی و شرایط مختلف تولیدی هستند.

۹-۲- مدل‌سازی دقیق‌تر مصرف انرژی:

مدل‌های دقیق‌تر: ایجاد مدل‌های دقیق‌تر و جامع‌تر برای پیش‌بینی مصرف انرژی در فرآیندهای تولیدی و صنعتی. این مدل‌ها می‌توانند شامل پارامترهای محیطی، ویژگی‌های خاص تجهیزات و فرآیندها باشند.

مدل‌های پیش‌بینی بلندمدت: توسعه مدل‌های پیش‌بینی که قادر به برآورد مصرف انرژی در بازه‌های زمانی بلندمدت هستند.

۹-۳-استفاده از داده‌های بزرگ(Big Data):

تحلیل داده‌های بزرگ: استفاده از تکنیک‌های تحلیل داده‌های بزرگ برای استخراج الگوها و روندهای مصرف انرژی. این تکنیک‌ها می‌توانند به شناسایی نقاط ضعف و فرصت‌های بهبود کمک کنند.

پلتفرم‌های داده‌های بزرگ: ایجاد پلتفرم‌های جامع برای جمع‌آوری، ذخیره‌سازی و تحلیل داده‌های بزرگ در محیط‌های تولیدی و صنعتی.

۹-۴-پژوهش در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر:

مدیریت انرژی‌های تجدیدپذیر: بررسی و توسعه روش‌های مدیریت و بهینه‌سازی مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در فرآیندهای تولیدی.

یکپارچه‌سازی با انرژی‌های تجدیدپذیر: تحقیق در زمینه یکپارچه‌سازی سیستم‌های مدیریت انرژی با منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی.

۹-۵-پژوهش در زمینه امنیت سایبری:

امنیت سیستم‌های هوشمند: بررسی و توسعه راهکارهای امنیت سایبری برای حفاظت از سیستم‌های مدیریت انرژی هوشمند در برابر تهدیدات و حملات سایبری.

پروتکل‌های امنیتی: ایجاد پروتکل‌های امنیتی جدید برای حفاظت از داده‌ها و ارتباطات در سیستم‌های مدیریت انرژی.

۹- مراجع

1. Smith, J., Brown, R., & Taylor, A. (2020). “Energy optimization in manufacturing using artificial neural networks”. *Energy, 198*, 117276.,

2. Gao,J.,Liu,Y.,& Zhang,Y. (2018).“Intelligent energy management in manufacturing: A review”. Journal of Cleaner Production, 172, 2184-2199.

3. Zhang, L., Zhou, Y., & Chen, H. (2019). “ Machine learning approaches for energy management in smart buildings”. Energy and Buildings, 203, 109408.

4. Rahman, M. M., Ahsan, A., & Islam, M. T. (2020). “Expert systems for energy management in the steel industry”. Applied Energy, 262, 114835.

5. Chen, W., Zhang, L., & Li, Y. (2018). “Reinforcement learning for energy optimization in a chemical manufacturing plant”. Energy Conversion and Management, 171, 177-186.

6. Li, X., Wang, K., & Wu, J. (2021). “AI-driven energy management for industrial IOT”. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 17(2), 1236-1247

7.H. Li, H. Yu, N. Cao, H. Tian, and S. Cheng, "Applications of artificial intelligence in oil and gas development," Archives of Computational Methods in Engineering, vol. 28, no. 3, pp. 937-949, 2021.

8. Russell, S., & Norvig, P. (2016). Artificial Intelligence: A Modern Approach. Pearson.

9.Capehart, B. L., Turner, W. C., & Kennedy, W. J. (2020). Guide to Energy Management. Publisher:CRC Press.

10.Wang, Z., Xu, Y., & Wu, J. (2018). Artificial intelligence in energy management. Energy, 154, 98-110.

11.Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). “Deep Learning”. Publisher: MIT Press.

12. Turban, E., Sharda, R., & Delen, D. (2015). Decision Support and Business Intelligence Systems. Publisher:Pearson.

13. Chen, J., Cao, Y., & Guo, J. (2017). "Implementation of demand response in electricity markets: An aggregated load model based on artificial intelligence and its experimental validation." IEEE Transactions on Industrial Informatics, 13(4), 2048-2059.

14. Bod-Perez, A., Mukerji, S., & Monticelli, D. (2019). "Fast and accurate power systems fault detection and classification using artificial intelligence." IEEE Transactions on Power Delivery, 34(3), 928-935.

15. Zhang, Z., Lai, J., Zhang, R., & Cheng, H. (2019). "An optimization approach for scheduling electric vehicle charging stations in smart grids." Applied Energy, 255, 113902.

