

بررسی و ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید (CCHP) با ظرفیت تولید برق یک مگاوات (مطالعه موردی: سیستم تولید همزمان دانشگاه کاشان)

مجید سبزویشانی^۱، سعید گلابی^۲

دانشگاه کاشان - پژوهشکده انرژی

چکیده

یکی از بهترین روشها برای بهینه مصرف نمودن انرژی حرارتی حاصل از سوختهای فسیلی، استفاده از سیستمهای همزمان تولید توان، گرما و تبرید (CCHP) می باشد. در اینگونه سیستمها با بازیافت حرارت هدر رفت از گازهای داغ حاصل از احتراق و نیز آب و روغن خنک کننده در سیستمهای تولید الکتریسته، راندمان کل سیستم می تواند به بیش از ۸۵ درصد افزایش یابد. در پروژه انجام شده در دانشگاه کاشان مراحل طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید، با ظرفیت تولید برق یک مگاوات، تولید حرارت ۱.۲ مگاوات و تولید سرمایش حدود ۲۰۰ تن تبرید، بطور کامل انجام شده است. از جمله مزیتهای مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است که باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات آن شده است. صرفه جویی بدست آمده از کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش قابل توجه آلاینده های زیست محیطی نیز شده است. آنالیز اقتصادی طرح مذکور از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) انجام شده است. باتوجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال و نرخ بازگشت سرمایه حدود ۳۶ درصد تخمین زده شده است.

واژه های کلیدی: تولید همزمان، بهینه سازی مصرف سوخت، راندمان، ارزیابی اقتصادی

۱- مقدمه

فن آوری تولید همزمان انرژی های مورد نیاز در صنایع، یکی از فن آوری های توسعه یافته برای افزایش راندمان و نیز کاهش آلاینده های محیط زیست است. سازگاری واضح موجود بین فن آوری تولید همزمان و بیشتر تکنولوژی هایی که به انرژی مرتبط شده اند، باعث توجه ویژه اکثر کشورها به این صنعت شده است. رشد تقاضا برای مصرف انرژی و افزایش مشکلات زیست محیطی، یک چالش اساسی برای توسعه و پیشرفت های اقتصادی می باشد. استفاده از فن آوری تولید همزمان از جهت بهینه سازی مصرف سوخت نیز اهمیت شایان توجهی دارد.

فن آوری تولید پراکنده و همزمان برق و حرارت، برق را به صورت محلی و در ناحیه مصرف تولید نموده و حرارت اضافی که توسط گازهای خروجی آگروز و یا روغن و آب خنک کننده مولد تولید برق هدر می رود را جهت گرمایش و یا به کارگیری چیلرهای جذبی، به صورت سرمایش به کار می گیرد. این سیستمها را می توان برای مصارف تجاری، صنعتی، عمومی و یا حتی خانگی نیز به کار برد. در روش های معمول برق به صورت متمرکز در نیروگاههایی که عمدتاً راندمان کم و در حد ۳۰٪ تا حداکثر ۵۰٪ دارند، تولید شده و پس از توزیع و انتقال، در اختیار مصرف کننده قرار می گیرد. افت توان و ولتاژ و درحقیقت هدر رفت انرژی الکتریکی در مسیر انتقال نیز از معایب دیگر این سیستمها است. در صورتی که از فن آوری تولید همزمان

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- دانشیار، دانشگاه کاشان

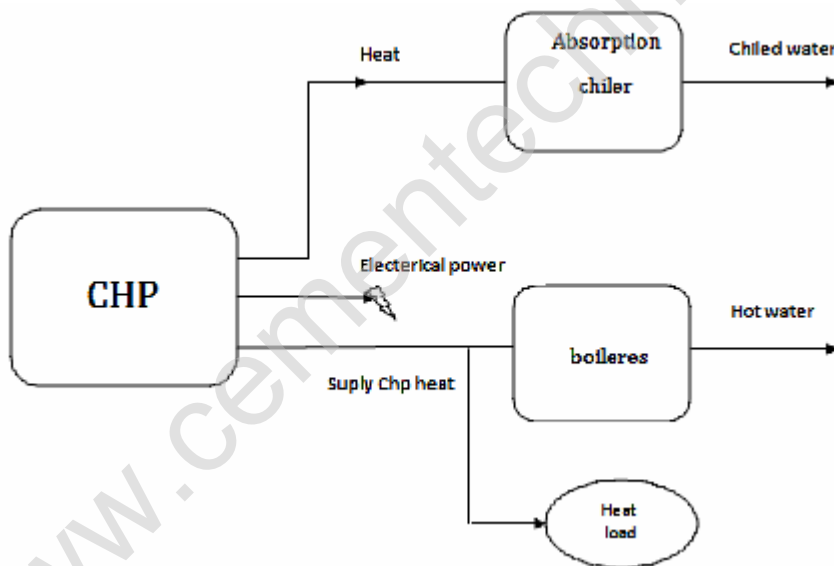
استفاده شود، علاوه بر اینکه امکان افزایش بازده سیستم ها تا ۹۰٪ وجود دارد، با توجه به مصرف انرژی در محل تولید آن، افت توان و ولتاژ مسیر انتقال نیز تقریباً حذف می‌شود. لذا این فناوری استفاده بهینه از مصرف سوخت را تحقق می‌بخشد. در ایران اگرچه مواردی از بازیافت حرارت انجام شده است، اما استفاده از سیستمهای CHP چندان عمومیت نیافته است.

