

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

تاریخ دریافت:

۱۴۰۱/۲/۸

تاریخ پذیرش:

۱۴۰۲/۴/۱۲

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 سلسه 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 اولولیت‌های توسعه تولید همزمان پیشنهاد شده است.

کلمات کلیدی:
تولید همزمان برق و حرارت،
بهره‌وری انرژی،
تحلیل سلسه 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 پیشرفت‌هه صنعتی مجبور شدند به مساله انرژی جدی تر بینگرنده 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 کشورها به بهینه سازی و مدیریت انرژی به عنوان یک منبع جدید انرژی می‌نگرند. در این میان استفاده از تولید همزمان برق و حرارت^۱ (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 حداقل ۶۰ درصد متغیر است. این ارقام بیانگر ضرورت افزایش بهره وری 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 دارد. به طوریکه در کشورهای صنعتی اکثر واحدهای تولید همزمان برق و حرارت در صنایع نظیر صنایع غذایی، کاغذسازی، شیمی، پالایشی و صنایع فلزی نصب شده که نشانگر اهمیت و کاربرد این واحدها در صنعت می‌باشد (گزارش موسسه بهره وری 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 (آلارو و همکاران، ۲۰۱۸)، کاغذ سازی (گامبینی و همکاران، ۲۰۱۹)، کاشی و سرامیک (برانچینی و همکاران، ۲۰۲۱) و چوب (گستاوو و همکاران، ۲۰۲۱) پرداخته اند. برخی مقالات نیز به کاربرد تولید همزمان در صنایع از زاویه نوع فناوری تولید همزمان نگریسته اند (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 نزد و همکاران (۱۳۸۹)، به کمک تحلیل سلسه مراتبی به ارزیابی و اولویت‌بندی صنایع برای توسعه CHP پرداخته اند. گامبینی و ولینی (۲۰۱۹) نیز برای انتخاب و طراحی مناسب سیستم CHP رو شی ارائه کرده اند 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 نظاممند 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 سلسه 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 فناوری‌های 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.

^۱ 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 (عموماً 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 ۹۰ تا ۸۰ درصد، تأمین حرارت مطمئن و انعطاف‌پذیر، 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 سرمایه‌گذاری 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 اتصالی 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 بویلهای بازیافت گرما تولید بخار شده و از آن برای تولید توان استفاده می‌شود. استفاده از چرخه نزولی عموماً 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^۱) نیز گفته می‌شود

۲.۲. انواع فناوری‌های 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 مفروض 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 مولدات موتوری صورت می‌گیرد. در ادامه این فناوری‌ها به اختصار معرفی می‌گردد (رازینی و همکاران، ۱۳۹۵ و الخاتم و سلمان، ۲۰۰۴).

^۱ Heat Recovery Steam Generator (HRSG)

۱.۲.۱ توربین بخار

برای تولید همزمان از توربین‌های زیرکش دار و پس فشاری می‌توان استفاده کرد. در توربین‌های بخار زیرکش دار 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.

۱.۲.۲ 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.

۱.۲.۳ 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 بهره برداری از این موتورهای CHP، حرارت اتصالی موتور را می‌توان از آگزو، 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 و احدهای CHP در جدول ۱ با یکدیگر مقایسه شده است.

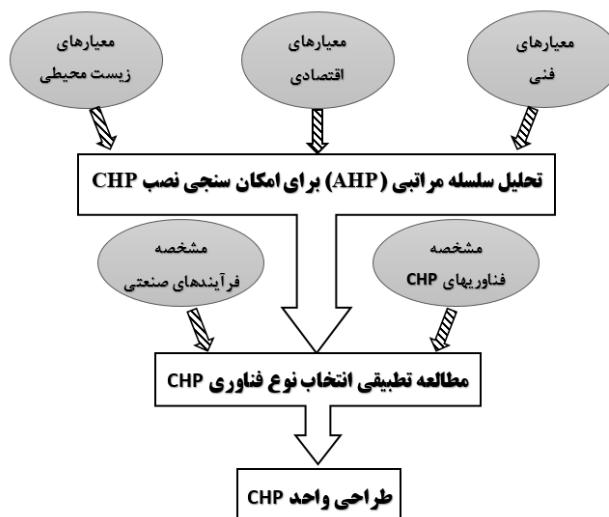
جدول ۱: مشخصه‌های کلیدی انواع محرک‌های اولیه CHP

