

توسعه فناوری‌های نوآورانه برای تولید انرژی پاک از بازیابی حرارت اتلافی: راهکاری برای اقتصاد پایدار و کم‌کربن

زهره معین کیا^{۱*}، مونا زمانی پدارم^۲، حمید حامدی^۳.

۱- شرکت انرژی پاک آروبیج، zmoein788@gmail.com

۲- شرکت انرژی پاک آروبیج، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، mona.zpedram@gmail.com

۳- شرکت انرژی طراحان همراه، hamedi@energytarahan.com

خلاصه

با توجه به افزایش نگرانی‌ها در خصوص کمبود انرژی و چالش‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار کربن، توسعه فناوری‌های نوآورانه برای تولید انرژی پاک از بازیابی حرارت اتلافی به یکی از راهکارهای مؤثر در راستای دستیابی به اهداف توسعه پایدار و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی تبدیل شده است. امروزه مقادیر قابل توجهی از انرژی حرارتی در فرآیندهای صنعتی و تولیدی هدر می‌رود که این انرژی‌های اتلافی نه تنها به منابع انرژی فشار وارد می‌کنند بلکه موجب آلودگی‌های زیست‌محیطی نیز می‌گردند. بازیابی مؤثر این انرژی‌ها و استفاده مجدد از آن‌ها می‌تواند به کاهش مصرف منابع اولیه انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک کند و در نهایت به تحقق یک اقتصاد کم‌کربن و پایدار منجر شود. این مقاله به بررسی فناوری‌های نوآورانه در زمینه بازیابی انرژی حرارتی از فرآیندهای حرارتی می‌پردازد و چالش‌ها و فرصت‌های استفاده از این فناوری‌ها را تحلیل می‌کند. هدف این مطالعه، ارائه راهکارهایی است که با استفاده از آن‌ها می‌توان به امنیت انرژی، پایداری محیطی و کاهش اثرات منفی تغییرات اقلیمی دست یافت و در عین حال بهره‌وری انرژی را افزایش داد. **کلمات کلیدی:** فناوری‌های نوآورانه، انرژی پاک، بازیابی حرارت اتلافی، انتشار گازهای گلخانه‌ای، اقتصاد کم‌کربن و پایدار.

۱. مقدمه

با توجه به بحران‌های جهانی انرژی و نگرانی‌های فزاینده در مورد تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، نیاز به توسعه و بهره‌برداری بهینه از منابع انرژی در حال افزایش است. یکی از منابع مهم انرژی که به طور گسترده در صنایع مختلف هدر می‌رود، انرژی حرارتی اتلافی یا بازیافت‌پذیر است. این انرژی معمولاً به دلیل ناکارآمدی‌های تجهیزات و محدودیت‌های ترمودینامیکی فرآیندهای صنعتی در دماهای بالا یا پایین از سیستم‌ها خارج می‌شود. در این میان، بازیابی این انرژی می‌تواند به کاهش مصرف منابع اولیه سوخت، کاهش هزینه‌های انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی کمک کند. به‌طور خاص، بیش از ۶۳٪ از انرژی مصرفی جهانی در فرآیندهای حرارتی مانند احتراق سوخت، انتقال حرارت و فرآیندهای شیمیایی هدر می‌رود، که بخش زیادی از این انرژی در صورت استفاده مجدد قابل بازیابی است [۱][۲].

۱ و ۲- نویسنده مسئول: کارشناسی ارشد، مهندسی شیمی، کارشناس فرآیند و انرژی

۲- استادیار، مهندسی شیمی، مدیرعامل

۳- کارشناسی ارشد، مدیریت فناوری، مسئول توسعه کسب و کار

مفهوم بازیابی حرارت اتلافی^۱ به معنای استفاده مجدد از انرژی حرارتی است که در فرآیندهای صنعتی به هدر می‌رود. این انرژی معمولاً از منابعی همچون کوره‌ها، توربین‌های نیروگاهی، موتورهای احتراقی، فرآیندهای شیمیایی و حتی سیستم‌های تهویه و سرمایش تولید می‌شود. بازیابی این انرژی از طریق سیستم‌های مختلفی مانند تبادل حرارتی، ذخیره‌سازی انرژی و سیستم‌های ترمودینامیکی ویژه انجام می‌شود. اهمیت این فرآیند در آن است که در بسیاری از صنایع، این انرژی هدر رفته می‌تواند مجدداً برای تولید برق، گرمایش یا سرمایش و یا بهبود کارایی فرآیندها استفاده شود [۲].

در واقع، بازیابی حرارت اتلافی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای دستیابی به بهره‌وری بیشتر انرژی و کاهش اثرات منفی زیست‌محیطی در نظر گرفته می‌شود. یکی از چالش‌های اصلی در این حوزه، ذخیره‌سازی و انتقال حرارت است. به‌ویژه در صنایع بزرگ که معمولاً در مکان‌هایی دور از مصرف‌کنندگان نهایی قرار دارند، انتقال انرژی حرارتی به‌طور مؤثر می‌تواند دشوار باشد. در این راستا، استفاده از فناوری‌های پیشرفته‌ای مانند سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارت (TES)^۲ و همچنین مواد تغییر فاز دهنده (PCM)^۳، به‌عنوان راه‌حلی برای بهینه‌سازی فرآیند بازیابی حرارت و ذخیره‌سازی آن در دماهای بالا یا پایین، مورد توجه قرار گرفته است [۱][۲].

از سوی دیگر، توسعه و پیاده‌سازی فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی در صنایع مختلف نه تنها موجب کاهش هزینه‌های انرژی می‌شود، بلکه به‌طور مستقیم به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، به ویژه کربن دی‌اکسید (CO₂)، که یکی از عوامل اصلی تغییرات اقلیمی است، کمک می‌کند [۲].

با افزایش تقاضا برای انرژی و فشارهای فزاینده به‌منظور کاهش اثرات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، بازیابی و استفاده مجدد از حرارت اتلافی در صنایع یکی از راهکارهای کلیدی برای دستیابی به اهداف توسعه پایدار، اقتصاد کم‌کربن و کاهش وابستگی به منابع فسیلی است. به‌ویژه با توجه به اینکه انرژی‌های تجدیدپذیر مانند خورشیدی و بادی هنوز در بسیاری از مناطق در دسترس نیستند، بازیابی حرارت اتلافی به‌عنوان یک منبع انرژی در دسترس و اقتصادی، نقش ویژه‌ای در بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی ایفا می‌کند.

در این مقاله، به بررسی فناوری‌های نوین و روش‌های مختلف برای بازیابی حرارت اتلافی در صنایع پرداخته خواهد شد و اهمیت این فناوری‌ها در کاهش هزینه‌ها، بهبود کارایی انرژی و تحقق اهداف زیست‌محیطی تحلیل می‌شوند. همچنین، تأثیر این فرآیندها بر کاهش انتشار کربن و دستیابی به یک اقتصاد پایدار و کم‌کربن مورد بحث قرار خواهد گرفت.