با کمک فن آوری تولید همزمان، حرارتی که از گازهای آگزوز و آب خنک کاری موتور و روغن در حال چرخش در موتور به هدر می رود، با استفاده از مبدل‌های حرارتی مناسب بازیافت می‌گردد. بازیافت حرارت برای تامین آب گرم، آب داغ و یا حتی بخار آب نیز می‌تواند بکار گرفته شود. حرارت بازیافت شده برای کاربری‌های مختلفی مانند تامین آب گرم مصرفی، جهت گرمایش ناحیه‌ای و یا استفاده در چیلر جذبی و تولید سرمایش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب سیالی که جهت گرمایش ناحیه ای و یا سرمایش ناحیه ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، خود تابع شرایطی است که می‌تواند آب گرم، بخار پر فشار یا کم فشار و یا حتی هوا باشد.

در مقاله حاضر، به ارزیابی اقتصادی و بررسی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت که در دانشگاه کاشان به عنوان یک پایلوت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است پرداخته می‌شود. استفاده از فن آوری تولید همزمان گرما، تبرید و توان در محل مصرف و برای تامین نیازهای برخی از ساختمانهای اداری دانشگاه کاشان از جمله ساختمان مرکزی دانشگاه انجام شده است.

۲- مشخصات کلی سیستم CCHP دانشگاه کاشان

انتخاب یک سیستم CCHP برای هدفی خاص، به فاکتورهای زیادی بستگی دارد. این فاکتورها شامل میزان برق مورد نیاز در دوره کار، محدودیت‌های مکان، احتیاجات حرارتی و برودتی، میزان در دسترس بودن سوخت، منفعت و به هم پیوستگی مکانهای مصرف می‌باشد. با توجه به ملاحظات و محاسبات انجام شده انرژی‌های مختلف مورد نیاز برخی از ساختمانهای دانشگاه کاشان، هدف از ایجاد سیستم تولید همزمان، تامین حدود یک مگاوات برق، یک مگاوات حرارت برای گرمایش و ۲۰۰ تن تبرید برای سرمایش ساختمانها می‌باشد. در شکل (۱) طرحواره‌ای کلی از یک سیستم CCHP داده شده است.



شکل ۱- طرحواره‌ای از یک سیستم تولید همزمان CCHP

محل تعیین شده برای ساختمان سیستم CCHP در مجاورت ساختمان مرکزی دانشگاه کاشان می‌باشد. این محل بخاطر نزدیکی به دیوار خارجی دانشگاه و نیز شهرک صنعتی مجاورت دانشگاه از مزیت بسیار خوبی برخوردار است. بخاطر نزدیکی به ساختمان مرکزی، افت‌های حرارتی از لوله‌های ارتباطی بین سیستم CCHP و تاسیسات ساختمان مرکزی کم می‌باشد. از طرفی با توجه به نزدیکی با دیوار خارجی دانشگاه، امکان ایجاد ترانس‌های مربوطه برای اتصال سیستم CCHP به شبکه سراسری برق به راحتی فراهم می‌شود. با توجه به نزدیک بودن محل در نظر گرفته شده به شهرک صنعتی، امکان تامین بخشی از نیازهای حرارتی و الکتریکی شهرک صنعتی توسط سیستم CCHP در آینده نیز وجود دارد.

