

## امکانسنجی و انتخاب فناوری تولید همزمان برق و حرارت (CHP) در صنایع؛ مطالعه موردی در واحدهای صنعتی استان همدان

صالح رازینی

استادیار مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا (نویسنده مسئول)

s.razini@basu.ac.ir

محمدحسن مرادی

استاد مهندسی برق، دانشگاه بوعلی سینا

mh\_moradi@yahoo.co.uk

### چکیده

یکی از روش‌های موثر در بهبود بهره‌وری سیستم انرژی، استفاده از فناوری تولید همزمان برق و حرارت (CHP) است که می‌تواند بازدهی انرژی را در مولدهای برق تا دو برابر افزایش دهد. برای این منظور دسترسی به بارهای حرارتی با مشخصه مناسب در محل نصب مولدها ضروری است. بسیاری از واحدهای صنعتی با تقاضای زیاد انرژی‌های الکتریکی و حرارتی مواجه هستند که می‌توانند گزینه مناسبی برای توسعه CHP باشند. در این مقاله چارچوبی نظام‌مند و کمی برای امکانسنجی نصب CHP در واحدهای صنعتی و انتخاب نوع فناوری CHP ارائه شده است. در این چارچوب با دسته‌بندی صنایع و تعریف شاخص‌های کلیدی تصمیم، به کمک تحلیل سلسله مراتبی (AHP) به امکانسنجی نصب CHP پرداخته و سپس با ارزیابی تطبیقی بین فناوری‌های CHP و فرآیندهای صنعتی، نوع فناوری مناسب برای هر فرآیند صنعتی تعیین شده است. مطالعه موردی در صنایع استان همدان با بازدید از واحدهای صنعتی منتخب صورت گرفته که نتایج بیانگر پتانسیل بالای بسیاری از صنایع برای بهره‌گیری از CHP است. همچنین براساس چارچوب پیشنهادی موتورهای رفت و برگشتی در فرآیندهای صنعتی کم دما و توربین‌های بخار بازیاب حرارت در صنایع دمای بالا، به عنوان اولویت‌های توسعه تولید همزمان پیشنهاد شده است.

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۲/۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۴/۱۲

کلمات کلیدی:

تولید همزمان برق و حرارت، بهره‌وری انرژی، تحلیل سلسله مراتبی، تقاضای صنعتی انرژی.

## ۱ مقدمه

یکی از عوامل عمده توسعه اقتصادی جوامع صنعتی، انرژی می‌باشد. پس از افزایش قیمت نفت در سال ۱۹۷۳، کشورهای پیشرفته صنعتی مجبور شدند به مساله انرژی جدی‌تر بنگرند و این امر سرآغاز برنامه‌های تحقیقاتی کوتاه مدت در زمینه صرفه جویی و بهینه سازی مصرف انرژی و برنامه‌های میان مدت و بلند مدت در زمینه پیدا نمودن منابع جدید انرژی گردید. امروزه کشورهای به بهینه سازی و مدیریت انرژی به عنوان یک منبع جدید انرژی می‌نگرند. در این میان استفاده از تولید همزمان برق و حرارت<sup>۱</sup> (CHP) یکی از راهکارهای موثر در بهینه سازی است که با هدف افزایش بازده تولید انرژی و استفاده بهینه از منابع سوخت مورد استفاده قرار می‌گیرد (رازینی و همکاران، ۱۳۹۵).

در فرآیندهای متداول تولید برق بازدهی حرارتی بسیار پایین می‌باشد و با توجه به نوع فناوری از زیر ۳۰ درصد تا حداکثر ۶۰ درصد متغیر است. این ارقام بیانگر ضرورت افزایش بهره‌وری انرژی در بخش تولید برق می‌باشد که تبدیل واحدهای نیروگاهی به CHP یکی از راهکارهای موثر در تحقق این مهم می‌باشد. در این راستا دسترسی به تقاضای حرارتی با مشخصه مناسب ضروری است. به نظر می‌رسد که در بخش‌های مختلف مصرف انرژی شامل مسکونی، تجاری، عمومی، کشاورزی و صنعتی، بخش صنعت با تقاضای حرارتی بسیار زیاد و عموماً پیوسته بیشترین ظرفیت را برای توسعه CHP دارا باشد. به طوری که در کشورهای صنعتی اکثر واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در صنایعی نظیر صنایع غذایی، کاغذسازی، شیمی، پالایشی و صنایع فلزی نصب شده که نشانگر اهمیت و کاربرد این واحدها در صنعت می‌باشد (گزارش موسسه بهره‌وری صنعتی، ۲۰۱۵). با وجود اینکه در کشور ما نیز در سالهای اخیر به موضوع تولید پراکنده توجه بیشتری نسبت به گذشته شده است ولی معمولاً از واحدهای تولید پراکنده تنها برای تولید برق استفاده شده و بهره‌برداری از آنها به صورت CHP چندان مورد استفاده قرار نگرفته است. این مساله در استان همدان بسیار جدی تر است. استان همدان با دارا بودن حدود هزار واحد صنعتی نیاز مبرمی به استفاده از فناوری تولید همزمان برق و حرارت برای افزایش بهره‌وری سیستم انرژی مخصوصاً در بخش صنعت دارد. وجود فناوری‌های فرسوده در برخی از صنایع و مصرف بالای انرژی در آنها در کنار موقعیت جغرافیایی مناسب از لحاظ میانگین دمای نسبتاً پایین قابلیت توسعه CHP در این استان را دوچندان کرده است.

در کشورهای مختلف پژوهش‌های متعددی به مطالعه تولید همزمان در صنایع مختلف از جمله صنایع غذایی (ولینی و همکاران، ۲۰۲۰)، نساجی (لیت و همکاران، ۲۰۲۱)، نیشکر و الکل (آلوارو و همکاران، ۲۰۱۸)، کاغذسازی (گامبینی و همکاران، ۲۰۱۹)، کاشی و سرامیک (برانچینی و همکاران، ۲۰۲۱) و چوب (گستاوو و همکاران، ۲۰۲۱) پرداخته‌اند. برخی مقالات نیز به کاربرد تولید همزمان در صنایع از زاویه نوع فناوری تولید همزمان نگرینسته‌اند (کرتو و کستیوکو ۲۰۲۰ و حسن و همکاران ۲۰۱۸). ارزیابی و انتخاب نوع فناوری CHP متناسب با فرآیندهای صنعتی نیز موضوع مهمی است که در برخی پژوهشها مورد توجه قرار گرفته است. به عنوان نمونه زمانی نژاد و همکاران (۱۳۸۹)، به کمک تحلیل سلسله مراتبی به ارزیابی و اولویت بندی صنایع برای توسعه CHP پرداخته‌اند. گامبینی و ولینی (۲۰۱۹) نیز برای انتخاب و طراحی مناسب سیستم CHP روشی ارائه کرده‌اند که بر مبنای تقاضای انرژی در فرآیندهای صنعتی از یک طرف و عملکرد فناوریهای تولید همزمان از طرف دیگر می‌باشد. در همین راستا در این مقاله نیز به ارائه یک چارچوب کمی و نظام مند برای امکان سنجی نصب CHP و تعیین نوع فناوری مناسب برای فرآیندهای صنعتی مختلف پرداخته شده است. هدف این پژوهش در مرحله اول ارزیابی فرآیندهای صنعتی از لحاظ امکان استفاده از CHP در آنها به کمک معرفی شاخصهای موثر تصمیم و روش تحلیل سلسله مراتبی بوده و در مرحله دوم انتخاب فناوری CHP مناسب برای صنایع دارای اولویت با مطالعه تقاضای حرارتی فرآیندهای صنعتی و تطبیق آن با مشخصه حرارتی فناوری های CHP می‌باشد. در بخش دوم فناوری‌های تولید همزمان برق و حرارت مطالعه خواهد شد. چارچوب پیشنهادی تصمیم‌گیری و انتخاب نوع فناوری تولید همزمان در بخش سوم ارائه می‌شود. بخش چهارم به مطالعه موردی در استان همدان اختصاص دارد. در بخش پنجم به بحث بر روی نتایج پرداخته شده و جمع بندی در بخش ششم صورت می‌گیرد.