¹ Waste heat recovery (WHR)

² Thermal energy storage (TES)

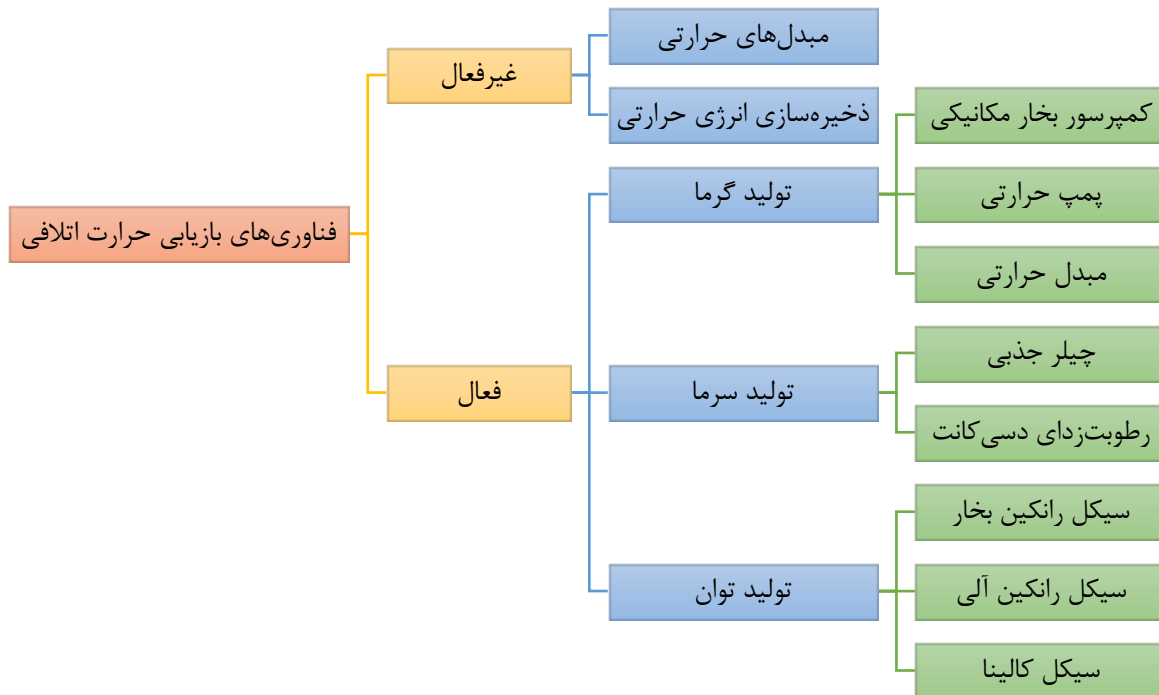
³ Phase change material (PCM)

۲. فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی

حرارت اتلافی معمولاً انرژی مرتبط با جریان‌های اتلافی هوا، گازهای خروجی و یا مایعاتی است که از محدوده‌های تأسیسات صنعتی خارج شده و وارد محیط‌زیست می‌شوند. بازیابی حرارت اتلافی که شامل روش‌هایی برای جمع‌آوری و استفاده مجدد از حرارت از دست رفته است، یکی از تکنولوژی‌های کلیدی در بهبود بهره‌وری انرژی و کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی است. هرچند که هدررفت حرارت از فرآیندهای صنعتی و عملکرد نیروگاه‌ها ممکن است اجتناب‌ناپذیر باشد، اما جریان‌های مختلف حرارتی تولید شده می‌توانند به‌عنوان ورودی برای سیستم‌های گرمایشی، سرمایشی یا تولید برق استفاده شوند. با این حال، درجه حرارت انرژی اتلافی باید با دقت در انتخاب تکنولوژی‌های بازیابی حرارت مورد توجه قرار گیرد، چرا که هر تکنولوژی بازیابی در دامنه‌های دمایی خاصی عملکرد بهینه دارد. به طور معمول، انرژی حرارتی اتلافی به سه دسته اصلی تقسیم می‌شود: ۱- دامنه دمایی پایین (کمتر از 100°C)، ۲- دامنه دمایی متوسط (100°C - 300°C) و ۳- دامنه دمایی بالا (بیشتر از 300°C) [۳]. انتخاب تکنولوژی مناسب به دمای حرارت اتلافی و تقاضاهای مصرف‌کنندگان بستگی دارد. مطابق با شکل ۱، سیستم‌های ذخیره‌سازی حرارتی مانند مبدل‌های حرارتی به‌عنوان تکنولوژی‌های بازیابی حرارت غیرفعال^۱ شناخته می‌شوند، در حالی که تکنولوژی‌های بازیابی حرارت که انرژی حرارتی را به سایر اشکال انرژی تبدیل می‌کنند، به‌عنوان تکنولوژی‌های فعال^۲ طبقه‌بندی می‌شوند [۴]. انتخاب این تکنولوژی‌ها بستگی به این دارد که آیا حرارت به‌طور مستقیم در همان دما یا دمای پایین‌تر بازیابی می‌شود یا به شکلی دیگر به انرژی تبدیل و یا دما ارتقا می‌یابد.

¹ Passive

² Active



شکل ۱- دسته‌بندی فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی [۱][۲]

در بسیاری از مواقع، استفاده مجدد از حرارت اتلافی به‌عنوان ورودی انرژی در فرآیندهای گرمایش یا سرمایش در محل، از نظر اقتصادی به‌صرفه‌تر است. با این حال، این روش‌ها معمولاً با مشکلاتی مانند ذخیره‌سازی و مسافت انتقال مواجه هستند و به ندرت در مواردی که مسافت و هدف مناسب برای استفاده در خارج از محل باشد، مورد استفاده قرار می‌گیرند. در این موارد، سیستم‌های تبدیل حرارت به برق (WHP) ممکن است گزینه اقتصادی جذابی باشند، به‌ویژه زمانی که دمای منبع حرارت بالای ۱۵۰ درجه سانتی‌گراد باشد. این سیستم‌ها به دلیل مزیت‌های منحصر به‌فرد خود در استفاده از چرخه‌های مختلف، می‌توانند به منابع حرارتی با دمای متوسط و پایین برای تولید برق تطبیق پیدا کنند. همچنین، ارتقاء حرارت ممکن است در برخی مواقع بسته به اختلاف دما و هزینه‌های سوخت و برق، مقرون به‌صرفه باشد. برای بارهای حرارتی که دمای آن‌ها اندکی بالاتر از دمای منبع حرارتی اتلافی است، ممکن است استفاده از پمپ حرارتی به‌جای سوزاندن سوخت‌های فسیلی اضافی، کاراتر باشد [۲].

۲.۱. فناوری‌های تولید توان از بازیابی حرارت اتلافی

با استفاده از چرخه‌های ترمودینامیکی، طبق شکل ۲، بازیابی انرژی از منابع حرارتی اتلافی می‌تواند به‌طور مستقیم به تولید انرژی الکتریکی منتهی شده و کارایی انرژی یک فرآیند را بهبود بخشد. پنج چرخه ترمودینامیکی برای بازیابی حرارت زائد به‌طور گسترده استفاده می‌شوند که شامل چرخه‌های فلش سه‌جانبه (TFC)^۱، چرخه CO₂ بحرانی (T-)،

^۱ Trilateral Flash cycle (TFC)

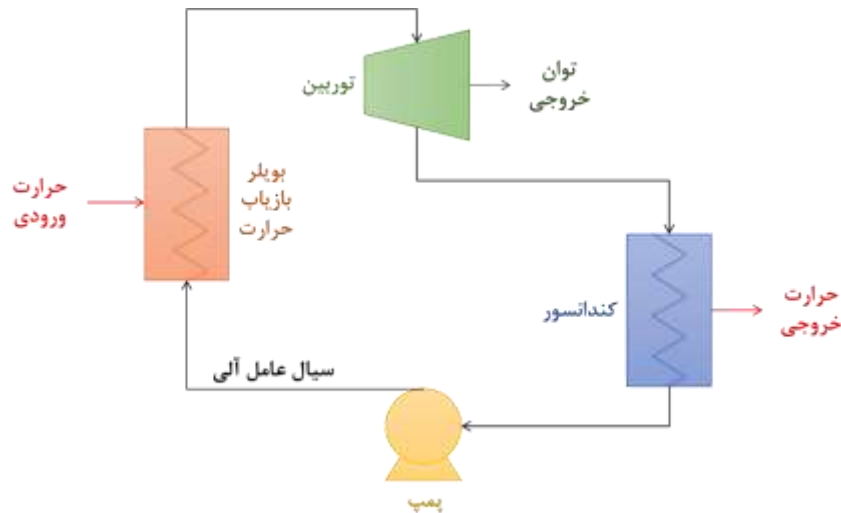
CO_2 ^۱، چرخه رانکین بخار (SRC)^۲، چرخه کالینا (KC)^۳ و چرخه رانکین آلی (ORC)^۴ هستند. در مقایسه با دیگر سیستم‌ها، چرخه کالینا پیچیده، حجیم، مستعد خوردگی و به‌طور کلی گران‌تر است. سیستم‌های T-CO₂ با مشکلاتی مانند عدم تطابق انبساط دو فازی و پیچیدگی در خنک‌سازی زیر دمای محیط روبه‌رو هستند. در حالی که انبساط دو فازی در چرخه TFC محدودیت‌هایی برای کاربردهای عملی آن ایجاد می‌کند. در مقابل، چرخه ORC به‌طور کلی ساختار ساده‌تری دارد، بسیار قابل اعتماد است، نگهداری و اصلاح آن آسان است و به‌طور مؤثر می‌تواند به منابع حرارتی مختلف تطبیق یابد [۲][۵].