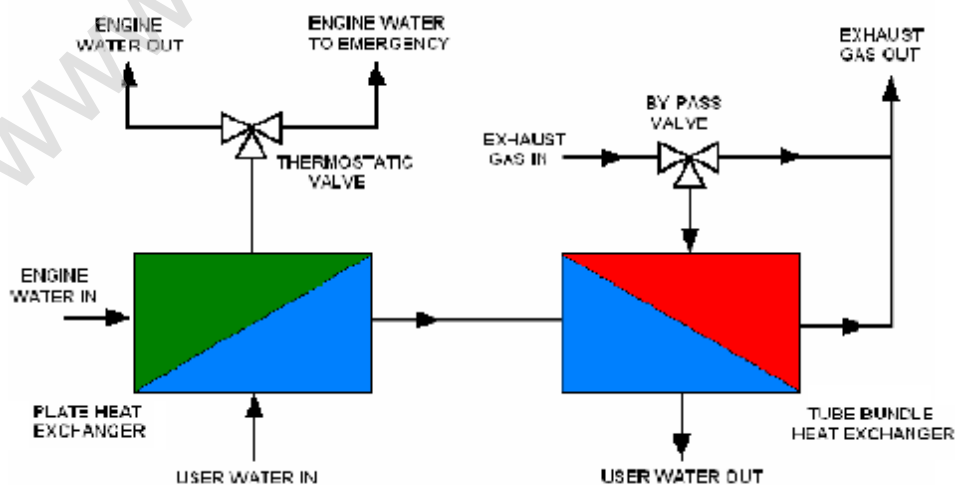
با توجه به طرح توسعه در نظر گرفته شده برای سیستم CCHP، مجموعه ساختمانی به صورت دو ساختمان در مجاورت هم در نظر گرفته شده است. در یک ساختمان سیستم CHP که شامل موتور-ژنراتور و مبدلهای حرارتی مربوطه برای بازیافت گرما (بدون تجهیزات برودتی مثل چیلر) نصب و در ساختمان دیگر، تجهیزات برودتی مثل چیلر جذبی و ملحقات آن نصب می‌شود. نماهایی از محوطه بیرونی ساختمانهای ساخته شده برای سیستم CCHP در شکل (۲) داده شده است.



شکل ۲- نمای بیرونی ساختمانهای محل نصب چیلر جذبی و ملحقات آن (ساختمان سمت راست) و محل نصب سیستم CHP (ساختمان سمت چپ)

تجهیزات مورد نیاز طرح CCHP را میتوان به سه بخش عمده تقسیم بندی نمود. بخش اول شامل تجهیزات سیستم CHP شامل موتور ژنراتور و مبدلهای حرارتی و تجهیزات کنترلی مربوط به آن است. بخش دوم مربوط به چیلر جذبی و ملحقات آن که شامل برج خنک کن است می باشد. بخش سوم مربوط به سایر تجهیزات مورد نیاز از قبیل پمپها، سختی گیر، دی ارتور، فیلتر، شیرآلات، اتصالات و لولههای مورد نیاز، ترانس، دژکتور و غیره می باشد.

در بخش اول شامل تجهیزات سیستم CHP، محرک گازسوز ژنراتور، سیستمهای بازیافت حرارت و تجهیزات کنترلی آن است. منبع تولید انرژی مکانیکی یک موتور رفت و برگشتی است که با سوخت گاز کار می کند. موتور و ژنراتور انتخابی با توان نامی یک مگاوات می باشد. سیستم بازیافت حرارت شامل دو مبدل حرارتی است. یک مبدل حرارتی از نوع مبدل حرارتی صفحه ای برای بازیافت حرارت از روغن و آب خنک کننده موتور (jacket water) و مبدل دیگر از نوع لوله-پوسته و برای بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی از موتور ژنراتور می باشد. با توجه به نیازهای موجود و طراحی های انجام شده، سیالی که حرارت را گازهای داغ حاصل از احتراق و نیز آب خنک کننده موتور بازیافت می کند، آب گرم است. طراحی به گونه ای انجام شده است که آب با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، ابتدا وارد مبدل حرارتی صفحه ای شده و بازیافت حرارت را از آب خنک کننده موتور انجام می دهد. سپس آب وارد مبدل حرارتی لوله پوسته شده و بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی از موتور را انجام داده و به دمای نهایی ۹۰ درجه سانتیگراد می رسد. شمای کلی طرح سیستم بازیافت حرارت در شکل (۳) داده شده است.



شکل ۳- شمای کلی مسیرهای مختلف جریان سیال در سیستم بازیافت حرارت

براساس طراحی‌های انجام شده، سیستم تولید همزمان برق و حرارت شامل موتور-ژنراتور و مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های کنترلی مربوطه، در ساختمان با مشخصات استاندارد از لحاظ عدم ایجاد آلودگی صوتی نصب شده است. شکل (۴) تجهیزات CHP نصب شده را نشان می‌دهد. موتور-ژنراتور روی فونداسیون احداث شده در روی کف ساختمان و مبدل‌های حرارتی روی سازه ساخته شده در بخش بالای موتور-ژنراتور قرار داده شده‌اند.