<sup>۱</sup> Combined heat and power (CHP)

## ۲. تولید همزمان برق و حرارت

تولید همزمان برق و حرارت یا به اختصار تولید همزمان، عبارت است از تولید توأم ترمودینامیکی دو یا چند شکل انرژی (معمولاً برق و حرارت) از یک منبع (کای و همکاران، ۲۰۱۷). استفاده هر چه بیشتر از گرمای آزاد شده در حین فرآیند احتراق سوخت، باعث افزایش بازده انرژی و کاهش مصرف سوخت و در نتیجه کاهش هزینه‌های مربوط به تامین انرژی می‌شود. در نیروگاه‌های تولید همزمان، حرارت خروجی از واحد تولید الکتریسیته می‌تواند به عنوان تامین کننده حرارت یا برودت مورد استفاده قرار گیرد که موجب افزایش بازدهی سیستم انرژی تا ۹۰ درصد می‌گردد. به طور خلاصه از جمله مزایای این فناوری می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (والدز و همکاران ۲۰۲۰): افزایش کارایی انرژی از کمتر از ۵۰ درصد به ۸۰ تا ۹۰ درصد، تأمین حرارت مطمئن و انعطاف پذیر، حفاظت از محیط زیست، کاهش هزینه‌های بهره برداری با کاهش مصرف سوخت، افزایش قابلیت اطمینان و کیفیت تامین برق در صورت بروز مشکل در شبکه، افزایش پایداری و امنیت فنی سیستم قدرت و تقویت پدافند غیرعامل با تولیدات پراکنده. البته در کنار مزایای فراوان این فناوری محدودیت‌هایی نیز در استفاده از آنها وجود دارد که می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (والدز و همکاران ۲۰۲۰):

لزوم وجود مصرف کننده حرارتی مداوم و قابل توجه در نزدیکی نیروگاه، وابستگی به سوخت‌های فسیلی و هزینه سرمایه گذاری نسبتاً بالا.

### ۲.۱. تقسیم بندی روشهای CHP از دید حرارتی

فرآیندهای تولید همزمان برق و حرارت را از دید حرارتی می‌توان به فرآیندهای با چرخه صعودی و فرآیندهای با چرخه نزولی دسته‌بندی کرد که به صورت مختصر در ادامه معرفی می‌شود.

#### ۲.۱.۱. چرخه صعودی

در سیستم‌های تولید همزمان با چرخه صعودی انرژی حاصل از احتراق سوخت، ابتدا جهت تولید قدرت (مکانیکی یا الکتریکی) به کار برده شده و حرارت اتلافی از واحد، برای حرارت گرمایشی یا فرآیندی بازیافت می‌گردد که به طور معمول در دما و فشار پایین می‌باشد. مانند موتور احتراق داخلی و توربین گازی.

#### ۲.۱.۲. چرخه نزولی

در سیستم‌های تولید همزمان با چرخه نزولی ابتدا سوخت جهت تامین حرارت مورد نیاز فرآیند استفاده می‌شود. سپس از باقیمانده حرارت محصولات احتراق در بویلرهای بازیافت گرما، تولید بخار شده و از آن برای تولید توان استفاده می‌شود. استفاده از چرخه نزولی معمولاً در فرآیندهایی مناسب است که نیاز به گرما با دمای بالا دارند. تولید توان الکتریکی در این چرخه‌ها توسط سیکل بخار یا سیکل‌هایی با سیال عامل آلی انجام می‌گیرد. به چنین فرآیندی مولد بخار بازیافت کننده حرارت (HRSG)<sup>۱</sup> نیز گفته می‌شود

### ۲.۲. انواع فناوری های مورد استفاده برای CHP

نیروگاه‌های مختلفی به صورت تولید همزمان قابل بهره برداری هستند که از بین آنها پیل‌های سوختی با توجه به فناوری پیچیده و هزینه گران در شرایط کنونی کشور برای کاربردهای نیروگاهی مقرون به صرفه نیست. توسعه میکروتوربین نیز به علت قابلیت استفاده در صنایع نظامی در شرایط تحریم با محدودیت جدی مواجه است. لذا انتخاب فناوری تولید همزمان از بین سایر گزینه‌های موجود شامل توربین بخار، توربین گازی و مولدهای موتوری صورت می‌گیرد. در ادامه این فناوری‌ها به اختصار معرفی می‌گردد (رازینی و همکاران، ۱۳۹۵ و الخاتم و سلما، ۲۰۰۴).

<sup>۱</sup> Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

### ۲,۲,۱ توربین بخار

برای تولید همزمان از توربین بخار از دو روش توربین‌های زیرکش دار و پس فشاری می‌توان استفاده کرد. در توربین‌های بخار زیرکش‌دار هدف اصلی تولید برق است و حرارت بازیافتی معمولاً برای مصارف گرمایشی کوچک استفاده شده و در سیستم‌های CHP کاربرد کمتری دارد. ولی توربین‌های پس فشاری معمولاً با هدف تولید بخار برای مصارف صنعتی مورد توجه بوده و به منظور افزایش بازدهی، ابتدا بخشی از انرژی بخار برای تولید برق در توربین استفاده شده و سپس بخار خروجی از توربین به فرآیند صنعتی مورد نظر هدایت می‌شود.

### ۲,۲,۲ توربین‌های گازی

توربین‌های گازی در طیف گسترده‌ای از توان خروجی وجود دارند. منوط به نوع طراحی، نسبت حرارت به توان الکتریکی برای توربین‌های گازی می‌تواند از ۱ تا ۳ تغییر کند. این توربین‌ها برای استفاده در سیستم‌های CHP بسیار مناسب است زیرا حدود ۶۰ تا ۷۰ درصد انرژی سوخت ورودی به صورت گاز داغ با دمای در حد ۴۰۰ تا ۶۰۰ درجه سانتیگراد از سیستم خارج می‌شود. استفاده از مولد بخار بازیافت حرارت بدون مشعل، ساده‌ترین شکل CHP با تولید بخار است. در صورت نیاز به بخار بیشتر می‌توان از مشعل کمکی نیز استفاده نمود.

### ۲,۲,۳ موتورهای رفت و برگشتی

در موتورهای رفت و برگشتی، از انرژی حاصل از احتراق سوخت برای به گردش درآوردن موتور و چرخاندن ژنراتور با بازدهی الکتریکی بیش از ۴۰٪ استفاده می‌شود. در صورت بهره‌برداری از این موتورها به صورت CHP، حرارت اتلافی موتور را می‌توان از آگزوز، بدنه و سیستم روغنکاری استخراج کرد. موتورهای رفت و برگشتی برای نسبت حرارت به برق نسبتاً کم، درجه حرارت (کیفیت انرژی حرارتی) مورد نیاز پائین و راندمان الکتریکی بالا، استفاده می‌شود.