¹ Trans-critical CO₂ cycle (T-CO₂)

² Steam Rankine cycle (SRC)

³ Kalina cycle (KC)

⁴ Organic Rankine cycle (ORC)



شکل ۲- شماتیک کلی از پکیج بازیابی حرارت اتلافی

۲.۱.۱. چرخه رانکین آلی (ORC)

چرخه رانکین آلی (ORC) یک فناوری تبدیل حرارت به توان است که از قرن نوزدهم برای بهره‌برداری از منابع حرارتی با دمای پایین (بین ۸۰ تا ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد) استفاده می‌شود و دامنه دمایی آن با پیشرفت‌های جدید گسترش یافته است [۶]. ORC یک فناوری بالغ، مناسب و تجاری است که در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و حفظ ذخایر سوخت‌های فسیلی با بهبود کارایی انرژی از منابع حرارتی کم‌قدرت و دمای پایین نقش مؤثری ایفا می‌کند [۷]. این فناوری می‌تواند برای بازیابی حرارت از فرآیندهای صنعتی مختلف و تولید انرژی در مقیاس‌های ۱۰ کیلووات تا ۱۰ مگاوات استفاده شود.

ORC به‌ویژه برای منابع حرارتی با دمای پایین مفید است و نسبت به چرخه رانکین بخار مزایای قابل توجهی دارد، زیرا از سیالات آلی با نقطه جوش پایین برای بازیابی حرارت اتلافی در دماهای کمتر از ۳۰۰ درجه سانتی‌گراد استفاده می‌کند [۸]. این ویژگی باعث می‌شود که ORC برای بازیابی حرارت در صنایع فرآیندی، نیروگاه‌های با توان کمتر از ۲۰ مگاوات و منابع حرارتی زمین‌گرمایی^۱ مناسب باشد.

¹ Geothermal

۲.۱.۲. چرخه کالینا (KC)

چرخه کالینا توسط الکساندر کالینا در اوایل دهه ۱۹۸۰ به‌عنوان یک چرخه ترمودینامیکی مبتنی بر ترکیب مایع دوگانه آمونیاک و آب معرفی شد [۹]. این چرخه به‌ویژه برای دماهای بین ۹۳ درجه سانتی‌گراد تا ۵۳۸ درجه سانتی‌گراد مناسب است و نسبت به چرخه رانکن آلی (ORC)، ۱۵-۲۵ بهره‌وری بیشتری در جذب حرارت در تبخیرکننده و دفع آن در کندانسور دارد. با این حال، این سیستم نیاز به دماهای بالاتری برای انتقال حرارت بهینه دارد و همچنین سیال کاری آن پتانسیل خوردگی بالایی دارد. علاوه بر این، چرخه کالینا به تجهیزات اضافی مانند جذب‌کننده و جداکننده نیاز دارد و توربین آن باید طراحی چندمرحله‌ای یا سرعت چرخشی بالایی داشته باشد. این ویژگی‌ها باعث پیچیدگی و هزینه‌های بالاتر این سیستم نسبت به ORC می‌شود. با این وجود، تحقیقات نشان می‌دهند که چرخه کالینا می‌تواند ۳٪ بیشتر از ORC برق تولید کند، اما ORC به دلیل سادگی ساختار و نیاز به نگهداری کمتر، به‌عنوان فناوری بالغ‌تر در صنعت شناخته می‌شود [۲].

سیالات کاری آلی با نقطه جوش پایین در ORC به‌کار می‌روند و بعد از افزایش فشار در پمپ، وارد تبخیرکننده می‌شوند. سیال تبخیر شده از یک اکسپندر عبور کرده و پس از آن به کندانسور می‌رود تا خنک شده و دوباره به مایع تبدیل شود. سیستم‌های ORC معمولاً برای بازیابی حرارت اتلافی از توربین‌های گازی، ایستگاه‌های کمپرسور و صنایع فلزی استفاده می‌شوند. از چالش‌های اصلی در استفاده گسترده از ORC، دوره بازگشت سرمایه طولانی است [۱].

۲.۲. فناوری‌های تولید گرمای مفید از بازیابی حرارت اتلافی

فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی به گرما، با استفاده از انرژی حرارتی اتلافی فرآیندها، بدون نیاز به ورودی سوخت اضافی، گرمای مفید تولید می‌کنند. این فناوری‌ها می‌توانند با زمان بازگشت سرمایه کوتاه (حدود دو سال) در کاهش مصرف انرژی صنعتی، هزینه‌ها و اثرات زیست‌محیطی مرتبط مؤثر باشند. فناوری‌های مختلف عبارتند از: ژنراتور توربین گاز، پمپ‌های حرارتی^۱، ترانسفورماتورهای حرارتی^۲، لوله‌های حرارتی^۳، چرخ‌های حرارتی^۴، بویلرهای میعانی^۵ و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی [۲].

¹ Heat pump

² Heat transformers

³ Heat pipe

⁴ Thermal wheel

⁵ Condensing boiler

۲.۳. فناوری‌های تولید سرمای مفید از بازیابی حرارت اتلافی

بازیابی حرارت اتلافی به سرمایش از مبدل حرارتی برای بازیابی انرژی از گازهای خروجی موتورهای احتراقی و استفاده از این حرارت در فناوری جذب بخار برای سرمایش فضاهایی مانند تهویه مطبوع و یخچال‌سازی استفاده می‌کند. در ژنراتورهای الکتریکی، حدود ۷۰٪ از انرژی سوخت در گازهای خروجی هدر می‌رود، بنابراین استفاده از این حرارت اتلافی برای تأمین سرمایش می‌تواند صرفه‌جویی قابل توجهی در انرژی و هزینه‌ها به همراه داشته باشد. چیلر جذبی^۱، چیلر جذب سطحی^۲ و رطوبت‌زدای دسی‌کانت^۳، از جمله فناوری‌هایی هستند که برای سرمایش با استفاده از بازیابی حرارت اتلافی استفاده می‌شوند [۲].

¹ Absorption chiller

² Adsorption chiller

³ Desiccant dehumidifier

۳. کاربردهای فناوری‌های تولید توان از بازیابی حرارت

سیستم‌های تولید توان از بازیابی حرارت در زمینه‌های متعددی مانند حرارت اتلافی، زمین‌گرمایی، زیست‌توده، خورشیدی و تولید همزمان برق و حرارت (CHP)^۱ کاربرد دارند. این فناوری‌ها، با تبدیل حرارت غیرقابل استفاده به انرژی مفید، می‌توانند بهره‌وری انرژی را به میزان قابل توجهی افزایش دهند.

با توجه به حجم بالای حرارت اتلافی در صنایع مختلف (جدول ۱)، از جمله کارخانه‌های فولاد، شیشه، سیمان، ایستگاه‌های تولید توان مانند موتورهای دیزلی و گازی، توربین‌ها، ایستگاه‌های تقویت فشار گاز، کوره‌ها و همچنین گرمای خروجی از نیروگاه‌ها، پتروشیمی‌ها و صنایع شیمیایی و غذایی، استفاده از فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی از پتانسیل قابل توجهی برای کاربردهای صنعتی برخوردار است.

علاوه بر این، منابع حرارتی پایدار مانند انرژی خورشیدی، زمین‌گرمایی و زیست‌توده نیز فرصت‌های زیادی برای تولید توان از حرارت فراهم می‌کنند. این منابع، با بهره‌گیری از فناوری‌های پیشرفته بازیابی حرارت، می‌توانند به‌عنوان یک راهکار پایدار برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش اثرات زیست‌محیطی استفاده شوند.