شکل ۴- نمایی از کل تجهیزات نصب شده در سالن CHP شامل موتور-ژنراتور، مبدل حرارتی، پمپها، ورودی گاز و غیره

همانگونه در بالا توضیح داده شد، سیال انتخابی برای بازیافت حرارت، آب می‌باشد. سیستم CHP، آب با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد را به آب با دمای ۹۰ درجه سانتیگراد می‌رساند. لذا برای تامین سرمایش و استفاده از آب ۹۰ درجه تولیدی، نیاز به استفاده از چیلر جذبی می‌باشد. چیلر جذبی مورد استفاده در طرح حاضر، چیلر یک مرحله‌ای طرح کریر با تغذیه آب گرم ۹۰ درجه توسط ژنراتور چیلر جذبی می‌باشد. محاسبات انجام شده مشخص نمودند که با انتخاب ظرفیت چیلر جذبی ۲۱۰ تن تبرید، ضمن استفاده کامل از حرارت بازیافتی توسط سیستم CHP، سرمایش مورد نیاز ساختمانهای مربوطه در دانشگاه کاشان نیز تامین می‌شود. شکل (۵) چیلر جذبی نصب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمایی کلی از چیلر جذبی نصب شده و برخی از ملحقات آن داخل سالن چیلر جذبی

۳- ارزیابی اقتصادی طرح ازدیدگاه ملی

همانگونه که توضیح داده شد، تولید انرژی الکتریکی در اغلب نیروگاههای گازی (بدون سیکل ترکیبی) با راندمان حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد انجام می-گیرد و بخش زیادی از انرژی سوخت مصرفی به هدر می-رود. همچنین انتقال برق تولیدی به محل مصرف، نیازمند زیرساختهای لازم شبکه توزیع است که علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تلفات انرژی الکتریکی در سیستم توزیع را نیز به همراه خواهد داشت. مزیت مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی‌های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است. این نکته باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات ناشی از این خواهد شد. همچنین کاهش مصرف سوخت در سیستم حاضر، باعث کاهش قابل توجه آلاینده‌های زیست محیطی می‌شود. در محاسبات انجام گرفته برای آنالیز اقتصادی طرح، این موارد لحاظ نشده است ولی با این وجود، صرفه اقتصادی بسیار مناسب طرح اثبات خواهد شد. برای آنالیز اقتصادی طرح موارد زیر تعریف و لحاظ می‌شود.

هزینه اولیه شامل تمامی هزینه‌های مورد نیاز برای خرید، نصب و راه‌اندازی سیستم از قبیل تجهیزات، طراحی، مدیریت پروژه، نیروی کار، هزینه‌های گمرکی و دیگر موارد مرتبط است.

راندمان کل سیستم بیانگر نسبت انرژی خروجی مفید (بصورت برق و حرارت و تبرید) به انرژی سوخت مصرفی است. راندمان الکتریکی موثر، نسبت انرژی الکتریکی تولیدی به تفاضل انرژی سوخت مصرفی و حرارت مفید تولید شده است.

هزینه تعمیر و نگهداری شامل بازرسی‌های دوره‌ای، تعمیرات اساسی و هزینه نیروی انسانی است. جدول (۱) برخی از پارامترهای فنی و اقتصادی موتورهای گازسوز را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای فنی و اقتصادی سیستم CHP

توان (MWe)	۱
هزینه اولیه سیستم CHP (بدون در نظر گرفتن هزینه های چیلر جذبی) (دلار)	۱۰۰۰۰۰۰
راندمان کلی سیستم CHP	٪۸۵
راندمان الکتریکی	٪۴۰
نسبت توان به حرارت	۰.۹
قابلیت عملکرد دائم	٪۹۵
سوخت مصرفی	گاز طبیعی
نوع سیال خروجی در سیستم انرژی بازیافتی	آب گرم ۹۰ درجه (ورودی ۷۰ درجه)
هزینه تعمیر و نگهداری (\$/KWh)	۰.۰۱
دوره تعمیرات اساسی (ساعت)	۴۸۰۰۰
عملکرد در توانهای کم	بلی
زمان استارت	۱۰ ثانیه
آلودگی صوتی	بالا