نوع CHP	مزایا	معایب	بازدهی (درصد)	دوره تعمیرات (هزار ساعت)	زمان راه اندازی	کاربرد حرارتی	ظرفیت (کیلووات)
آزادی کاری	قابلیت اطمینان بالا، آلدگی 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	الکتریکی: ۳۶ تا ۲۲ کلی: ۸۰ تا ۲۰	۲۵-۵۰	۱۰ دقیقه تا یک ساعت	هوای گرم، آبگرم، بخار کم فشار، بخار پرفشار	۵۰ تا ۲۵۰۰۰۰
راندمان انرژی	راندمان انرژی الکتریکی بالا، انعطاف پذیری بهره برداری در سمت بار، راه اندازی سریع، هزینه اولیه نسبتاً پایین، قابل استفاده به صورت مجزا از شبکه، قابل بهره برداری در گاز با فشار پایین، قابلیت دنبال کنندگی بار	هزینه‌های تعمیرات و نگهداری بالا، محدود به کاربردهای دمای پایین، آلدگی نسبتاً بالای هوا، نیاز به خنک نمودن دستگاه حتی در صورتی عدم بازیافت حرارت، آلدگی صوتی	الکتریکی: ۴۶ تا ۲۲ کلی: ۹۰ تا ۷۵	۲۵-۶۰	کمتر از دقیقه	آبگرم بخار کم فشار	مموداً کمتر از ۵ مگاوات
بازیافتی	راندمان بالا، نوع سوخت، امکان تامین بارهای حرارتی متعدد، قابلیت اطمینان بالا، عمر بالا، نسبت برق به حرارت قبل تغییر	راهندازی کند، نسبت پایین برق به حرارت،	الکتریکی: ۳۸ تا ۱۰ کلی: ۸۵ تا ۷۵	بیش از ۵۰	یک ساعت تا یک روز	بخار کم فشار بخار پرفشار	۵۰ تا ۲۵۰۰۰۰

۲. 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 امکان سنجی نصب مولد تولید همزمان در یک واحد صنعتی اختصاص دارد. در این

فاز صنایع مختلف براساس معیارهای اساسی تصمیم به کمک تحلیل سلسله مراتبی^۱ (AHP) ارزیابی و امتیازدهی می‌شوند که براساس این امتیازها دسته‌های صنعتی دارای اولویت نصب CHP شناسایی می‌گردد. در فاز دوم برای صنایع دارای اولویت براساس فرآیند صنعتی و مشخصه حرارتی آنها نوع فناوری مناسب CHP پیشنهاد می‌گردد. فاز سوم چارچوب تصمیم گیری مربوط به طراحی واحد تولید همزمان می‌باشد که مطالعات مرتبط با تعیین ظرفیت، انتخاب تجهیزات، نحوه اتصال و ... در این فاز انجام می‌گیرد. 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 می‌گردد.



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

۱.۳.۲. فاز اول امکان سنجی

در فاز اول برای امکان سنجی نصب CHP در یک واحد صنعتی، شاخص‌های اساسی تصمیم استخراج شده و به کمک تحلیل سلسله مراتبی شاخص‌ها مقایسه و وزن دهی می‌شوند. 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 شاخص‌ها امتیاز نهایی محاسبه می‌شود. این امتیاز که به صورت درصد بیان می‌شود بیانگر میزان مطلوبیت احداث مولد CHP برای یک واحد صنعتی است.