¹ Combined heat and power (CHP)

جدول ۱- دمای حرارت اتلافی از برخی فرآیندهای صنعتی [۲]

دما (°C)	تولید فلزات اساسی
۱۴۵۰ - ۱۵۵۰	آهن و فولاد
۱۳۷۰ - ۱۶۵۰	کوره قوس الکتریکی فولاد
۱۳۷۰ - ۱۶۵۰	کوره پالایش نیکل
۱۱۰۰ - ۱۲۰۰	کوره آلومینیوم
۷۶۰ - ۸۲۰	کوره پالایش مس
دما (°C)	تولید مواد معدنی غیرفلزی
۱۴۵۰	سینترینگ سیمان
۱۳۰۰ - ۱۵۴۰	کوره ذوب شیشه
۹۰۰	کلسیناسیون سنگ آهک در کوره
۶۰۰ - ۸۰۰	کلسیناسیون منیزیا
۴۵۰ - ۶۲۰	کوره سیمان
۱۷۷ - ۲۳۲	هوای اتلافی خنک‌کن کلینکر
۳۸۲ - ۸۱۶	دودکش سیستم کوره / پیش‌گرم کن
دما (°C)	سایر فرآیندهای صنعتی
۱۲۰۰ - ۱۹۰۰	فرآیند تولید دوده
۵۱۰	واکنش کاتالیستی آمونیاک
۲۸۸ - ۳۴۳	دپلمریزاسیون رنگ و لاک
۹۰ - ۲۰۰	پلاستیک و لاستیک

۴. مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی بازیابی حرارت اتلافی

فرآیندهای صنعتی عمده به‌شدت انرژی‌بر هستند و بازیابی حرارت اتلافی برای تولید انرژی می‌تواند مزایای قابل‌توجهی در کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای داشته باشد. سیستم‌های کارآمد بازیابی انرژی، علاوه بر کاهش هزینه‌ها، به افزایش پایداری و بهبود بهره‌وری انرژی کمک می‌کنند [۲].

مزایای اقتصادی WHR شامل بهبود قابل‌توجه در کارایی استفاده از انرژی در نیروگاه‌ها و صنایع فرآیندی است که منجر به افزایش بهره‌وری و پایداری انرژی و صرفه‌جویی در هزینه‌های انرژی می‌شود و صنایع می‌توانند وابستگی به سوخت‌های فسیلی را کاهش دهند. همچنین هزینه‌های عملیاتی و بهره‌برداری در صنایع بزرگ مانند سیمان و فولاد کاهش می‌یابند. صنایع مربوطه می‌توانند با فروش حرارت و برق پاک تولیدی، کسب درآمد کنند و با دریافت گواهی کربن به دلیل کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، از پرداخت جرایم زیست‌محیطی معاف شوند. توسعه پروژه‌های بازیابی حرارت نیازمند نیروی کار متخصص در حوزه‌های طراحی، نصب، و نگهداری سیستم‌هاست. با تأمین برق و حرارت مورد نیاز فرآیند از طریق بازیابی حرارت اتلافی، وابستگی به شبکه‌های خارجی کاهش می‌یابد. با تولید برق از منابع حرارت اتلافی، علاوه بر صرفه‌جویی در مصرف گاز، به کاهش ناترازی برق و گاز در کشور کمک می‌شود.

مزایای زیست‌محیطی این فناوری شامل کاهش نرخ بهره‌برداری از منابع محدود، کاهش حرارت و انتشار گازهای گلخانه‌ای مانند CO₂ به سطوح قابل‌تحمل و در نتیجه، ارتقای پایداری محیط زیست است. افزایش بهره‌وری باعث کاهش تقاضا برای استخراج و مصرف سوخت‌های فسیلی می‌شود. هر واحد برق تولیدشده از حرارت اتلافی، معادل کاهش انتشار چندین تن کربن‌دی‌اکسید در سال است. با کاهش آلاینده‌های ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی، تأثیر مثبتی بر کیفیت هوای محیطی دارد.

بهبود اندک در بازدهی نیروگاه‌های بزرگ می‌تواند تأثیرات شگرفی در کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و مصرف سوخت داشته باشد. به‌عنوان مثال، افزایش ۰.۱٪ در بازدهی نیروگاه‌های احتراقی بزرگ می‌تواند منجر به کاهش ۱۰۰ تا ۱۵۰ تن انتشار CO₂ در سال شود [۲].

۵. چالش‌ها و چشم‌اندازهای بازیابی حرارت اتلافی

۵.۱. چالش‌ها و موانع

با وجود پتانسیل‌های بالای فناوری‌های WHR، موانعی در مسیر اجرای صنعتی آن‌ها وجود دارد که شامل مسائل فنی، اقتصادی، تجاری و سیاست‌گذاری می‌شوند [۲]. این موانع عبارتند از:

۵.۱.۱. موانع فنی و اقتصادی

- ماهیت متناوب و غیرقابل پیش‌بینی منابع حرارت اتلافی
- ویژگی‌های خاص منابع حرارتی مانند دما و آلاینده‌ها
- کمبود اطلاعات و داده‌های مرتبط
- فقدان مهارت‌های فنی و تجربه کافی در سطح جهانی
- پیچیدگی و هزینه بالای ادغام سیستم‌های WHR با فرآیندهای موجود
- موقعیت جغرافیایی کاربران انرژی (محلی یا خارج از سایت)
- رقابت با گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر
- سرمایه‌گذاری اولیه بالا و دوره بازگشت سرمایه طولانی
- نبود بازارهای پایدار تجارت کربن
- افزایش نیاز به سیستم‌های ذخیره‌سازی و انتقال حرارت به دلیل فاصله زیاد بین محل تولید حرارت اتلافی و مصرف‌کنندگان و نوسانات تقاضا
- اندازه بزرگ و زمان راه‌اندازی طولانی تجهیزات حرارت‌محور

۵.۱.۲. موانع تجاری

- تمایل پایین برای سرمایه‌گذاری در پروژه‌هایی که تولید و درآمد را مستقیماً افزایش نمی‌دهند
- ریسک بالا و عدم قطعیت در پروژه‌ها
- دوره‌های بازگشت سرمایه طولانی و انتظارات از نرخ بازگشت سرمایه بالا

- مشکلات در تأمین مالی پروژه‌ها
- عدم آگاهی از مزایا و فرصت‌های فناوری‌های WHR

۵.۱.۳. موانع سیاسی و قانونی

- نبود سیاست‌های حمایتی و مشوق‌های مالی مناسب برای فناوری‌های WHR
- عدم تطبیق سیاست‌های جهانی در سطح ملی
- عدم تجربه کافی در طراحی و اجرای سیستم‌های WHR به‌ویژه در کشورهای در حال توسعه، یکی از موانع اصلی در بهره‌برداری مؤثر از این فناوری‌ها است [۲].

۵.۲. چشم‌اندازها

برای توسعه و استفاده بهینه از سیستم‌های WHR در راستای توسعه پایدار جهانی، راهکارهای زیر پیشنهاد می‌شوند:

- افزایش تحقیقات در زمینه توسعه و کاربرد سیستم‌های WHR
- ارائه مشوق‌ها و تسهیلات مالی برای اجرای این سیستم‌ها
- بومی‌سازی سیاست‌های جهانی برای استفاده کارآمد از انرژی در بخش‌های صنعتی و نیروگاهی
- افزایش آگاهی عمومی و اعتماد به فناوری‌های پایدار
- انتقال فناوری از کشورهای پیشرفته به کشورهای در حال توسعه
- ارائه تکنولوژی‌های جدید و چرخه‌های پیشرفته مانند S-CO₂ با کارایی حرارتی بالاتر
- افزایش بهره‌وری سیستم‌های جذب و رطوبت‌زدایی با توسعه مواد جاذب جدید و پیشرفته
- کمک به کاهش کربن و تضمین توازن عرضه و تقاضا با استفاده از فناوری‌های ذخیره‌سازی بهبودیافته
- تسریع توسعه فناوری‌های بازیابی حرارت با حمایت‌های دولتی، سیاست‌های پایدار و بازارهای تجارت کربن

۶. وضعیت انرژی در ایران

۶.۱. قوانین مرتبط با توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در ایران

توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان یکی از راهبردهای کلیدی در کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و کاهش اثرات زیست‌محیطی، در قوانین مختلف ایران مورد تأکید قرار گرفته است. برخی از این قوانین عبارتند از:

ماده (۶۲) قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت (۱۳۸۰)، که نرخ خرید تضمینی برق از منابع انرژی‌های نو را تعیین کرده و چارچوبی برای حمایت از سرمایه‌گذاری در این حوزه ارائه می‌دهد [۱۰]. در ادامه، ماده (۸) قانون هدفمند کردن یارانه‌ها (۱۳۸۸) نیز استفاده از وجوه هدفمندی برای توسعه تولید برق از منابع تجدیدپذیر را مجاز دانسته است [۱۱].