خلاصه‌ای از مشخصه‌های کلیدی انواع محرک‌های اولیه واحدهای CHP در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده است.

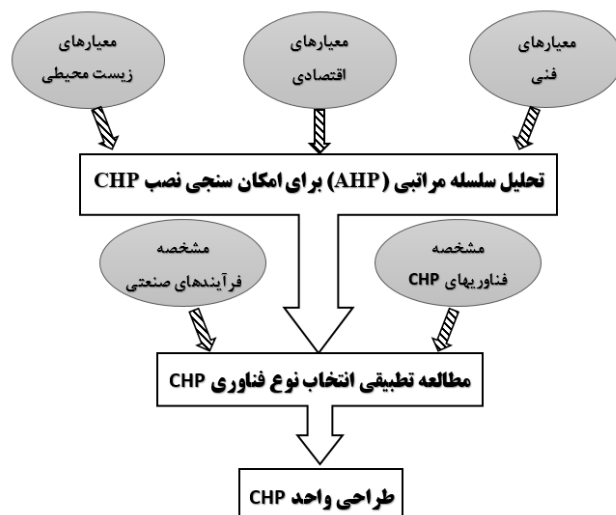
جدول ۱: مشخصه‌های کلیدی انواع محرک‌های اولیه CHP

| نوع CHP          | مزایا  | معایب  | بازدهی (درصد)             | دوره تعمیرات (هزار ساعت) | زمان راه اندازی     | کاربرد حرارتی                              | ظرفیت (کیلووات)           |
|------------------|--|--|---------------------------|--------------------------|---------------------|--|---------------------------|
| توربین گازی      | قابلیت اطمینان بالا، آلودگی کم هوا، در اختیار داشتن حرارت با درجه بالا، عدم نیاز به خنک کاری   | نیاز به گاز با فشار بالا، بازدهی پایین در بار کم، افت توان خروجی با افزایش دما   | ۲۲ تا ۳۶<br>کلی: ۷۰ تا ۸۰ | ۲۵-۵۰                    | ۱۰ دقیقه تا یک ساعت | هوای گرم، آبگرم، بخار کم فشار، بخار پرفشار | ۵۰۰ تا ۲۵۰۰۰۰             |
| موتورهای پیستونی | راندمان انرژی الکتریکی بالا، انعطاف پذیری بهره‌برداری در سمت بار، راه اندازی سریع، هزینه اولیه نسبتاً پایین، قابل استفاده به صورت مجزا از شبکه، قابل بهره‌برداری در گاز با فشار پایین، قابلیت دنبال‌کنندگی بار | هزینه‌های تعمیرات و نگهداری بالا، محدود به کاربردهای دمای پایین، آلودگی نسبتاً بالای هوا، نیاز به خنک نمودن دستگاه حتی در صورتی عدم بازیافت حرارت، آلودگی صوتی | ۲۲ تا ۴۶<br>کلی: ۷۵ تا ۹۰ | ۲۵-۶۰                    | کمتر از دقیقه       | آبگرم بخار کم فشار                         | معمولاً کمتر از ۵ مگا وات |
| توربین پدال      | راندمان بالا، تنوع سوخت، امکان تامین بارهای حرارتی متعدد، قابلیت اطمینان بالا، عمر بالا، نسبت برق به حرارت قابل تغییر  | راه‌اندازی کند، نسبت پایین برق به حرارت  | ۱۰ تا ۳۸<br>کلی: ۷۵ تا ۸۵ | بیش از ۵۰                | یک ساعت تا یک روز   | بخار کم فشار بخار پرفشار                   | ۵۰ تا ۲۵۰۰۰۰              |

### ۳. چارچوب پیشنهادی

این مقاله با هدف امکان‌سنجی نصب CHP در واحدهای صنعتی و انتخاب نوع فناوری برای آنها به ارائه یک چارچوب تصمیم‌گیری در سه فاز می‌پردازد (شکل ۱). فاز اول چارچوب پیشنهادی به امکان‌سنجی نصب مولد تولید همزمان در یک واحد صنعتی اختصاص دارد. در این

فاز صنایع مختلف براساس معیارهای اساسی تصمیم به کمک تحلیل سلسله مراتبی<sup>۱</sup> (AHP) ارزیابی و امتیازدهی می شوند که براساس این امتیازها دسته های صنعتی دارای اولویت نصب CHP شناسایی می گردد. در فاز دوم برای صنایع دارای اولویت بر اساس فرآیند صنعتی و مشخصه حرارتی آنها نوع فناوری مناسب CHP پیشنهاد می گردد. فاز سوم چارچوب تصمیم گیری مربوط به طراحی واحد تولید همزمان می باشد که مطالعات مرتبط با تعیین ظرفیت، انتخاب تجهیزات، نحوه اتصال و ... در این فاز انجام می گیرد. مطالعات این بخش به شرایط جغرافیایی و فنی واحد صنعتی و نوع قرارداد، روش کار، ارتباطات و سیاستهای پیمانکار پروژه وابسته بوده و خارج از موضوع این مقاله است. در ادامه فازهای اول و دوم چارچوب تصمیم گیری تشریح می گردد.



شکل ۱: چارچوب پیشنهادی تصمیم گیری برای پروژه CHP در یک واحد صنعتی

### ۳.۱. فاز اول امکان سنجی

در فاز اول برای امکان سنجی نصب CHP در یک واحد صنعتی، شاخص های اساسی تصمیم استخراج شده و به کمک تحلیل سلسله مراتبی شاخص ها مقایسه و وزن دهی می شوند. سپس با دسته بندی انواع صنایع براساس نوع فرآیند صنعتی آنها، امتیاز هر واحد صنعتی در هر شاخص به صورت کیفی برآورد شده و با توجه به وزن شاخص ها امتیاز نهایی محاسبه می شود. این امتیاز که به صورت درصد بیان می شود بیانگر میزان مطلوبیت احداث مولد CHP برای یک واحد صنعتی است.

#### ۳.۱.۱. شاخصها

عوامل متعددی در امکان سنجی نصب CHP دخالت دارد که می توان آنها را در قالب شاخص های فنی، اقتصادی و زیست محیطی تقسیم بندی نمود. مهمترین شاخص ها در هر دسته در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲: شاخصهای تصمیم در پروژه های CHP

| شاخصهای فنی  | شاخصهای اقتصادی   | شاخصهای زیست محیطی  |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>میزان تقاضای الکتریکی و حرارتی</li> <li>ضریب بار الکتریکی و حرارتی</li> <li>انطباق تقاضای الکتریکی و حرارتی</li> <li>حساسیت به قطع برق</li> <li>نوع و شدت حرارت مورد نیاز (دما و فشار)</li> <li>برنامه تغییرات اساسی و یا توسعه</li> <li>دسترسی به زیرساختهای شبکه</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>تعرفه تامین سوخت اولیه</li> <li>تعرفه فروش برق و حرارت</li> <li>هزینه احداث و بهره برداری CHP</li> <li>وجود مشوقها و مقررات تسهیلگر</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>انتشار آلایندهی واحد صنعتی</li> <li>انتشار آلایندهی واحد CHP</li> <li>آلودگی صوتی</li> <li>عدم مصرف آب توسط CHP</li> </ul> |