۱.۳.۳. شاخصها

عوامل متعددی در امکان سنجی نصب CHP دخالت دارد که می‌توان آنها را در قالب شاخص‌های فنی، اقتصادی و زیست محیطی تقسیم بندی نمود. مهمترین شاخص‌ها در هر دسته در جدول ۲ خلاصه شده است.

جدول ۲: شاخصهای تصمیم در پروژه‌های CHP

شاخصهای زیست محیطی	شاخصهای اقتصادی	شاخصهای فنی
انتشار آلایندگی واحد صنعتی CHP	• تعریف تامین سوخت اولیه • تعریف فروش برق و حرارت CHP	• میزان تقاضای الکتریکی و حرارتی • ضریب بار الکتریکی و حرارتی
آلودگی صوتی	• هزینه احداث و بهره‌برداری CHP	• انطباق تقاضای الکتریکی و حرارتی
عدم مصرف آب توسط CHP	• وجود مشوقه‌ها و مقررات تسهیلگر	• حساسیت به قطع برق ▪ نوع و شدت حرارت مورد نیاز (دما و فشار) ▪ برنامه تغییرات اساسی و یا توسعه ▪ دسترسی به زیرساختهای شبکه

^۱ Analytic hierarchy process

این شاخصها بر اساس وضعیت آنها در صنایع مختلف به شاخصهای عمومی و اختصاصی تقسیم شده‌اند. شاخصهای عمومی شاخصهای هستند که برای همه واحدهای صنعتی شرایط تقریباً یکسانی داشته و در اولویت بندی گزینه‌ها تمایزی بین واحدهای صنعتی مختلف ایجاد نخواهد کرد. مانند تعریفه تامین سوخت یا فروش برق که برای همه واحدهای صنعتی در کشور یکسان می‌باشد. شاخصهای اختصاصی بخش دیگری از شاخص‌ها است که در هر واحد صنعتی می‌تواند وضعیت متفاوتی داشته باشد و بنابراین در مقایسات تأثیر 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.

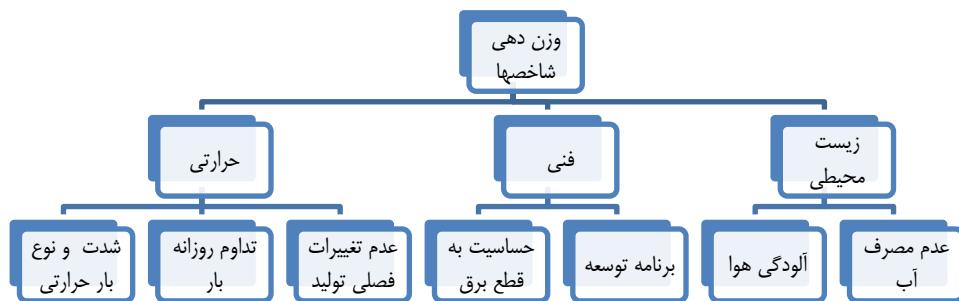
جدول ۳: دسته بندی شاخصها در قالب شاخصهای عمومی و اختصاصی تصمیم‌گیری

شاخصهای اختصاصی	شاخصهای عمومی
شدت و نوع تقاضای حرارتی	ضریب بار و میزان تقاضای الکتریکی
تداوی روزانه بار حرارتی (ضریب بار روزانه حرارتی)	انطباق تقاضای الکتریکی و حرارتی
عدم تغییرات فصلی بار	تعریفه تامین سوخت اولیه و تعرفه فروش برق و حرارت
حساسیت بارهای الکتریکی به قطع برق	دسترسی به زیرساختهای شبکه
برنامه تغییرات اساسی و یا توسعه	هزینه احداث و بهره‌برداری CHP
انتشار آلایندگی واحد صنعتی	وجود مشوّقها و مقررات تسهیلگر
عدم مصرف آب اضافی توسط CHP	انتشار آلایندگی واحد CHP
	آودگی صوتی