در سیستم CCHP سه نوع محصول شامل برق، حرارت و تبرید تولید می شود. لازم بذکر است که در سیستم حاضر، حسب نیاز و در یک بازه زمانی، برق و حرارت و یا برق و برودت تولید خواهد شد. تولید برودت با استفاده از چیلر جذبی انجام میشود که مصرف حرارت آن، توسط سیستم CHP تامین می شود. با وجود چیلر جذبی، حرارت تولیدی سیستم در اکثر مواقع سال مورد استفاده قرار می گیرد. لذا برای آنالیز اقتصادی طرح می توان دو دیدگاه را مطرح نمود. دیدگاه اول در نظر گرفتن هزینه های مربوط به چیلر جذبی در طرح است. در این دیدگاه، ارزش یک واحد تولید برودت نیز باید در نظر گرفته شود. دیدگاه دوم با این فرض انجام می شود که چیلر جذبی توسط سرمایه گذار و مستقل از سیستم CHP تامین شده است و حرارت مورد نیاز آن توسط بویلر تامین می شده است. با نصب سیستم CHP، بویلر از مدار خارج و حرارت تولیدی CHP جایگزین آن می شود. در این دیدگاه تنها هزینه ها و فایده های سیستم CHP در نظر گرفته شده و دیگر نیازی به وارد نمودن ارزش اقتصادی تولید برودت نیست. در محاسبات حاضر از دیدگاه دوم که مرسوم است استفاده می شود.

برای ارزیابی اقتصادی طرح و محاسبه برگشت سرمایه از دیدگاه ملی، ابتدا پیش فرضهای مربوط به پارامترهای اولیه اقتصادی محاسبات که بر اساس بررسی های انجام شده لحاظ شده اند داده می شوند. پیش فرضهای محاسبات در جدول (۲) داده شده اند.

روش در نظر گرفته شده در آنالیز اقتصادی از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) بررسی شده است. کلیه

سرمایه گذاری اولیه در پروژه هزینه شده و عمر مفید سیستم ۲۰ سال تخمین زده شده است.

باتوجه به جداول تعمیرات و سرویس های دوره ای و حذف ساعتهای آن و در نظر گرفتن سایر احتمالات برای عدم کارکرد سیستم، با فرض در مدار بودن موتور ژنراتور با بار کامل (Full Load)، با توجه به توان خروجی واقعی ۱۰۰۰ کیلووات، مقدار انرژی الکتریکی تولیدی سالانه برابر ۷۵۰۰ مگاوات ساعت می باشد.

با توجه به راندمان حرارتی سیستم و تولید ۱۱۲۵ کیلووات ساعت حرارت، توان حرارتی واقعی خروجی سیستم در یک سال برابر ۸۴۳۷.۵ مگاوات ساعت است. اگر این حرارت توسط یک بویلر با راندمان ۱۰ درصد هم ایجاد شود (راندمان بویلر حدود ۸۰ درصد است)، نیاز به ۱۱۲.۵ مترکعب سوخت گاز در هر ساعت و یا ۸۴۳۷۵۰ مترکعب سالیانه می باشد. این مقدار سوخت گاز در حقیقت توسط سیستم CHP صرفه جویی شده است.

جدول ۲- پارامترهای اقتصادی اولیه از دیدگاه ملی

Capital cost (\$)	1000000
Natural gas price (\$/m³)	0.23
Electricity price (\$/KWh)	0.09
Electricity Power output (KW)	1000
Thermal Power output (KW)	1125
Working hour per year	7500
Life time (year)	20
O & M cost (\$/KWhe)	0.01
Interest rate	%12
Fuel cost increase per year	%4
O & M increase per year	%10
Energy sales price increase per year	%10
Fuel consumption (m³/hour)	250

موتور گاز سوز در حالت بار کامل ۲۵۰ مترمکعب در ساعت و یا معادل ۱۸۷۵۰۰۰ مترمکعب در سال گاز طبیعی استفاده می‌کند. لذا با توجه به زمان‌های بهره‌برداری و قیمت گاز طبیعی، هزینه سوخت مصرفی در سال اول بهره‌برداری ۴۳۱۲۵۰ دلار خواهد بود که این مبلغ سیر صعودی سالانه به میزان ۴ درصد را خواهد داشت.

با توجه به مقدار متوسط در نظر گرفته شده برای هزینه تعمیر و نگهداری، این هزینه‌ها برای ساعتهای بهره‌برداری برابر $(0.01 * 1000 * 7500 = 75000)$ دلار خواهد بود که این مبلغ نیز به میزان ۱۰ درصد افزایش سالانه خواهد داشت. لذا مجموع هزینه‌های سال اول برابر ۵۰۶۲۵۰ دلار است.