<sup>۱</sup> Analytic hierarchy process

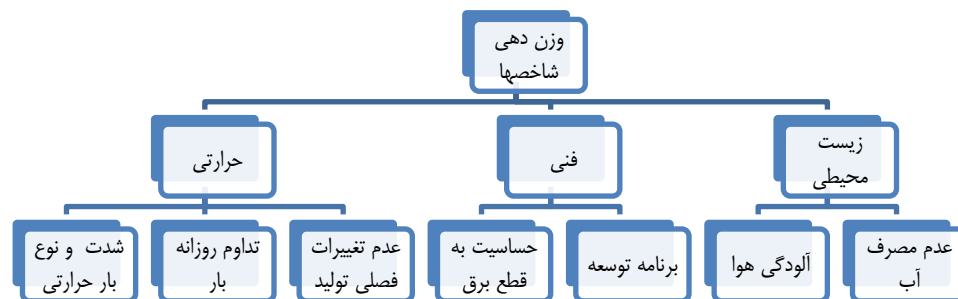
این شاخصها بر اساس وضعیت آنها در صنایع مختلف به شاخصهای عمومی و اختصاصی تقسیم شده اند. شاخصهای عمومی شاخصهایی هستند که برای همه واحدهای صنعتی شرایط تقریباً یکسانی داشته و در اولویت بندی گزینهها تمایزی بین واحدهای صنعتی مختلف ایجاد نخواهد کرد. مانند تعرفه تامین سوخت یا فروش برق که برای همه واحدهای صنعتی در کشور یکسان می باشد. شاخص های اختصاصی بخش دیگری از شاخص ها است که در هر واحد صنعتی می تواند وضعیت متفاوتی داشته باشد و بنابراین در مقایسات تاثیر قابل توجهی خواهد داشت و در این مقاله ملاک ارزیابی قرار گرفته است. دسته بندی شاخصهای عمومی و اختصاصی در جدول ۳ قابل مشاهده است.

جدول ۳: دسته بندی شاخصها در قالب شاخصهای عمومی و اختصاصی تصمیم گیری

| شاخصهای عمومی  | شاخصهای اختصاصی   |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>ضریب بار و میزان تقاضای الکتریکی</li> <li>انطباق تقاضای الکتریکی و حرارتی</li> <li>تعرفه تامین سوخت اولیه و تعرفه فروش برق و حرارت</li> <li>دسترسی به زیرساختهای شبکه</li> <li>هزینه احداث و بهره برداری CHP</li> <li>وجود مشوقها و مقررات تسهیلتگر</li> <li>انتشار آلایندهی واحد CHP</li> <li>آلودگی صوتی</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>شدت و نوع تقاضای حرارتی</li> <li>تداوم روزانه بار حرارتی (ضریب بار روزانه حرارتی)</li> <li>عدم تغییرات فصلی بار</li> <li>حساسیت بارهای الکتریکی به قطع برق</li> <li>برنامه تغییرات اساسی و یا توسعه</li> <li>انتشار آلایندهی واحد صنعتی</li> <li>عدم مصرف آب اضافی توسط CHP</li> </ul> |

### ۳.۱،۲. وزن دهی به شاخصها

در این مطالعه برای تعیین میزان اهمیت هر شاخص از روش تحلیل سلسله مراتبی استفاده شده که از جمله روشهای رایج تصمیم گیری چندمعیاره می باشد و قادر است معیارهای کمی و کیفی را در یک چارچوب و همزمان در نظر گرفته و مقایسات بین گزینههای مختلف را به صورت سازمان یافته انجام دهد. در این روش برای ارزیابی گزینهها، ابتدا معیارهای اصلی موثر در تصمیم انتخاب شده و سپس به گردآوری نظرات فرد یا گروه خبره در حوزه مورد نظر اقدام می شود. ارزیابی شاخصها بر اساس یکسری مقایسات زوجی در هر سطح و توسط فرد یا گروه تصمیم گیرنده که در موضوع مورد نظر خبره می باشند، صورت پذیرفته و وزن هر یک از عوامل در راستای گزینه های رقیب مشخص می شود. مقایسات بین شاخصها دو به دو انجام شده و در هر مقایسه گزینه مطلوبتر مشخص و میزان مطلوبیت با عددی بین یک تا ۹ تعیین می شود. این مقایسات امتیاز هر شاخص را در هر دسته تعیین می کند. در مرحله بعد اهمیت هر دسته باز هم از طریق مقایسات زوجی تعیین شده و سپس وزن کلی هر شاخص از برآیند کل مقایسات محاسبه می شود (آذر و رجب زاده، ۱۳۸۱). در این مقاله شاخص های اختصاصی با توجه به ماهیت آنها در سه دسته به صورت درخت سلسله مراتبی شکل ۲ سازمان دهی شده است. مقایسات زوجی ابتدا در سطح پایین درون هر دسته انجام شده و سپس در سطح بالاتر بین دسته های اصلی انجام خواهد شد.



شکل ۲: درخت سلسله مراتبی مقایسات شاخصهای اختصاصی

### ۳.۲. فاز دوم انتخاب نوع فناوری

در فاز دوم برای واحدهای صنعتی دارای اولویت، به انتخاب نوع فناوری تولید همزمان اقدام می شود. برای این منظور ابتدا به دسته بندی انواع صنایع پرداخته و مشخصه های انواع فرآیندهای صنعتی استخراج می شود. سپس با مقایسه تطبیقی تقاضای حرارتی واحدهای صنعتی و تطبیق آن با مشخصه های انواع CHP، مناسب ترین فناوری برای یک واحد صنعتی انتخاب می شود.

### ۳.۲.۱. دسته بندی صنایع

برای ارزیابی احداث CHP در صنایع، طبقه بندی انواع واحدهای صنعتی با توجه به مشابهت هایی که به لحاظ فرایند تولید و نوع ماشین آلات مورد استفاده دارند، ضرورت می یابد. یکی از متداول ترین طبقه بندی های صنعت، طبقه بندی ارائه شده توسط بخش آمار سازمان ملل مو سوم به سیستم بین المللی طبقه بندی استاندارد صنایع<sup>۱</sup> (ISIC) است. در این طبقه بندی گروه های مختلف صنعتی تعریف شده و فعالیت های مختلف در آنها طبقه بندی گردیده اند. به منظور سهولت انجام مقایسه، در این مقاله دسته های صنعتی فوق نیز در ۹ شاخه کلی تر مطابق جدول ۴ طبقه بندی شده اند.

جدول ۴: طبقه بندی دسته های صنعتی در شاخه های اصلی

| شاخه صنعتی           | دسته صنعتی  |
|----------------------|---|
| ۱ غذایی              | صنایع غذایی   |
| ۲ نساجی              | صنایع نساجی و بافندگی، پوشاک، چرم   |
| ۳ چوب و کاغذ         | صنایع چوب، کاغذ، چاپ  |
| ۴ شیمیایی و پتروشیمی | صنایع پتروشیمی، شیمیایی، لاستیک   |
| ۵ کانی غیرفلزی       | صنایع کانی غیرفلزی  |
| ۶ کانی فلزی          | صنایع کانی فلزی، تولید محصولات فلزی   |
| ۷ ماشین آلات و ابزار | صنایع تولید انواع ماشین آلات، ماشین آلات اداری، خودرو، حمل و نقل  |
| ۸ برق و الکترونیک    | صنایع برق، الکترونیک و مخابرات، تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی  |
| ۹ سایر               | صنایع میلان و لوازم زینتی-ورزشی-سرگرمی، بازیافت، دخانیات، تولید سایر مصنوعات طبقه بندی نشده در جای دیگر |