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 تصمیم‌گیری چندمعیاره می‌باشد و قادر است معیارهای کمی و کیفی را دریک چارچوب و همزمان درنظر 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 می‌شود. ارزیابی شاخص‌ها بر اساس یکسری مقایسات زوجی در هر سطح و توسط فرد یا گروه تصمیم‌گیرنده که در موضوع مورد نظر خبره می‌باشند، صورت پذیرفته و وزن هر یک از عوامل در راستای گزینه‌های رقیب مشخص می‌شود. 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 می‌شود. این مقایسات امتیاز هر شاخص را در هر دسته تعیین می‌کند. 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 می‌شود (آذر و رجب‌زاده، ۱۳۸۱).

در این مقاله شاخص‌های 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 دسته‌های 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 می‌شود. برای این منظور ابتدا به دسته بندی انواع صنایع پرداخته و مشخصه‌های انواع فرآیندهای صنعتی استخراج می‌شود. سپس با مقایسه تطبیقی تقاضای حرارتی واحدهای صنعتی و تطبیق آن با مشخصه‌های انواع CHP، مناسب ترین فناوری برای یک واحد صنعتی انتخاب می‌شود.

۳.۲.۱ دسته بندی صنایع

برای ارزیابی احداث CHP در صنایع، طبقه بندی انواع واحدهای صنعتی با توجه به مشابهت‌هایی که به لحاظ فرایند تولید و نوع ماشین‌آلات مورد استفاده دارند، ضرورت می‌یابد. یکی از متداول‌ترین طبقه بندی‌های صنعت، طبقه بندی ارائه شده تو سط بخش آمار سازمان ملل موسم به سیستم بین‌المللی طبقه‌بندی استاندارد صنایع^۱ (ISIC) است. در این طبقه‌بندی گروه‌های مختلف صنعتی تعریف شده و فعالیت‌های مختلف در آن‌ها طبقه بندی گردیده‌اند. به منظور سهولت انجام مقایسه، در این مقاله دسته‌های صنعتی فوق نیز در ۹ شاخه کلی تر مطابق جدول ۴ طبقه بندی شده‌اند.

جدول ۴: طبقه بندی دسته‌های صنعتی در شاخه‌های اصلی

شاخه صنعتی	دسته صنعتی
غذایی	صنایع غذایی
نساجی	صنایع نساجی و بافندگی، پوشاک، چرم
چوب و کاغذ	صنایع چوب، کاغذ، چاپ
شمایی و پتروشیمی	صنایع پتروشیمی، شیمیایی، لاستیک
کانی غیرفلزی	صنایع کانی غیرفلزی
کانی فلزی	صنایع کانی فلزی، تولید محصولات فلزی
ماشین آلات و ابزار	صنایع تولید انواع ماشین‌الات، ماشین آلات اداری، خودرو، حمل و نقل
برق و الکترونیک	صنایع برق، الکترونیک و مخابرات، تجهیزات پزشکی و آزمایشگاهی
سایر	صنایع میلان و لوازم زیستی-ورزشی-سرگرمی، بازیافت، دخانیات، تولید سایر مصنوعات طبقه بندی نشده در جای دیگر

با توجه به طبقه بندی فوق در صنایع می‌توان 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 می‌باشد. 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 می‌گیرند که گرمای مورد نیاز عمدتاً به صورت بخار تامین می‌گردد.

- فرآیندهای با دمای بالا: دمای مورد استفاده در این فرآیندها در حدود ۳۰۰ تا ۷۰۰ درجه می‌باشد و معمولاً به صورت حرارت مستقیم یا بخار پرفشار تامین می‌گردد مانند برخی از صنایع شیمیایی.

- فرآیندهای با دمای بسیار بالا: فرآیندهایی هستند که با حرارت مستقیم در دمایی بیش از ۷۰۰ درجه کار می‌کنند و حتی برخی از موارد برای تولید دماهای فوق العاده بالا از کوره قوس الکتریکی استفاده می‌شود. مانند کارخانجات سیمان، فلزات اساسی و صنعت شیشه.