با در نظر گرفتن قیمت هر کیلووات ساعت برق تولیدی معادل ۰.۰۹ دلار، درآمد سالیانه ناشی از فروش برق تولیدی برابر ۶۷۵۰۰۰ دلار خواهد بود. با توجه به اینکه حرارت تولیدی توسط سیستم CHP، معادل صرفه‌جویی سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی است و قیمت هر مترمکعب گاز طبیعی ۰.۲۳ دلار در نظر گرفته شده است، ارزش اقتصادی گاز صرفه‌جویی شده در یک سال توسط سیستم معادل ۱۹۴۰۶۲.۵ دلار می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده، درآمد ناخالص سیستم CHP طی سال اول برابر ۳۶۲۸۱۲.۵ دلار (فروش-هزینه) محاسبه می‌شود. این مقدار مشخص کننده نرخ برگشت سرمایه IRR برابر ۳۶.۳ درصد است. لازم بذکر است که در محاسبات انجام شده، منفعت‌های اجتماعی ناشی از کاهش آلاینده‌های زیست محیطی لحاظ نشده است.

جدول ۳، محاسبات را برای چند سال بهره‌برداری سیستم که شامل جریان مالی کل جمعی (Cumulative Net Cash Flow) نیز می‌باشد را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال تخمین زده می‌شود.

جدول ۳- محاسبات فایده، هزینه و برگشت سرمایه

Description	0	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
هزینه کل اولیه (\$)	1000000					
سوخت گاز مصرفی سالیانه		1875000	1875000	1875000	1875000	1875000
قیمت واحد گاز ($\$/m^3$)		0.23	0.2392	0.248768	0.2587187	0.2691
هزینه سالیانه گاز (\$)		431250	448500	466440	485097.6	504501.5
هزینه تعمیر و نگهداری (\$)		75000	82500	90750	99825	109807.5
هزینه کل دلار	1000000	506250	531000	557190	584922.6	614309
برق تولیدی سالیانه (kwh)		7500000	7500000	7500000	7500000	7500000
قیمت فروش برق تولیدی (\$/KWh)		0.09	0.0936	0.097344	0.10124	0.10529
قیمت برق تولیدی (\$)		675000	702000	730080	759283	789655
سوخت گاز صرفه جویی شده سالیانه (بر اساس حرارت بازیافتی) (m^3)		843750	843750	843750	843750	843750
هزینه سوخت صرفه جویی شده (\$)		194062.5	201825	209898	218294	227025
درآمد سالیانه ناشی از برق و حرارت (\$)		869062	903825	939978	977577	1016680
درآمد ناخالص سالیانه (Net Cash Flow) (\$)	1000000-	362812	372825	382788	392654.4	402371
Cumulative Net Cash Flow(\$)	1000000-	637188-	264363-	118425	511079	913450

در مسیر حرکت جهانی به سوی توسعه پایدار، توجه به مضرات زیست محیطی ناشی از سوختهای فسیلی امری ضروری و مهم است. در این راستا، توجه به میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از منظر اثرات محلی، منطقه‌ای و جهانی از اهمیت شایانی برخوردار است. همانطور که توضیح داده شد، از جمله مزایای سیستم CCHP، کاهش گازهای آلاینده محیط و به تبع آن کاهش هزینه‌های اجتماعی می‌باشد. کاهش مقدار آلاینده‌ها به ازاء هر متر مکعب گاز طبیعی، حدود ۲.۱۶ کیلوگرم است. با توجه به کاهش سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی توسط سیستم اجرا شده، انتظار کاهش مقدار متناهی گاز آلاینده و حدود ۱۸۰۰ تن در یک سال می‌رود که حدود ۹۹.۸٪ آن CO₂ است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به مطالب بیان شده، کلیه عملیات نصب، تست و راه‌اندازی اولیه سیستم CCHP بطور کامل انجام شده است. در پروژه انجام شده در دانشگاه کاشان مراحل طراحی، ساخت، نصب و راه‌اندازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید، با ظرفیت تولید برق یک مگاوات، تولید حرارت ۱.۲ مگاوات و تولید سرمایش حدود ۲۰۰ تن تبرید، بطور کامل انجام شده است. از جمله مزیت‌های مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی‌های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است که باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات آن شده است. صرفه‌جویی بدست آمده از کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش قابل توجه آلاینده‌های زیست محیطی نیز شده است. آنا لیز اقتصادی طرح مذکور از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) انجام شده است. با توجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال و نرخ بازگشت سرمایه حدود ۳۶ درصد تخمین زده شده است. با توجه به کاهش سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی توسط سیستم اجرا شده، انتظار کاهش مقدار متناهی گاز آلاینده و حدود ۱۸۰۰ تن در یک سال می‌رود که حدود ۹۹.۸٪ آن CO₂ است.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر براساس پروژه طرح پایلوت تولید برق، حرارت و برودت دانشگاه کاشان که با حمایت شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور به انجام رسیده، تهیه شده است. نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی خود را از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور ابراز می‌نمایند.