ماده (۶۱) قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی (۱۳۸۹) صنایع را ملزم به عقد قراردادهای بلندمدت خرید تضمینی برق تجدیدپذیر از محل ارزش سوخت صرفه‌جویی شده کرده است [۱۲]، و ماده (۵) قانون حمایت از صنعت برق (۱۳۹۴) منابع مالی مورد نیاز برای تولید برق تجدیدپذیر و پاک را از محل عوارض برق تأمین می‌کند [۱۳].

در راستای بهبود زیرساخت‌های مالی، ماده (۱۲) قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر (۱۳۹۴) تأمین مالی طرح‌های تجدیدپذیر را از محل صرفه‌جویی مصرف سوخت ممکن ساخته است [۱۴]. همچنین، ماده (۵۰) قانون برنامه ششم توسعه (۱۳۹۶) و ماده (۱۹) قانون هوای پاک (۱۳۹۶) هدف‌گذاری‌هایی برای افزایش ظرفیت نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تأمین ۳۰٪ از افزایش ظرفیت برق سالانه از انرژی‌های نو ارائه کرده‌اند [۱۵][۱۶].

ماده (۴) و (۵) قانون مانع‌زدایی از توسعه صنعت برق (۱۴۰۱) صنایع را به احداث ۱۰۰۰ مگاوات نیروگاه‌های تجدیدپذیر و تأمین منابع مالی خرید تضمینی برق از محل گواهی صرفه‌جویی سوخت ملزم کرده است [۱۷]. در نهایت، ماده (۱۶) قانون جهش تولید دانش‌بنیان (۱۴۰۱) تأکید دارد که صنایع با مصرف بالای یک مگاوات باید ۱٪ از برق مورد نیاز خود را از طریق نیروگاه‌های تجدیدپذیر تأمین کنند و این سهم باید طی پنج سال به حداقل ۵٪ برسد، در غیر این صورت برق مصرفی با تعرفه تجدیدپذیر محاسبه خواهد شد [۱۸].

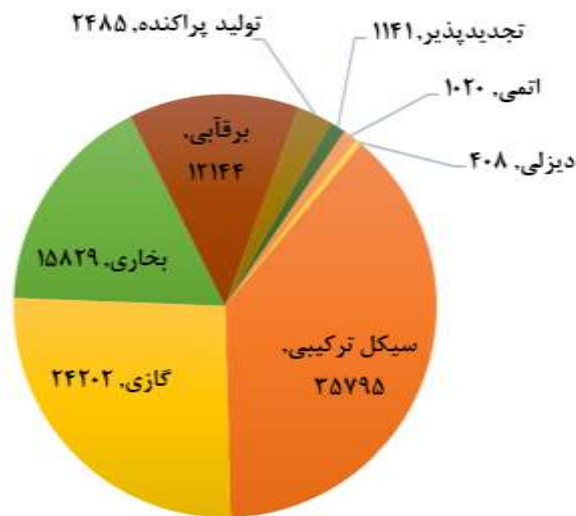
این قوانین با ایجاد چارچوب‌های حمایتی و الزام‌آور، نقش مهمی در تسریع توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر و حرکت به سمت پایداری زیست‌محیطی ایفا می‌کنند.

۶.۲. ناترازی‌های انرژی و بحران صنعت برق

در دهه اخیر، ناترازی‌های گسترده در بخش‌های مختلف انرژی کشور از جمله بنزین، برق، گاز و آب، به دلیل ناکارآمدی در نظام حکمرانی و تشدید تحریم‌های بین‌المللی آشکار شده است. این ناترازی‌ها که ناشی از رشد سریع‌تر تقاضا نسبت به تولید است، ابعاد اقتصادی، اجتماعی و امنیتی نگران‌کننده‌ای به همراه داشته است.

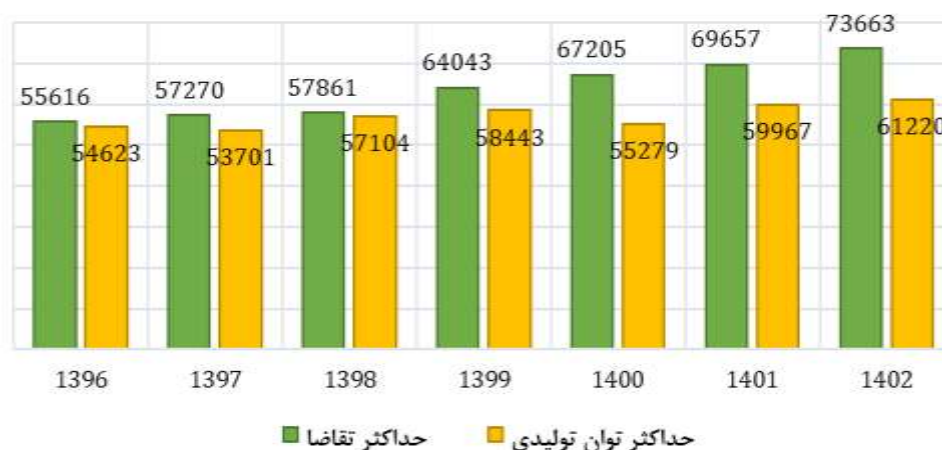
در صنعت برق، علیرغم تلاش‌ها برای مدیریت مصرف و افزایش تولید، نتایج قابل توجهی حاصل نشده و بحران ناترازی همچنان در حال گسترش است. حل این مسئله نیازمند برنامه‌ریزی جامع برای افزایش تولید و بهینه‌سازی مصرف انرژی است؛ در غیر این صورت، پیش‌بینی‌ها از تشدید این بحران در آینده نزدیک حکایت دارند.

همانطور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، در حال حاضر ظرفیت تولید نیروگاه‌های کل کشور حدود ۹۳ هزار مگاوات است که نیروگاه‌های سیکل ترکیبی ۳۸.۵٪، نیروگاه‌های گازی ۲۶٪ و نیروگاه‌های بخاری ۱۷٪ ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های کشور را در اختیار دارند. علاوه بر این، نیروگاه‌های برقی نیز بیش از ۱۳٪ ظرفیت نیروگاه‌های کشور را به خود اختصاص داده‌اند. نیروگاه‌های تولید پراکنده، نیروگاه‌های تجدیدپذیر، نیروگاه اتمی و واحدهای دیزلی، در مجموع سهم ۵٪ از ظرفیت منصوبه نیروگاه‌های کشور را تشکیل می‌دهند.