۳.۲.۲ تطبیق مشخصه‌های حرارتی انواع CHP با انواع فرآیندهای صنعتی

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

جدول ۵: تطبیق فرآیندهای حرارتی با فناوری‌های 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

^۱ International Standard Industrial Classification of All Economic Activities

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

۴- مطالعه موردهای واحدهای صنعتی همدان

۱،۴. 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 می‌شود، فعال می‌باشد. 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 می‌باشند (پایگاه اینترنتی شرکت شهرکهای صنعتی همدان). با وجود ظرفیت قابل توجه واحدهای صنعتی استان درکنار 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 می‌شود.

۴،۲. گزارش بازدیدها از واحدهای صنعتی منتخب

به منظور ارزیابی دقیقت و ضعیت مصرف انرژی واحدهای صنعتی استان و پتانسیل سنجی نصب نیروگاه‌های تولید همزمان، با همکاری و هماهنگی دفتر HSEE سازمان صنعت، معدن و تجارت استان همدان، تعدادی واحد صنعتی از شاخه‌های 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

۱،۴،۳. وزن دهی به شاخصها

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

جدول ۶: وزن شاخصهای اختصاصی بر اساس تحلیل سلسه مراتبی

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

۲،۴،۳. ارزیابی واحدهای نمونه بر اساس شاخصهای اختصاصی

در این مرحله واحدهای صنعتی منتخب بر اساس شاخص‌های اختصاصی و با در نظر گرفتن اهمیت شاخص‌ها، 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، و ضعیت هر واحد

صنایع کانی فلزی	حرارت مستقیم	بسیار بالا	توربین گاز	توربین بخار با چرخه نزولی	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 شاخه‌های صنعتی یافت شود که CHP پیشنهادی برای آن چندان مناسب نباشد، ولی در یک ارزیابی کلی می‌توان 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 تحلیل‌ها و نتایج این مطالعه و مشاهدات میدانی صورت گرفته، نکات زیر برای توسعه CHP در صنایع پیشنهاد می‌گردد.

- مولدهای موتوری، اولویت توسعه CHP

مولدهای موتوری گاز سوز در سالهای اخیر در کشور ما کاملاً شناخته شده و دسترسی به آن تسهیل شده است. بعد از کوچک، نیاز به تأسیسات کم، راه اندازی ساده و سریع از دیگر مزیتهای 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 می‌تواند جایگزین بخش اصلی تقاضای حرارتی آنها گردد. بنابراین این فناوری برای صنایع غذایی، نساجی و چوب و محصولات سلولزی به شدت توصیه می‌گردد. در شاخه صنایع غذایی واحدهای لبنیات، تولید انواع کنسرو، خشک کردن محصولات کشاورزی مانند تولید کشمش و تولید روغن‌های گیاهی گزینه‌های مناسبی می‌باشد. همچنین واحدهای رنگرزی از جمله صنایع مناسب در شاخه نساجی می‌باشد. و خشک کردن چوب یا تولید محصولات سلولزی بهداشتی نیز از دیگر صنایعی هستند که توسعه فناوری موتورهای رفت و برگشتی در آن توصیه می‌گردد.

موارد فوق نمونه‌هایی از شاخه‌های 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 دارد، برای احداث موتورهای رفت و برگشتی قابل مطالعه می‌باشد.

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

در بین تمامی گزینه‌های موجود، استفاده از توربین‌های بخار بازیاب حرارت در فرآیندهای صنعتی با دمای بسیار بالا بدون هیچگونه مصرف انرژی اضافی می‌تواند 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 فناوری‌های 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 توربین‌های بخاری و گازی با توجه به ویژگی‌های مختص خود، کارایی مناسبی برای استفاده در انواع صنایع را دارا می‌باشند.