با توجه به طبقه بندی فوق در صنایع می توان انواع فرآیندهای صنعتی را بر اساس درجه حرارت مورد نیاز مطابق زیر طبقه بندی کرد:

- فرآیندهای با دمای پایین: در این فرآیندها دمای مورد نیاز معمولاً کمتر از ۱۰۰ درجه سانتی گراد بوده و سیال مورد استفاده معمولاً به صورت هوای گرم و یا آب گرم می باشد. مانند خشک کردن محصولات کشاورزی، گرمایش و سرمایش محیط و یا تأمین آب گرم.
- فرآیندهای با دمای متوسط: فرآیندهایی که به دمایی مابین ۱۰۰ تا ۳۰۰ درجه نیاز دارند مانند فرآیندهای صنعت چوب، کاغذ، نساجی، کارخانجات قند، برخی از صنایع شیمیایی و ... در این دسته جای می گیرند که گرمای مورد نیاز عمدتاً به صورت بخار تأمین می گردد.
- فرآیندهای با دمای بالا: دمای مورد استفاده در این فرآیندها در حدود ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه می باشد و معمولاً به صورت حرارت مستقیم یا بخار پرفشار تأمین می گردد مانند برخی از صنایع شیمیایی.
- فرآیندهای با دمای بسیار بالا: فرآیندهایی هستند که با حرارت مستقیم در دمایی بیش از ۷۰۰ درجه کار می کنند و حتی برخی از موارد برای تولید دماهای فوق العاده بالا از کوره قوس الکتریکی استفاده می شود. مانند کارخانجات سیمان، فلزات اساسی و صنعت شیشه.

### ۳.۲.۲. تطبیق مشخصه های حرارتی انواع CHP با انواع فرآیندهای صنعتی

براساس مطالب ارائه شده در این بخش می توان گفت با توجه به نوع تقاضای حرارتی و قابلیت های متفاوت فناوری های تولید همزمان، تقریباً برای هر دسته فرآیند حرارتی ذکر شده در بالا یک فناوری CHP مناسب بوده و مطابق با جدول ۵ پیشنهاد می گردد.

جدول ۵: تطبیق فرآیندهای حرارتی با فناوری های CHP

| مشخصه فرآیند حرارتی      | نوع حرارت مورد نیاز                            | فناوری CHP قابل استفاده |
|--------------------------|--|-------------------------|
| دمای پایین (تا ۱۰۰ درجه) | آب گرم / بخار آب کم فشار / هوای گرم دمای پایین | موتور رفت و برگشتی      |

<sup>۱</sup> International Standard Industrial Classification of All Economic Activities

|                                   |                         |                           |
|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------|
| دمای متوسط (تا ۳۰۰ درجه)          | آب گرم / بخار آب پرفشار | توربین بخار               |
| دمای بالا (تا ۷۰۰ درجه)           | هوای داغ                | توربین گازی               |
| دمای بسیار بالا (بیش از ۷۰۰ درجه) | حرارت مستقیم            | توربین بخار با چرخه نزولی |

## ۴- مطالعه موردی واحدهای صنعتی همدان

### ۴.۱. دورنمای واحدهای صنعتی استان همدان

در استان همدان ۱۵ شهرک صنعتی، ۱۳ ناحیه صنعتی و یک منطقه ویژه اقتصادی که در مجموع ۲۹ شهرک و ناحیه صنعتی را شامل می شود، فعال می باشد. کل وسعت این مجموعه بالغ بر ۲۹۰۳ هکتار است که در مجموع تعداد ۲۱۹۷ قرارداد جهت واحد تولیدی منعقد گردیده، ۹۱۳ واحد صنعتی به بهره برداری رسیده اند و قریب هزار واحد در حال احداث می باشند (پایگاه اینترنتی شرکت شهرکهای صنعتی همدان). با وجود ظرفیت قابل توجه واحدهای صنعتی استان در کنار موقعیت جغرافیایی مناسب از لحاظ میانگین دمای نسبتاً پایین، توسعه تولید همزمان برق و حرارت در استان همدان کمتر مورد توجه قرار گرفته است که در این بخش با مطالعه میدانی و بازدید از برخی از واحدهای صنعتی و بر اساس چارچوب پیشنهادی در بخش قبل به امکانسنجی و انتخاب نوع فناوری CHP برای واحدهای منتخب پرداخته می شود.

### ۴.۲. گزارش بازدیدها از واحدهای صنعتی منتخب

به منظور ارزیابی دقیقتر وضعیت مصرف انرژی واحدهای صنعتی استان و پتانسیل سنجی نصب نیروگاه های تولید همزمان، با همکاری و هماهنگی دفتر HSEE سازمان صنعت، معدن و تجارت استان همدان، تعدادی واحد صنعتی از شاخه های صنعتی مختلف برای مطالعه بیشتر انتخاب و مورد بازدید قرار گرفت. اطلاعات مورد نیاز در مورد هر واحد صنعتی طی بازدید از این واحدهای صنعتی و با مصاحبه با مسئولین بخشهای مرتبط در هر واحد جمع آوری شده که به صورت خلاصه در پیوست آمده است.

### ۴.۳. فاز اول امکان سنجی

#### ۴.۳.۱. وزن دهی به شاخصها

بر اساس تحلیل انجام شده با روش AHP توسط پژوهشگران این مطالعه، وزن هر شاخص اختصاصی محاسبه شده و در جدول ۶ قابل مشاهده است.

جدول ۶: وزن شاخصهای اختصاصی بر اساس تحلیل سلسله مراتبی

| ردیف | شاخص                              | وزن (درصد) |
|------|-----------------------------------|------------|
| ۱    | تداوم روزانه بار حرارتی           | ۲۶,۹۶      |
| ۲    | شدت و نوع بارهای حرارتی           | ۲۶,۹۶      |
| ۳    | برنامه تغییرات اساسی و یا توسعه   | ۱۵,۰۷      |
| ۴    | عدم تغییرات فصلی بار              | ۱۳,۴۸      |
| ۵    | حساسیت بارهای الکتریکی به قطع برق | ۷,۵۳       |
| ۶    | انتشار آلایندهی واحد صنعتی        | ۶,۷۴       |
| ۷    | عدم مصرف آب اضافی در CHP          | ۳,۳۶       |

#### ۴.۳.۲. ارزیابی واحدهای نمونه بر اساس شاخصهای اختصاصی

در این مرحله واحدهای صنعتی منتخب بر اساس شاخص های اختصاصی و با در نظر گرفتن اهمیت شاخص ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است. در این تحلیل به کمک اطلاعات جمع آوری شده طی بازدید از هر واحد صنعتی و مصاحبه با مسئولین مربوطه، وضعیت هر واحد

صنعتی در هر شاخص به صورت کیفی در پنج سطح (کاملاً نامناسب-نامناسب-متوسط-مناسب-کاملاً مناسب) ارزیابی شده و بر اساس آن امتیازی بین صفر تا یک به آن اختصاص داده شده است. سپس امتیاز کلی هر واحد از مجموع حاصلضرب امتیاز شاخص در وزن شاخص به دست آمده است. جزئیات امتیازات واحدها در این ارزیابی در جدول ۷ ارائه شده است.