www.cementtechnology.ir

بررسی و ارزیابی اقتصادی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید (CCHP) با ظرفیت تولید برق یک مگاوات (مطالعه موردی: سیستم تولید همزمان دانشگاه کاشان)

مجید سبزویشانی^۱، سعید گلابی^۲

دانشگاه کاشان - پژوهشکده انرژی

چکیده

یکی از بهترین روشها برای بهینه مصرف نمودن انرژی حرارتی حاصل از سوختهای فسیلی، استفاده از سیستمهای همزمان تولید توان، گرما و تبرید (CCHP) می باشد. در اینگونه سیستمها با بازیافت حرارت هدر رفت از گازهای داغ حاصل از احتراق و نیز آب و روغن خنک کننده در سیستمهای تولید الکتریسته، راندمان کل سیستم می تواند به بیش از ۸۵ درصد افزایش یابد. در پروژه انجام شده در دانشگاه کاشان مراحل طراحی، ساخت، نصب و راه اندازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید، با ظرفیت تولید برق یک مگاوات، تولید حرارت ۱.۲ مگاوات و تولید سرمایش حدود ۲۰۰ تن تبرید، بطور کامل انجام شده است. از جمله مزیتهای مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است که باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات آن شده است. صرفه جویی بدست آمده از کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش قابل توجه آلاینده های زیست محیطی نیز شده است. آنالیز اقتصادی طرح مذکور از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) انجام شده است. باتوجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال و نرخ بازگشت سرمایه حدود ۳۶ درصد تخمین زده شده است.

واژه های کلیدی: تولید همزمان، بهینه سازی مصرف سوخت، راندمان، ارزیابی اقتصادی

۱- مقدمه

فن آوری تولید همزمان انرژی های مورد نیاز در صنایع، یکی از فن آوری های توسعه یافته برای افزایش راندمان و نیز کاهش آلاینده های محیط زیست است. سازگاری واضح موجود بین فن آوری تولید همزمان و بیشتر تکنولوژی هایی که به انرژی مرتبط شده اند، باعث توجه ویژه اکثر کشورها به این صنعت شده است. رشد تقاضا برای مصرف انرژی و افزایش مشکلات زیست محیطی، یک چالش اساسی برای توسعه و پیشرفت های اقتصادی می باشد. استفاده از فن آوری تولید همزمان از جهت بهینه سازی مصرف سوخت نیز اهمیت شایان توجهی دارد.

فن آوری تولید پراکنده و همزمان برق و حرارت، برق را به صورت محلی و در ناحیه مصرف تولید نموده و حرارت اضافی که توسط گازهای خروجی آگروز و یا روغن و آب خنک کننده مولد تولید برق هدر می رود را جهت گرمایش و یا به کارگیری چیلرهای جذبی، به صورت سرمایش به کار می گیرد. این سیستمها را می توان برای مصارف تجاری، صنعتی، عمومی و یا حتی خانگی نیز به کار برد. در روش های معمول برق به صورت متمرکز در نیروگاههایی که عمدتاً راندمان کم و در حد ۳۰٪ تا حداکثر ۵۰٪ دارند، تولید شده و پس از توزیع و انتقال، در اختیار مصرف کننده قرار می گیرد. افت توان و ولتاژ و درحقیقت هدر رفت انرژی الکتریکی در مسیر انتقال نیز از معایب دیگر این سیستمها است. در صورتی که از فن آوری تولید همزمان