شکل ۳- ظرفیت تولید برق به تفکیک نوع نیروگاه‌های کشور (مگاوات) [۱۹]

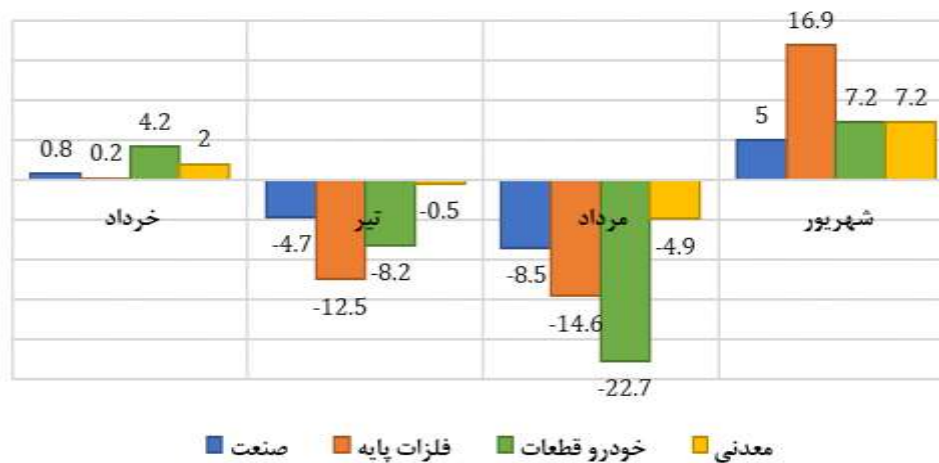
ظرفیت نیروگاهی کشور در دهه ۸۰ سالانه به‌طور متوسط ۱۲.۵٪ رشد داشته، اما این نرخ در ۱۰ سال گذشته به ۳.۵٪ کاهش یافته است. در دوره ۱۳۹۶-۱۴۰۲، رشد ظرفیت نامی سالانه ۲.۹٪ بوده و ظرفیت از ۷۸.۸ هزار مگاوات در سال ۱۳۹۶ به ۹۲.۸ هزار مگاوات در سال ۱۴۰۲ رسیده است. طبق قانون برنامه هفتم توسعه، هدف‌گذاری برای ظرفیت ۱۲۴ هزار مگاوات است که ۱۲ هزار مگاوات از انرژی تجدیدپذیر و ۳ هزار مگاوات از انرژی هسته‌ای تأمین می‌شود که به معنی اختصاص دادن ۴۰٪ ظرفیت نیروگاه‌های جدید، به نیروگاه‌های غیرفسیلی است. همان‌گونه که در شکل ۴ قابل مشاهده است، شکاف میان حداکثر تقاضا و حداکثر قدرت تأمین شده در سال‌های اخیر همواره در حال افزایش بوده است به‌گونه‌ای که از کمتر از ۱۰۰۰ مگاوات در سال ۱۳۹۶ به بالغ بر ۱۲ هزار مگاوات در سال ۱۴۰۲ افزایش یافته و در تابستان ۱۴۰۳ از مرز ۱۷ هزار مگاوات گذشته است.



شکل ۴- حداکثر نیاز تقاضا و حداکثر توان تولیدی طی سال‌های ۱۳۹۶ تا ۱۴۰۲ (مگاوات) [۲۰]

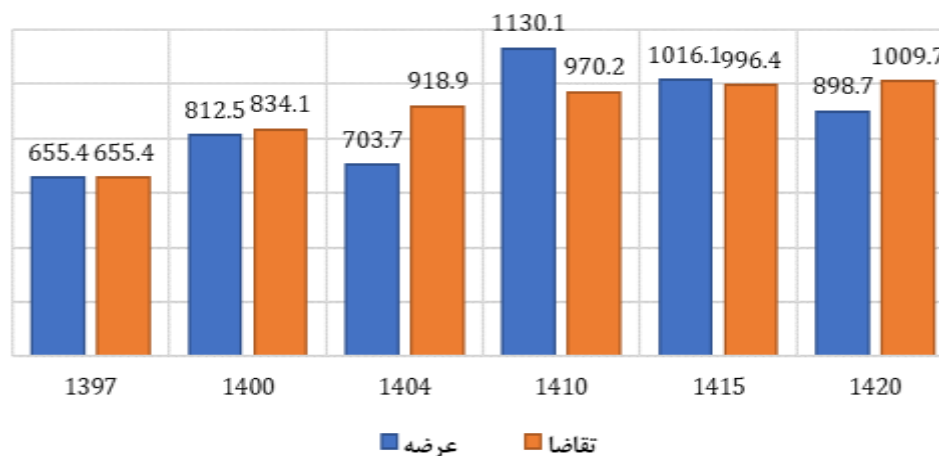
در شرایط فعلی ناترازی برق منجر به قطعی برق در ابعاد قابل توجهی شده است. به همین دلیل نیز صنایع بزرگ کشور عموماً اقدام به تأسیس نیروگاه برق نموده‌اند. این قطعی تبعات قابل توجه اقتصادی نیز در پی داشته است، به‌گونه‌ای

که خسارت قطعی برق صنایع در تابستان سال ۱۴۰۳ حدود ۲۰ میلیارد دلار معادل ارزش محصول از دست رفته صنایع برآورد شده است. طبق شکل ۵، بررسی شاخص تولید شرکت‌های بورسی صنعتی و معدنی در دوره‌های اجرای طرح‌های مدیریت مصرف، حاکی از کاهش قابل توجه شاخص تولید به‌ویژه در صنایع خودرو و قطعات و فلزات پایه است.



شکل ۵- رشد شاخص تولید نسبت به ماه قبل -۱۴۰۲ [۲۱]

در حال حاضر ۸۱٪ سوخت مصرفی نیروگاه‌های کشور از گاز تأمین می‌شود و سهم نیروگاه‌های کشور از گاز مصرفی ۲۹٪ است. همین امر منجر به وابستگی به گاز در تأمین برق کشور شده، به‌گونه‌ای که ناترازی گاز منجر به ناترازی برق در کشور خواهد شد. در این شرایط دیگر مسأله ناترازی برق، تنها امری مختص به اوج گرما در فصل تابستان نخواهد بود و در زمان اوج مصرف گاز در فصل زمستان نیز کشور دچار ناترازی برق از مسیر عدم تخصیص سوخت مورد نیاز نیروگاه‌های تولید برق خواهد شد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است، ناترازی گاز در دهه آتی تشدید خواهد شد و در افق ۱۴۲۰ به ۱۱۱ میلیارد مترمکعب بالغ خواهد گردید و لذا ناترازی برق نیز رو به وخامت خواهد بود.



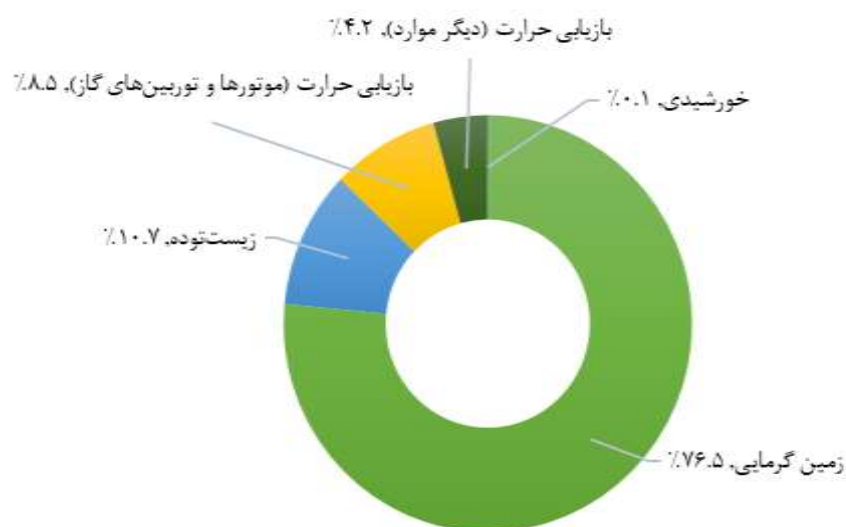
شکل ۶- تراز گازی کشور در افق ۱۴۲۰ [۲۲]