جدول ۷: ارزیابی واحدهای صنعتی نمونه در چارچوب پیشنهادی

| شاخص (وزن) / واحد صنعتی | تداوم بار حرارتی (%۲۶,۹۴) | نوع و شدت حرارت (%۲۶,۹۴) | برنامه توسعه یا تغییرات (%۱۵,۰۵) | عدم تغییرات فصلی تولید (%۱۳,۴۷) | حساسیت به قطع برق (%۷,۵۲) | انتشار آلاینده‌گی هوا (%۶,۷۳) | عدم مصرف آب اضافی (%۳,۳۵) | امتیاز کل (درصد) |
|-------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------|
| فولاد ویان              | ۱                         | ۱                        | ۰                                | ۱                               | ۱                         | ۱                             | ۰                         | ۸۱,۶             |
| عایق بام هگمتانه        | ۰,۷۵                      | ۰,۲۵                     | ۰                                | ۰,۵                             | ۰,۱                       | ۱                             | ۰                         | ۴۱,۱۵            |
| شیشه همدن               | ۱                         | ۰,۲۵                     | ۱                                | ۱                               | ۱                         | ۱                             | ۰                         | ۷۶,۴۴            |
| فروسلیس آذرخش           | ۱                         | ۰,۸                      | ۱                                | ۱                               | ۱                         | ۱                             | ۰                         | ۹۱,۲۶            |
| شیر پگاه                | ۰,۵                       | ۱                        | ۰                                | ۱                               | ۱                         | ۱                             | ۱                         | ۷۱,۴۸            |
| کشت و صنعت خزل          | ۱                         | ۱                        | ۰                                | ۱                               | ۰,۵                       | ۱                             | ۱                         | ۸۱,۱۹            |
| صنایع غذایی سحر         | ۰,۷۵                      | ۱                        | ۱                                | ۰,۸                             | ۰,۷۵                      | ۱                             | ۱                         | ۸۸,۶۹            |
| نخ رنگ                  | ۰,۸                       | ۱                        | ۰                                | ۰,۷۵                            | ۰,۸                       | ۱                             | ۱                         | ۷۴,۶۹            |

طبق این ارزیابی از مجموعه ۹ واحد صنعتی بازدید شده در این طرح پژوهشی، به جز عایق بام هگمتانه سایر واحدهای صنعتی دارای پتانسیل نصب تولید همزمان برق و حرارت هستند. به عنوان مهمترین دلایل عدم تناسب CHP برای این کارخانه می توان به این موارد اشاره نمود: نوع حرارت خروجی و دمای آن، تغییرات روزانه و فصلی بار حرارتی و عدم وجود برنامه توسعه در این واحد. در طرف مقابل واحدهایی مانند فولاد ویان، فروسیلیس آذرخش، صنایع غذایی سحر و کشت و صنعت خزل در این ارزیابی بیشترین امتیاز را برای نصب CHP کسب کرده اند. عوامل موثر در کسب این امتیازات عبارتند از: نیاز به حرارت با شدت بسیار بالا و یا نیاز به بخار با حجم بالا، ضریب بار حرارتی بالا و وجود برنامه توسعه در برخی از واحدها که باعث صرفه‌جویی در هزینه تغییرات در سیستم خواهد شد.

#### ۴.۴. فاز دوم: تطبیق فناوریهای تولید همزمان با فرآیندهای صنعتی

بر اساس چارچوب پیشنهادی در فاز اول امکان سنجی احداث CHP در واحدهای صنعتی انجام شد. مسلماً نوع فناوری CHP قابل استفاده در هر واحد ممکن است یکسان نبوده و انتخاب آن وابسته به مشخصه بار حرارتی آنها می باشد. در فاز دوم چارچوب پیشنهادی انتخاب نوع فناوری CHP قابل استفاده در هر واحد صنعتی مورد مطالعه قرار می گیرد. بر اساس مطالب ارائه شده در بخش‌های قبل و با توجه به طبقه بندی انجام شده، مطالعه تطبیقی بین فناوریهای CHP و شاخه های صنعتی انجام شده و فناوری مناسب بر اساس فرآیند صنعتی در هر شاخه طبق جدول ۸ پیشنهاد می گردد.

جدول ۸: مشخصات حرارت مورد نیاز و نوع CHP مناسب در در شاخه های صنعتی

| شاخه صنعتی               | نوع حرارت مورد نیاز             | شدت حرارت مورد نیاز | اولویت نخست فناوری CHP    | سایر فناوریهای CHP قابل استفاده | برخی واحدهای مناسب در استان   |
|--------------------------|---------------------------------|---------------------|---------------------------|---------------------------------|-------------------------------|
| صنایع غذایی              | آب گرم / بخار آب                | کم                  | موتور رفت و برگشتی        | توربین بخار                     | سحر- پگاه - کشت و صنعت خزل    |
| صنایع نساجی              | آب گرم / بخار آب                | کم / متوسط          | موتور رفت و برگشتی        | توربین بخار                     | بافتینه- نخ رنگ               |
| صنایع چوب و کاغذ         | بخار آب / هوای گرم              | کم / متوسط          | موتور رفت و برگشتی        | توربین بخار                     | لوح زرین ملایر                |
| صنایع شیمیایی و پتروشیمی | آب گرم / بخار آب / حرارت مستقیم | متوسط / بالا        | توربین گاز                | توربین بخار-موتور رفت و برگشتی  | آرین شیمی - رز پالایش غرب     |
| صنایع کانی غیرفلزی       | حرارت مستقیم                    | بالا / بسیار بالا   | توربین بخار با چرخه نزولی | توربین گاز                      | سیمان اکباتان- فروسیلیس آذرخش |

| صنایع کانی فلزی          | حرارت مستقیم     | بسیار بالا | توربین بخار با چرخه نزولی | توربین گاز | فولاد ویان- آلومینیوم سیمین نورد |
|--------------------------|------------------|------------|---------------------------|------------|----------------------------------|
| صنایع ماشین آلات و ابزار | وابسته به فرآیند | محدود      | -                         | -          | -                                |
| صنایع برق و الکترونیک    | وابسته به فرآیند | محدود      | -                         | -          | -                                |

لازم به ذکر است که هر شاخه شامل صنایع متنوعی بوده و در هر صنعت نیز روشها و فناوریهای مختلفی یافت شود، بنابراین ممکن است فرآیندهای حرارتی خاصی در برخی شاخه های صنعتی یافت شود که CHP پیشنهادی برای آن چندان مناسب نباشد، ولی در یک ارزیابی کلی می توان گفت همگونی مناسبی بین صنایع موجود در هر شاخه از لحاظ مصرف انرژی و تقاضای حرارتی وجود دارد. در صورت وجود تفاوت اساسی در یک فرآیند صنعتی خاص طبیعتاً انتخاب نوع فناوری برای آن براساس مشخصه حرارتی طبق جدول ۵ امکان پذیر است.

## ۵. بحث

بر اساس تحلیل ها و نتایج این مطالعه و مشاهدات میدانی صورت گرفته، نکات زیر برای توسعه CHP در صنایع پیشنهاد می گردد.

- مولدهای موتوری، اولویت توسعه CHP.