- عدم ثبات اقتصادی و سیاستی، چالش توسعه CHP

متاسفانه در سال اخیر نوسانات شدید قیمت ارز باعث افزایش رسیسک سرمایه گذاری در پروژه‌های سرمایه گذاری مخصوصاً پروژه‌های نیازمند به فناوری‌های وارداتی از جمله CHP شده است. چنین نوساناتی در کنار تغییرات وبرخی دوگانگی‌ها در قوانین و آئین نامه‌های مرتبط با احداث و بهره برداری از فناوری‌ها تولید همزمان باعث دفع سرمایه گذاران بخش خصوصی از این حوزه خواهد شد. بنابراین برای مواجهه با این چالشها تدوین قوانین تسهیلگر، گسترش مشوقه‌های دولتی و ایجاد ثبات در بازار انرژی می‌تواند بسیار موثر باشد.

- تأکید بر نگرانی‌های زیست محیطی، محرک توسعه CHP

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

۶. جمع بندی

در این پژوهه 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 جنبه‌های مختلف آن تشریح گردید و در ادامه با تاکید بر اینکه بازیافت حرارتی مزیت اصلی چنین فناوری‌هایی می‌باشد، به مطالعه فناوری‌های مختلف از زاویه قابلیت بازیابی حرارت پرداخته شد. با توجه به ظرفیت منابع سب صنایع برای احداث واحدهای CHP، و ضعیت صنایع استان نیز در این مطالعه بزرگ‌تر می‌توان گفت استان همدان با بیش از ۱۰۰۰ واحد صنعتی فعال و بیش از ۱۵ شهرک و ناحیه صنعتی با مساحت بالغ بر ۱۱۰ هکتار قابلیت و ضرورت ویژه‌ای برای بهینه سازی در مصرف سوت دارد. به منظور افزایش بهره‌وری در سیستم انرژی، کاهش هزینه‌ها و صیانت از محیط زیست توسعه استفاده از مولدات تولید پراکنده به صورت CHP تاکید می‌گردد. 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 می‌گردد.

۷. سپاس‌گزاری

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 نویسندها در انجام این پژوهش همکاری نمودند کمال تشکر و قدردانی را داشته باشیم.

مراجع

- آذر، ع. و رجب‌زاده، ع. (۱۳۸۱)، تصمیم‌گیری کاربردی . MADM تهران: نشر دانش.
- پایگاه اینترنتی شرکت شهرکهای صنعتی همدان: <https://hamedan.isipo.ir/index.jsp?fkeyid=&siteid=۱&pageid=۳۴۹&ostan=&code=۲۹>
- رازینی، صالح و همکاران، (۱۳۹۵)، "تولید سبز انرژی در دانشگاه‌ها؛ 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 بین‌المللی برق، تهران، ۱۳۸۹.
- Álvaro 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", ۵۳rd International Universities Power Engineering Conference, pp. ۱-۷
- 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. ۲, 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.