تقاضای برق در سال ۱۴۰۲ نسبت به سال ۱۳۹۰، ۷۴٪ و نسبت به سال ۱۳۹۶، ۳۲٪ افزایش یافته است. رشد متوسط تقاضای برق در دوره ۱۳۹۶-۱۴۰۲ حدود ۵.۴٪ بوده است. مصرف برق در سال ۱۴۰۲ به ترتیب شامل صنعت (۳۳٪)، خانگی (۲۹٪)، کشاورزی (۲۳٪)، عمومی (۸٪)، و سایر مصارف (۷٪) بوده است [۲۱]. در دهه اخیر عدم توسعه نیروگاه‌ها متناسب با تقاضای برق، منجر به شکل‌گیری بحران فعلی ناترازی برق گردیده است. در ۱۵ سال گذشته، رشد سالانه پیک مصرف برق ۵٪ بوده، اما توسعه نیروگاه‌ها به دلیل محدودیت منابع مالی و سوخت کافی نبوده است. برای رفع ناترازی، لازم است نیروگاه‌های جدید ساخته شوند یا نیروگاه‌های حرارتی به سیکل ترکیبی تبدیل شوند. تأمین تقاضای برق نیازمند سرمایه‌گذاری‌های کلان است و امکان جبران کمبود عرضه در کوتاه‌مدت وجود ندارد. همچنین، واردات برق به‌صورت قابل‌اتکا یا ذخیره‌سازی آن نیز عملی نیست. در نتیجه، ترمیم شکاف عرضه و تقاضا به‌سادگی امکان‌پذیر نخواهد بود. در این شرایط، تولید توان از طریق بازیابی حرارت اتلافی می‌تواند راهکاری کارآمد باشد. این فناوری با استفاده از حرارت اتلافی صنایع، بدون نیاز به سوخت اضافی و با هزینه کمتر نسبت به نیروگاه‌های جدید، بخشی از کمبود برق را جبران کرده و بهره‌وری انرژی را بهبود می‌بخشد.

۷. سوابق تولید توان از حرارت اتلافی در جهان

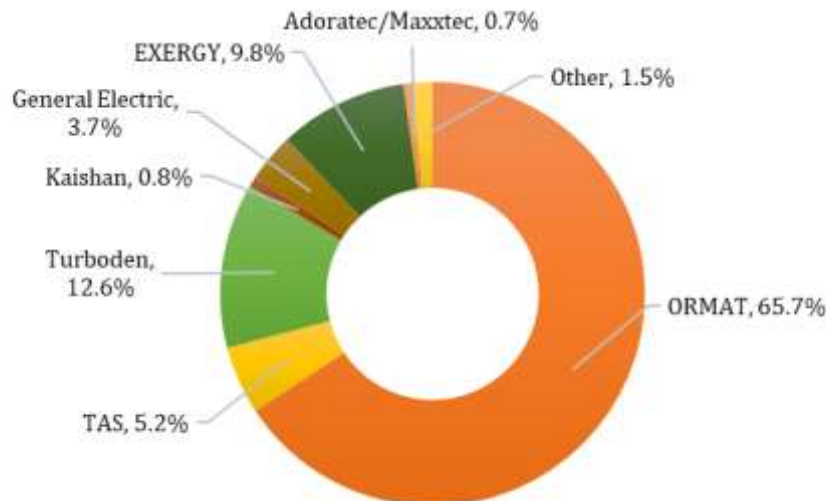
بازیابی حرارت اتلافی در جهان به‌عنوان یک راهکار پایدار برای کاهش مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، در صنایع مختلف اجرا شده است. نمونه‌ای از این موارد، استفاده از چرخه رانکین آلی (ORC) در کارخانه‌های سیمان ایتالیا برای تولید ۱۰ مگاوات برق از گازهای دودکش و کاهش ۲۰ هزار تن کربن‌دی‌اکسید در سال است که توانست بیش از ۳۰٪ از حرارت خروجی کوره‌ها را بازیابی کند. همچنین، نیروگاه‌های فولادسازی در چین با استفاده از مبدل‌های حرارتی پیشرفته توانسته‌اند بخش قابل‌توجهی از نیاز برق داخلی را تأمین کنند. این اقدامات، صرفه‌جویی اقتصادی و زیست‌محیطی چشمگیری داشته‌اند.

با توجه به شکل ۷، در سال ۲۰۱۶، ظرفیت کل نصب‌شده نیروگاه‌های ORC در جهان ۲۷۴۹.۱ مگاوات است که در ۵۶۳ نیروگاه فعال می‌باشد و ۵۲۳.۶ مگاوات دیگر نیز در ۷۵ پروژه در حال توسعه است. نیروگاه‌های زمین‌گرمایی با سهم ۷۶.۵٪، بیشترین ظرفیت را به خود اختصاص داده‌اند. پس از آن، زیست‌توده با ۱۰.۷٪ و بازیابی حرارت از توربین‌های گازی و نیروگاه‌های دیزلی هر کدام با ۸.۵٪ قرار دارند [۲۳].



شکل ۷- ظرفیت نصب شده و سهم بازار برای هر برنامه کاربردی در سال ۲۰۱۶ [۲۳]

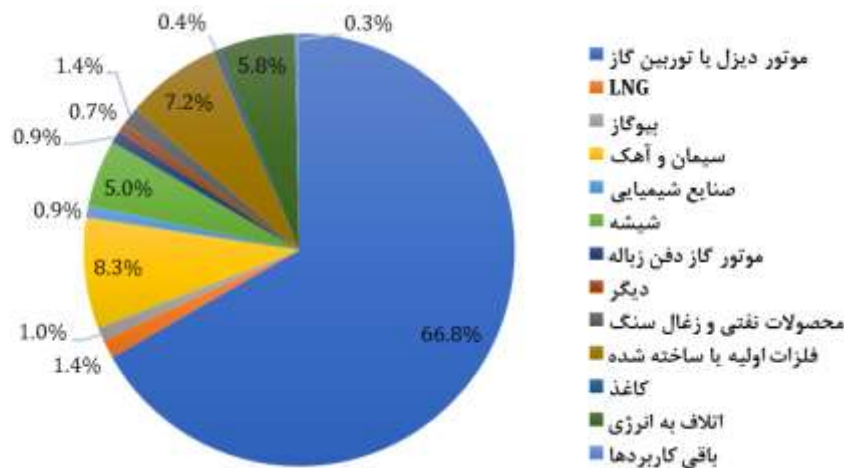
مطابق با شکل ۸، شرکت ORMAT با ۶۵.۷٪ پیشرو در این حوزه است و شرکت‌های ایتالیایی Turboden و Exergy به ترتیب ۱۲.۶٪ و ۹.۸٪ از بازار را در اختیار دارند [۲۳].



شکل ۸- ظرفیت نصب شده و سهم بازار برای هر سازنده در سال ۲۰۱۶ [۲۳]

بازار بازیابی حرارت با ۳۴۹.۱ مگاوات ظرفیت نصب‌شده و ۱۸.۵ مگاوات در حال ساخت (۱۰ پروژه) در مراحل اولیه خود قرار دارد اما از فاز نمونه‌سازی عبور کرده است. مطابق با شکل ۹، بیشترین کاربرد مربوط به بازیابی حرارت از موتورهای دیزل و توربین‌های گازی است که ۶۶.۸٪ ظرفیت (۴۱ پروژه) را تشکیل می‌دهد. این سیستم‌ها عمدتاً در ایستگاه‌های کمپرسور خطوط لوله گاز و نیروگاه‌های دیزلی نصب شده‌اند. کارخانه‌های سیمان و آهک با ۱۰ پروژه و ظرفیت کل ۲۹ مگاوات در جایگاه نخست صنایع صنعتی قرار دارند. با این حال، ظرفیت نصب‌شده در صنایع سیمان، فلزات

و شیشه همچنان بسیار پایین‌تر از پتانسیل واقعی آن‌هاست. موتورهای بیوگاز و گازهای دفنی نیز در ۳۵ پروژه، ۶.۲ مگاوات ظرفیت را به خود اختصاص داده‌اند [۲۳].



شکل ۹- کل ظرفیت نصب شده برای هر کاربرد بازیابی حرارت در سال ۲۰۱۶ [۲۳]

این بررسی نشان می‌دهد فناوری ORC در دهه‌های اخیر پیشرفت قابل‌توجهی داشته است. اگرچه نیروگاه‌های زمین‌گرمایی همچنان کاربرد اصلی از نظر توان خروجی هستند، اما در سال‌های اخیر، استفاده از زیست‌توده و بازیابی حرارت رشد چشمگیری داشته است.