مولدهای موتوری گاز سوز در سالهای اخیر در کشور ما کاملاً شناخته شده و دسترس به آن تسهیل شده است. ابعاد کوچک، نیاز به تأسیسات کم، راه اندازی ساده و سریع از دیگر مزیت های این فناوری است. این فناوری برای واحدهای صنعتی با مصارف حرارتی به شکل آب گرم و بخار کم فشار مانند صنایع غذایی و صنایع نساجی بسیار مناسب بوده و می تواند جایگزین بخش اصلی تقاضای حرارتی آنها گردد. بنابراین این فناوری برای صنایع غذایی، نساجی و چوب و محصولات سلولزی به شدت توصیه می گردد. در شاخه صنایع غذایی واحدهای لبنیات، تولید انواع کنسرو، خشک کردن محصولات کشاورزی مانند تولید کشمش و تولید روغنهای گیاهی گزینه های مناسبی می باشند. همچنین واحدهای رنگرزی از جمله صنایع مناسب در شاخه نساجی می باشد. و خشک کردن چوب یا تولید محصولات سلولزی بهداشتی نیز از دیگر صنایعی هستند که توسعه فناوری موتورهای رفت و برگشتی در آن توصیه می گردد.

موارد فوق نمونه هایی از شاخه های صنعتی هستند که تولید همزمان بوسیله موتورهای رفت و برگشتی در آن قابل استفاده است. به طور کلی هر واحد صنعتی که نیاز به حرارت به صورت آب گرم و یا بخار کم فشار دارند، برای احداث موتورهای رفت و برگشتی قابل مطالعه می باشد.

- تولید همزمان با چرخه نزولی (HRSG)، پاکترین گزینه توسعه CHP.

در بین تمامی گزینه های موجود، استفاده از توربین های بخار بازتاب حرارت در فرآیندهای صنعتی با دمای بسیار بالا بدون هیچگونه مصرف انرژی اضافی می تواند بخشی از اتلاف حرارتی از واحد صنعتی را برای تولید برق بازیافت نماید. این فناوری برای صنایع سنگین مانند سیمان، فولاد و ذوب فلزات قابل اجرا است.

- تنوع بخشی به استفاده از فناوری های مختلف، ضرورت توسعه CHP.

با وجود مزایا و گستردگی استفاده از CHP های موتورهای، این مولدها با محدودیت دما و شدت حرارت تولیدی مواجه هستند. سایر فناوری های CHP مانند توربین های بخاری و گازی با توجه به ویژگی های مختص خود، کارایی مناسبی برای استفاده در انواع صنایع را دارا می باشند.

- عدم ثبات اقتصادی و سیاستی، چالش توسعه CHP.

متأسفانه در سال اخیر نوسانات شدید قیمت ارز باعث افزایش ریسک سرمایه گذاری در پروژه های سرمایه گذاری مخصوصاً پروژه های نیازمند به فناوری های وارداتی از جمله CHP شده است. چنین نوساناتی در کنار تغییرات و برخی دوگانگی ها در قوانین و آئین نامه های مرتبط با احداث و بهره برداری از فناوری ها تولید همزمان باعث دفع سرمایه گذاران بخش خصوصی از این حوزه خواهد شد. بنابراین برای مواجهه با این چالشها تدوین قوانین تسهیلگر، گسترش مشوقهای دولتی و ایجاد ثبات در بازار انرژی می تواند بسیار موثر باشد.

- تأکید بر نگرانی های زیست محیطی، محرک توسعه CHP.

بهره‌وری پایین سیستم انرژی یکی از عوامل مهم مصرف بالای انرژی در کشور است که علاوه بر افزایش هزینه سوخت، آسیب‌های جدی به محیط زیست نیز وارد می‌کند. اصلاح فرآیندهای سیستم انرژی و توسعه فناوریهای پربازده می‌تواند در کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و صیانت از محیط زیست نقش موثری داشته باشد.

## ۶. جمع بندی

در این پروژه با هدف توسعه استفاده از تولید همزمان برق و حرارت در صنایع استان همدان به مطالعه ابعاد مختلف این فناوری و ارتباط آن با فرآیندهای صنعتی مختلف پرداخته شد. ابتدا این فناوری و جنبه های مختلف آن تشریح گردید و در ادامه با تاکید بر اینکه بازیافت حرارتی مزیت اصلی چنین فناوری هایی می باشد، به مطالعه فناوری های مختلف از زاویه قابلیت بازیابی حرارت پرداخته شد. با توجه به ظرفیت مناسب صنایع برای احداث واحدهای CHP، وضعیت صنایع استان نیز در این مطالعه بررسی گردید. در مجموع می توان گفت استان همدان با بیش از ۱۰۰۰ واحد صنعتی فعال و بیش از ۱۵ شهرک و ناحیه صنعتی با مساحت بالغ بر ۱۱۰۰ هکتار قابلیت و ضرورت ویژه ای برای بهینه سازی در مصرف سوخت دارد. به منظور افزایش بهره وری در سیستم انرژی، کاهش هزینه ها و صیانت از محیط زیست توسعه استفاده از مولدهای تولید پراکنده به صورت CHP تاکید می گردد. طبق نتایج این مطالعه، فناوری موتورهای رفت و برگشتی برای تولید همزمان برق و حرارت در صنایع غذایی، نساجی، چوب و محصولات سلولزی و تولید همزمان با چرخه نزولی (توربینهای بخار بازیاب حرارت)، در صنایع فولاد و سیمان پیشنهاد می گردد.

## ۷. سپاس گذاری

لازم است از سازمان صنعت، معدن و تجارت استان همدان که این پژوهش تحت حمایت مالی این سازمان صورت گرفته، مخصوصاً بخش‌های پژوهش و HSEE این سازمان که با نویسندگان در انجام این پژوهش همکاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

## مراجع

- آذر، ع. و رجب زاده، ع. (۱۳۸۱)، تصمیم‌گیری کاربردی. MADM تهران: نشر دانش.
- پایگاه اینترنتی شرکت شهرکهای صنعتی همدان: <https://hamedan.isipo.ir/index.jsp?fkeyid=&siteid=1&pageid=349&ostan=&code=29>
- رازینی، صالح و همکاران، (۱۳۹۵)، "تولید سبز انرژی در دانشگاه اهواز: ارزیابی زیست محیطی، اقتصادی و فنی"، اولین همایش ملی دانشگاه سبز، بوشهر. زمانی نژاد، م. و همکاران، (۱۳۸۹)، "تعیین شاخصهای مؤثر بر استفاده از تولید همزمان برق و حرارت در صنایع کشور و اولویت بندی صنایع بر این اساس"، بیست و پنجمین کنفرانس بین المللی برق، تهران، ۱۳۸۹.
- Álvarez A. et al. (۲۰۱۸), "Thermodynamic and economic evaluation of reheat and regeneration alternatives in cogeneration systems of the Brazilian sugarcane and alcohol sector", Energy, Vol. ۱۵۲, pp. ۲۴۷-۲۶۲.
- Branchini, L. et al. (۲۰۲۱) "Cogeneration Supporting the Energy Transition in the Italian Ceramic Tile Industry, Sustainability, Vol ۱۳, pp. ۱-۱۷.
- Cai, B, et al. (۲۰۱۷), "Operation strategy and suitability analysis of CHP system with heat recovery, Energy and Buildings", Volume ۱۴۱, pp. ۲۸۴-۲۹۴.
- EL-Khatam W. & Salama, M. A. (۲۰۰۴), "Distributed Generation Technologies Definitions and Benefits", Electric Power Systems Research, Vol. ۷۱, pp. ۱۱۹-۱۲۸.
- Gambini, M. and Vellini, M., (۲۰۱۹) "On Selection and Optimal Design of Cogeneration Units in the Industrial Sector", J. sustain. dev. energy water environ. syst., Vol. ۷, No ۱, pp ۱۶۸-۱۹۲.
- Gambini M, et al., (۲۰۱۹) "High-Efficiency Cogeneration Systems: The Case of the Paper Industry in Italy", Energies, vol ۱۲, pp. ۱-۲۱.
- Gustavo Oliveira Souza, A, et al. (۲۰۲۱), "Economic Feasibility of Electrical Power Cogeneration from Forestry Biomass in an Engineered Wood Panel Industrial Facility", Croatian Journal of Forest Engineering, vol. ۴۲, No. ۲ pp. ۳۱۳-۳۲۰.
- Hassan M. T., et al., (۲۰۱۸) "Industrial Energy Efficiency Optimisation Through Cogeneration Using Biomass", ۵<sup>th</sup> International Universities Power Engineering Conference, pp. ۱-۶
- Institute for industrial productivity, (۲۰۱۵) "Combined Heat and Power (CHP) as a Compliance Option under the Clean Power Plan: A Template and Policy Options for State Regulators"
- Kretov, D and. Kostyukov, V., (۲۰۲۰) "The Natural Gas Cogeneration Units Feasibility Study," International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, pp. ۱-۵.
- Leite, C.A.A.F. et al. (۲۰۲۱) "Natural gas based cogeneration system proposal to a textile industry: a financial assessment" Energy Efficiency Vol. ۱۴, No. ۲۰, pp ۱-۲۴.
- Valdes J. et al. (۲۰۲۰) "Unveiling the potential for combined heat and power in Chilean industry - A policy perspective", Energy Policy, Vol. ۱۴۰, pp. ۱-۱۱.
- Vellini, M. et al. (۲۰۲۰) "High-efficiency cogeneration systems for the food industry", Journal of Cleaner Production, Vol. ۲۶۰, pp. ۱۲۱-۱۳۳.