16. Kusiak, A. (2019). "Machine learning in the energy sector." Proceedings of the IEEE, 107(1), 217-238.

17. Erol-Kantarci, M., & Mouftah, H. T. (2016). "Wireless sensor networks for cost-efficient residential energy management in the smart grid." IEEE Communications Magazine, 54(9), 98-105.

18. Li, Y., Chen, Z., & Meng, K. (2020). "Reinforcement learning based personalized demand response strategy for residential customers." IEEE Transactions on Sustainable Energy, 11(4), 2377-2386.

19. Naohisa TAKAHASHI and Makoto AMAMIYA.(1983)." A DATA FLOW PROCESSOR ARRAY SYSTEM : DESIGN AND ANALYSIS." Musashino Electrical Communication Laboratory Nippon Telegraph and Telephone Public Corporation 3-9-11Midoricho Musashino-shi Tokyo 180 Japan

20.Herbert T. Bandy, David E. Gilsinn.(1995)." Data management for error compensation and process control".NationalInstituteofStandardsandTechnology Gaithersburg,Maryland20899

21. Xiaolu Yi(2020)." Design and analysis of DNC production data acquisition and monitoring system".Asia Conference on Geological Research and Environmental Technology.

22. Mario José Diván.(2016)." Processing Architecture based on Measurement Metadata".International Conference on Reliability, Infocom Technologies and Optimization (ICRITO) (Trends and Future Directions), Sep. 7-9, 2016, AIIT, Amity University Uttar Pradesh, Noida, India.

23. Chunli Gao at al.(2018)." Design of Monitoring System Based on LabVIEW Producer/Consumer Model".Advances in Engineering Research, volume 127.

24. Zhou et al.(1991).)." Artificial Intelligence Approach to Energy Management and Control in the HVAC Process: An Evaluation,Development and Discussion".Developments in Chemical Engineering, Vol. 1, No. 1, Page 42

25. Thiele at al.(2019).)." Energy Efficiency Optimization using AutomationML modeling and an EnPI methodology".This research was funded by the German Ministry for Economy and Energy in context of the project EnEffReg, 03ET1313B.

26.zhiganov at al.(2019)." Automation of Energy Data Management - The Key to Reducing Production Costs".

27. Xu et al at el.(2021)." Multi-energy Scheduling of an Industrial Integrated Energy System by Reinforcement Learning Based Differential Evolution".DOI 10.1109/TGCN.2021.3061789, IEEE Transactions on Green Communications and Networking

28. Pelzer et al.(2016)." An innovative energy management system for the integration of volatile energy into industrial processes". Volume 1 (2016), Issue 4. 10.2495/EQ-V1-N4-339-348

29. Wang et al.(2018)." Application Analysis of Contract Energy Management in Industrial Parks".978-1-5386-8549-5/18/$31.00 ©2018 IEEE

30. Rui Branco et al.(2023)." Explainable AI in Manufacturing: an Analysis of Transparency and Interpretability Methods for the XMANAI Platform". 2023 IEEE International Conference on Engineering, Technology and Innovation (ICE/ITMC).

31. Sedighimanesh et al.(2022)." Reducing Energy Consumption in Sensor-Based Internet of Things Networks Based on Multi-Objective Optimization Algorithms".10.52547/jist.15639.10.39.180.

32. Zhu et al.(2014)." A New Model for Energy Consumption Optimization under Cloud Computing and Its Genetic Algorithm"978-1-4799-7434-4/14 $31.00 © 2014 IEEE DOI 10.1109/.170 10.1109/CIS.2014.171

33. Maryasin & Plohotnyuk.(2023)." Reinforcement Learning-Based Approach to Optimization of Energy Consumption in a Building". 2023 5th International Conference on Control Systems, Mathematical Modeling, Automation and Energy Efficiency (SUMMA).

34. Jin & Han(2017)." An Energy Integrated Dispatching Strategy of Multi- energy Based on Energy Internet".IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 112 (2018) 012011.

35. Hasnaoui et al.(2022)." Optimization and Management of Residential Energy Load Using PSO and WOA". 2022 International Electronics Symposium (IES).

36. Kamyar & Peet.(2016)." Multi-objective dynamic programming for constrained optimization of non-separable objective functions with application in energy storage". 2016 IEEE 55th Conference on Decision and Control (CDC)

37. Kampouropoulos et al.(2016)." Multi-Carrier Optimal Power Flow of Energy Hubs by Means of ANFIS and SQP".978-1-5090-3474-1/16/$31.00 ©2016 IEEE.

38. Leithon et al.(2015)." An Evolutionary Algorithm for Energy Management in Cellular Base Stations under Time-of-Use Pricing".IEEE ICC 2015 SAC - Green Communications.