پیوست

جدول ۹: خلاصه وضعیت واحدهای صنعتی بازدید شده

نام واحد	شاخه صنعتی	نیاز	نوع حرارت مورد استفاده	مصارف سرمایشی	ظرفیت پست/انشعاب انشعبانی	تداوم بار	حساسیت به قطع برق	برنامه توسعه	
فولاد ویان	کانی فلزی	در دمای ۱۷۰۰ درجه	حرارت مستقیم در کوره قوس با ۶۰MVA و ۱۲MVA	خنک کاری با آب به صورت مستقیم	۵۰۰۰m³/h و ۶۰psi	تغذیه با دو خط ۲۳۰kV و پست اختصاصی با دو ترانسفورماتور ۲۳۰/۳۳kV و ۷۵MVA، ۲۳۰/۶,۶kV ۲۰MVA دیماند ۷۲MVA پیک ۶۰MVA	سه شیفت	سیار زیاد	ندارد
علیق بام هگمتانه	کانی غیرفلزی	حرارت غیرمستقیم با مشعل گاز سوز	مشعل گاز سوز (همزان ۷ مشعل فعال برای مخازن ۵۰ هزار لیتری) برای گرم کردن قیر تا ۲۲۰ درجه	خنک کاری با آب به صورت مستقیم	۴۰۰m³/h ۶۰bar	دو شیفت-مشعلها ۲ تا ۳ شیفت	خط تولید کم	ندارد	
شیشه همدان	کانی غیرفلزی	حرارت در دما ۶۰۰ تا ۱۷۰۰ درجه و غیرمستقیم در دمای ۱۲۰ تا ۶۰۰ درجه توسط مشعلهای گازسوز	-	خنک کاری محصول با گردش هوای	۴۰۰۰m³/h	تغذیه از دو خط ۶۳kV و یک ترانسفورماتور ۶۳/۲۰kV پیک بار ۸MW ۴MW	سه شیفت	زیاد	فاز سوم در حال ساخت
فرو سیسیلیس آرخش	کانی غیرفلزی	حرارت مستقیم در کوره قوس با ۲۸۰۰ درجه	کوره قوس الکتریکی با پیک ۲۱MVA	خنک کاری با گردش آب در رادیاتور و هوای ازاد	۱۰۰۰m³/h و فشار ۶۰psi	پست ۶۳/۲۰kV با دو ترانسفورماتور ۲۵MW	سه شیفت	سیار زیاد	فاز دوم در حال ساخت
شرکت شیر پگاه	غذایی	بخار آب ۱۷۵C, ۸bar	سه بویلر ۲۴۰۰lb/h ۱۰,۸ ton/h (۷,۱ MW) همزمان دو بویلر فعال	۵ کمپرسور آمونیاک در اوپرатор و پیخ ساز (حداکثر سه تا فعال)	۲۰۰۰m³/h ۲۵۰/۱۰psi	دیماند ۱۵۰۰kVA دو ترانسفورماتور ۲۰/۰,۴kV	دو شیفت	زیاد	ندارد
کشت و صنعت خزل	غذایی	بخار آب ۱۷۵C, ۸bar	سه بویلر ۱۸۰۰ lbs/Hr (۵,۹ MW) همزمان دو تا فعال	دو چیلر ۳,۷kw و ۴۰hp دو کمپرسور	۶۰psi	دیماند ۲MW دو ترانسفورماتور ۲۰/۰,۴ kV و ۱,۶MVA ۱MVA	سه شیفت	کم	ندارد
صنایع غذایی سحر و نیوشة	غذایی	بخار آب ۱۷۵C, ۸bar	دو بویلر ۱۸۰۰ lb/h (۵,۳ ton/h) برای سحر و سه (MW) دیگ با ۲، ۳ و ۴ تن در ساعت برای نیوشة در مجموع معادل ۱,۲MW	۲۵ تن با دمای صفر تا ۵ درجه	دو پست ۱۰۰۰m³/h و ۶۰/۳۰psi	در طول سال متغیر دو تا سه شیفت	متوسط	افزایش طرفیت دارد	برنامه افزایش طرفیت دارد
رنگ نساجی	نساجی	بخار آب ۱۸۰C, ۱۰,۲bar روغن داغ ۱۰bar, ۳۰۰C	دو دیگ بخار ۱۰,۲ ton/Hr و ۱۱ ton/Hr (۲۲۵۰۰ lbs/Hr, ۲۵۰۰ lbs/Hr) معادل ۷,۳ MW) پکی رزرو، و سه بویلر روغن با ظرفیت ۱۰۰ kcal/Hr (معادل ۱۵۰ ۱,۱۶۳MW) پکی رزرو	-	۲۵۰/۶۰ psi ۲۵۰ m³/Hr	دیماند: ۶۵۰kVA ترانسفورماتور ۲۰/۰,۴ kV, ۸۰kVA	بویلر سه شیفت، خط تولید دو تا سه شیفت	تسنیا زیاد	ندارد