جدول ۹: خلاصه وضعیت واحدهای صنعتی بازدید شده

| نام واحد                | شاخه صنعتی    | نوع حرارت مورد نیاز  | ظرفیت حرارتی مورد استفاده  | مصارف سرمایشی   | ظرفیت پست/ انشعاب گاز                  | ظرفیت پست/ انشعاب برق   | تداوم بار                             | حساسیت به قطع برق        | برنامه توسعه |
|-------------------------|---------------|--|--|---|--|---|---------------------------------------|--------------------------|--------------|
| فولاد ویان              | کانی فلزی     | حرارت مستقیم در کوره قوس با دمای ۱۷۰۰ درجه   | دو کوره قوس با ظرفیتهای ۶۰MVA و ۱۲MVA  | خنک کاری با آب به صورت مستقیم                                     | ۵۰۰۰m <sup>۳</sup> /h و ۶۰psi          | تغذیه با دو خط ۲۳۰kV و پست اختصاصی با دو ترانسفورماتور ۲۳۰/۲۳kV، ۷۰MVA و ۲۳۰/۶۰، ۶kV ۲۰MVA دیماند ۷۲MVA پیک ۶۰MVA | سه شیفت بسیار زیاد                    | ندارد                    |              |
| عایق بام هگمتانه        | کانی غیر فلزی | حرارت غیر مستقیم با مشعل گاز سوز   | ۲۳ مشعل گاز سوز (همزمان ۷ مشعل فعال برای مخازن ۵۰ هزار لیتری) برای گرم کردن قیر تا ۲۲۰ درجه  | خنک کاری با آب به صورت مستقیم                                     | ۴۰۰m <sup>۳</sup> /h و ۶۰bar           | دیماند ۴۰kW و ۴۰۰V  | خط تولید دو شیفت - مشعلها ۲ تا ۳ شیفت | کم                       | ندارد        |
| شیشه همدان              | کانی غیر فلزی | حرارت مستقیم در دما ۶۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه و غیر مستقیم در دمای ۱۲۰ تا ۶۰۰ درجه توسط مشعلهای گاز سوز | -  | خنک کاری محصول با گردش هوا  | ۴۰۰۰m <sup>۳</sup> /h                  | تغذیه از دو خط ۶۳kV و یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۰kV، ۸MW پیک بار ۴MW   | سه شیفت زیاد                          | فاز سوم در حال ساخت      |              |
| فرو سیلیس آذرخش         | کانی غیر فلزی | حرارت مستقیم در کوره قوس با دمای ۲۸۰۰ درجه   | کوره قوس الکتریکی با پیک ۲۱MVA   | خنک کاری با گردش آب در رادیاتور و هوای آزاد                       | ۱۰۰۰m <sup>۳</sup> /h و فشار ۶۰psi     | پست ۶۳/۲۰kV با دو ترانسفورماتور ۲۰MW  | سه شیفت بسیار زیاد                    | فاز دوم در حال ساخت      |              |
| شرکت شیر پگاه           | غذایی         | بخار آب ۱۷۰C، ۸bar   | سه بویلر ۲۴۰۰۰lb/h (۱۰،۸ ton/h) تقریباً (۷،۱ MW) همزمان دو بویلر فعال  | ۵ کمپرسور ۱۱۰kW آمونیاک در اواپراتور و یخ ساز (حداکثر سه تا فعال) | ۲۰۰۰m <sup>۳</sup> /h و ۲۵۰/۱۵psi      | دیماند ۱۵۰۰kVA دو ترانسفورماتور ۲۰/۰،۴kV  | دو شیفت زیاد                          | ندارد                    |              |
| کشت و صنعت خزل          | غذایی         | بخار آب ۱۲،۹ bar، ۱۹۰C   | سه بویلر ۸،۲ ton/Hr تقریباً ۱۸۰۰۰ lbs/Hr (۵،۹ MW) همزمان دو تا فعال  | دو چیلر ۳،۷kw و دو کمپرسور ۴۰hp                                   | ۶۰psi                                  | دیماند ۲MW دو ترانسفورماتور ۲۰/۰،۴ kV و ۱،۶MVA ۱MVA   | سه شیفت کم                            | ندارد                    |              |
| صنایع غذایی سحر و نیوشه | غذایی         | بخار آب ۱۷۰C، ۸bar   | دو بویلر ۱۸۰۰۰lb/h (۸ ton/h) تقریباً معادل ۵،۳ MW برای سحر و سه دیگ با ۳،۲ و ۴ تن در ساعت برای نیوشه در مجموع معادل ۶،۲MW  | ۲۵ تن با دمای صفر تا ۵ درجه                                       | دو پست ۱۰۰۰m <sup>۳</sup> /h و ۶۰/۳psi | دو ترانسفورماتور ۲۰/۰،۴kV ۷۰۰kVA و ۱۲۰kW  | در طول سال متغیر دو تا سه شیفت        | برنامه افزایش ظرفیت دارد |              |
| نخ رنگ                  | نساجی         | بخار آب ۱۸۰C، ۱۰،۲bar روغن داغ ۱۰bar، ۳۰۰C   | دو دیگ بخار ۱۰،۲ ton/Hr و ۱۱ ton/Hr (۲۲۵۰۰ lbs/Hr، ۲۵۰۰۰ lbs/Hr معادل ۷،۳ MW) یکی رزرو، و سه بویلر روغن با ظرفیت ۱۰ <sup>۶</sup> kcal/Hr (معادل ۱،۱۶۳MW) ظرفیت ۱۵۰ m <sup>۳</sup> /Hr یکی رزرو | -   | ۲۵۰/۶۰ psi و ۲۵۰۰ m <sup>۳</sup> /Hr   | دیماند: ۶۵۰kVA ترانسفورماتور ۲۰/۰،۴ kV، ۸۰۰kVA  | بویلر سه شیفت، خط تولید دو تا سه شیفت | ندارد                    |              |