نمونه‌هایی از بازیابی حرارت اتلافی در صنایع ایران وجود دارد، هرچند تعداد آنها محدود است. یکی از پروژه‌های موفق در این حوزه، اجرای سیستم بازیابی حرارت در کارخانه سیمان تهران است که از گازهای خروجی کوره‌ها برای تولید گرمای مفید جهت پیش‌گرم کردن خوراک استفاده می‌کند. این پروژه توانسته است ضمن کاهش هزینه‌های انرژی به میزان ۱۵٪، انتشار کربن دی‌اکسید را به‌طور قابل‌توجهی (حدود ۱۰ هزار تن در سال) کاهش دهد. با این حال، شایان ذکر است که تاکنون هیچ پروژه‌ای در ایران برای استفاده از حرارت اتلافی به‌منظور تولید برق با فناوری سیکل رانکین آلی، به مرحله اجرایی و عملیاتی نرسیده است. اکثر صنایع ایران هنوز از پتانسیل بازیابی حرارت به‌طور کامل بهره‌برداری نکرده‌اند، که این امر نیازمند سیاست‌های حمایتی و سرمایه‌گذاری بیشتر است.

۸. نتیجه‌گیری

گرمایش جهانی و تغییرات اقلیمی از مشکلات جدی کنونی هستند که پیامدهای جبران‌ناپذیری برای سیاره ما به همراه دارند. انرژی اولیه جهانی همچنان تحت سلطه سوخت‌های فسیلی قرار دارد و انتظار می‌رود این روند در چند دهه آینده ادامه یابد. با این حال، حدود ۶۳٪ از انرژی اولیه به دلیل ناکارآمدی در استفاده، هدر می‌رود. این موضوع فرصتی مهم برای توسعه فناوری‌های بازیابی حرارت اتلافی فراهم می‌کند که می‌تواند نقشی کلیدی در دستیابی به آینده‌ای پایدار در حوزه انرژی ایفا کند.

حرارت اتلافی موجود در شکل‌های مختلف مانند گاز/بخار فوق‌گرم، آب داغ یا مواد جامد حرارت‌دار، از بخش‌های مختلف قابل بازیابی است. استفاده از سیستم‌های مناسب بازیابی حرارت می‌تواند این انرژی را به‌طور کامل مهار کند و به تولید چندمنظوره‌ای از جمله برق، گرمایش، سرمایش و آب شرب منجر شود. در این پژوهش، فناوری‌های مختلف بازیابی

حرارت بررسی شده و مشخص شد که این فناوری‌ها، در صورت کاربرد مناسب، بهترین گزینه برای توسعه پایدار انرژی از طریق استفاده بهینه از سوخت‌های فسیلی هستند.

نتایج نشان می‌دهند که بهره‌برداری عمیق‌تر از منابع حرارت اتلافی با استفاده از فناوری‌های مناسب می‌تواند منجر به مزایای اقتصادی و زیست‌محیطی قابل توجهی شود. این مزایا شامل کاهش تقاضا برای انرژی اولیه، کاهش انتشار CO_2 و صرفه‌جویی اقتصادی است. همچنین مشخص شد که منابع قابل بازیابی حرارت و سوخت‌های فسیلی می‌توانند تا زمان تحقق شرایط لازم برای بهره‌برداری کامل از منابع انرژی تجدیدپذیر در تمامی مناطق جهان، پاسخگوی تقاضای انرژی جهانی باشند.

چالش‌های عمده در مسیر توسعه این فناوری‌ها بیشتر مرتبط با مسائل تجاری و سیاست‌گذاری است تا مسائل فنی. از این رو، نیاز فوری به سیاست‌هایی وجود دارد که ملاحظات تجاری مطلوب را تشویق کنند. این امر می‌تواند بهره‌برداری از فناوری‌های WHR را افزایش داده و به توسعه پایدار کمک کند. با توجه به اینکه سیستم‌های WHR بدون نیاز به ورودی سوخت اضافی کار می‌کنند، به نگهداری کمی نیاز دارند و دوره بازگشت سرمایه آن‌ها معمولاً کمتر از هفت سال است، لازم است تحقیقات جامع در زمینه استفاده بهینه از انرژی در کشورهای مختلف انجام شود. این مطالعات می‌توانند عمر منابع محدود سوخت فسیلی و پایداری اکوسیستم را تخمین زده و ضرورت استفاده گسترده از فناوری‌های WHR را برای توسعه پایدار تأیید کنند.

۹. قدردانی

از شرکت دانش‌بنیان انرژی پاک آروچ و شرکت انرژی طراحان همراه به‌خاطر حمایت‌های فنی، مالی و مشاوره‌ای ارزشمند در انجام این تحقیق قدردانی می‌کنم. همکاری‌های صمیمانه و پشتیبانی‌های بی‌دریغ این دو شرکت، در پیشبرد اهداف پروژه نقش بسزایی داشته است.

۱۰. مراجع

1. Chen, W., Huang, Z., & Chua, K. J. (2022). "Sustainable energy recovery from thermal processes: A review". *Energy, Sustainability and Society*, 12, 46.
2. Oyedepo, S. O., & Fakeye, B. A. (2021). "Waste heat recovery technologies: Pathway to sustainable energy development". *Journal of Thermal Engineering*, 7(1), 324–348. Yildiz Technical University Press, Istanbul, Turkey.
3. Forman, C., Muritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B. (2016). "Estimating the global waste heat potential". *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 1568–1579.
4. Brückner, S., Liu, S., Miró, L., Radspieler, M., Cabeza, L. F., & Lävemann, E. (2015). "Industrial waste heat recovery technologies: An economic analysis of heat transformation technologies". *Applied Energy*, 151, 157–167.
5. Feng, Y., Hung, T. C., Zhang, Y., Li, B., Yang, J., & Shi, Y. (2015). "Performance comparison of low-grade ORCs (organic Rankine cycles) using R245fa, pentane and their mixtures based on the thermoeconomic multi-objective optimization and decision makings". *Energy*, 93, 2018–2029.

6. Landelle, A., Tauveron, N., Revellin, R., Haberschill, P., & Colasson, S. (2017). "Experimental investigation of a transcritical organic Rankine cycle with scroll expander for low-temperature waste heat recovery". Energy Procedia, 129, 810–817.
7. Auld, A., Berson, A., & Hogg, S. (2013). "Organic Rankine cycles in waste heat recovery: A comparative study". International Journal of Low-Carbon Technologies, 8, 9–18.
8. Abadi, M., Payam, H., & Behrooz, K. (2014). "Investigation of using different fluids for use in gas turbine-Rankine cycle". 1(2), 74–81.
9. Varga, Z., & P., B. (2017). "Comparison of low temperature waste heat recovery methods". Energy, 137, 1286–1292.

۱۰. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۸۰). قانون تنظیم بخشی از مقررات مالی دولت، ماده (۶۲).

۱۱. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۸۸). قانون هدفمند کردن یارانه‌ها، ماده (۸).

۱۲. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۸۹). قانون اصلاح الگوی مصرف انرژی، ماده (۶۱).

۱۳. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۹۴). قانون حمایت از صنعت برق، ماده (۵).

۱۴. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۹۴). قانون رفع موانع تولید رقابت‌پذیر، ماده (۱۲).

۱۵. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۹۶). قانون برنامه ششم توسعه، ماده (۵۰).

۱۶. جمهوری اسلامی ایران. (۱۳۹۶). قانون هوای پاک، ماده (۱۹).

۱۷. جمهوری اسلامی ایران. (۱۴۰۱). قانون مانع‌زدایی از توسعه صنعت برق، ماده (۴) و (۵).

۱۸. جمهوری اسلامی ایران. (۱۴۰۱). قانون جهش تولید دانش‌بنیان، ماده (۱۶).

۱۹. آمار تفصیلی صنعت برق ایران. (۱۴۰۲). توانیر، ویژه مدیریت راهبردی.

۲۰. مرکز پژوهش‌های اتاق بازرگانی، صنایع، معادن و کشاورزی ایران.

۲۱. مرکز پژوهش‌های مجلس شورای اسلامی.

۲۲. سند تراز تولید و مصرف گاز طبیعی در کشور تا افق ۱۴۲۰.

23. ORC World Map, "Analysis," [Online]. Available: <https://orc-world-map.org/analysis>. Accessed: Dec. 11, 2024.