۱- استادیار، دانشگاه کاشان

۲- دانشیار، دانشگاه کاشان

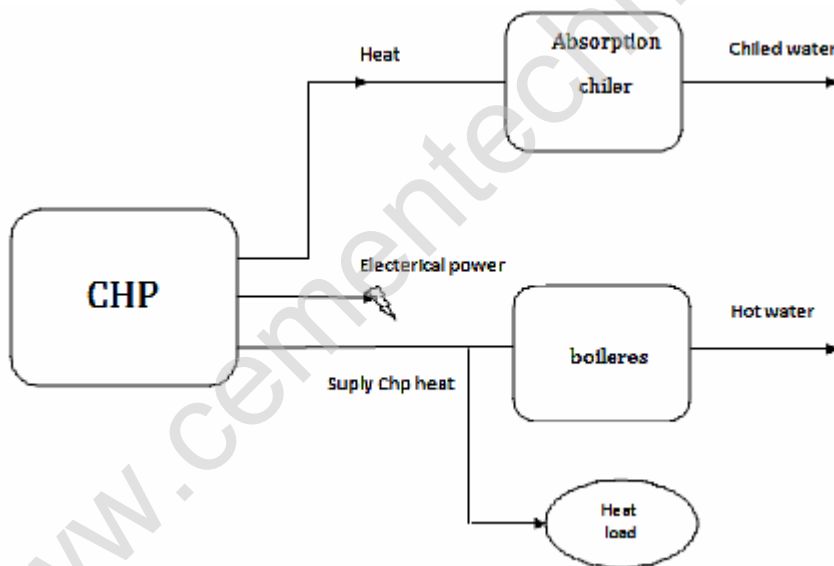
استفاده شود، علاوه بر اینکه امکان افزایش بازده سیستم ها تا ۹۰٪ وجود دارد، با توجه به مصرف انرژی در محل تولید آن، افت توان و ولتاژ مسیر انتقال نیز تقریباً حذف می‌شود. لذا این فناوری استفاده بهینه از مصرف سوخت را تحقق می‌بخشد. در ایران اگرچه مواردی از بازیافت حرارت انجام شده است، اما استفاده از سیستم‌های CHP چندان عمومیت نیافته است.

با کمک فن آوری تولید همزمان، حرارتی که از گازهای اگزوز و آب خنک کاری موتور و روغن در حال چرخش در موتور به هدر می‌رود، با استفاده از مبدل‌های حرارتی مناسب بازیافت می‌گردد. بازیافت حرارت برای تامین آب گرم، آب داغ و یا حتی بخار آب نیز می‌تواند بکار گرفته شود. حرارت بازیافت شده برای کاربری‌های مختلفی مانند تامین آب گرم مصرفی، جهت گرمایش ناحیه‌ای و یا استفاده در چیلر جذبی و تولید سرمایش می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. انتخاب سیالی که جهت گرمایش ناحیه ای و یا سرمایش ناحیه ای مورد استفاده قرار می‌گیرد، خود تابع شرایطی است که می‌تواند آب گرم، بخار پر فشار یا کم فشار و یا حتی هوا باشد.

در مقاله حاضر، به ارزیابی اقتصادی و بررسی سیستم تولید همزمان برق، حرارت و برودت که در دانشگاه کاشان به عنوان یک پایلوت مورد بهره‌برداری قرار گرفته است پرداخته می‌شود. استفاده از فن آوری تولید همزمان گرما، تبرید و توان در محل مصرف و برای تامین نیازهای برخی از ساختمانهای اداری دانشگاه کاشان از جمله ساختمان مرکزی دانشگاه انجام شده است.

۲- مشخصات کلی سیستم CCHP دانشگاه کاشان

انتخاب یک سیستم CCHP برای هدفی خاص، به فاکتورهای زیادی بستگی دارد. این فاکتورها شامل میزان برق مورد نیاز در دوره کار، محدودیت‌های مکان، احتیاجات حرارتی و برودتی، میزان در دسترس بودن سوخت، منفعت و به هم پیوستگی مکانهای مصرف می‌باشد. با توجه به ملاحظات و محاسبات انجام شده انرژی‌های مختلف مورد نیاز برخی از ساختمانهای دانشگاه کاشان، هدف از ایجاد سیستم تولید همزمان، تامین حدود یک مگاوات برق، یک مگاوات حرارت برای گرمایش و ۲۰۰ تن تبرید برای سرمایش ساختمانها می‌باشد. در شکل (۱) طرحواره‌ای کلی از یک سیستم CCHP داده شده است.



شکل ۱- طرحواره‌ای از یک سیستم تولید همزمان CCHP

محل تعیین شده برای ساختمان سیستم CCHP در مجاورت ساختمان مرکزی دانشگاه کاشان می‌باشد. این محل بخاطر نزدیکی به دیوار خارجی دانشگاه و نیز شهرک صنعتی مجاورت دانشگاه از مزیت بسیار خوبی برخوردار است. بخاطر نزدیکی به ساختمان مرکزی، افت‌های حرارتی از لوله‌های ارتباطی بین سیستم CCHP و تاسیسات ساختمان مرکزی کم می‌باشد. از طرفی با توجه به نزدیکی با دیوار خارجی دانشگاه، امکان ایجاد ترانس‌های مربوطه برای اتصال سیستم CCHP به شبکه سراسری برق به راحتی فراهم می‌شود. با توجه به نزدیک بودن محل در نظر گرفته شده به شهرک صنعتی، امکان تامین بخشی از نیازهای حرارتی و الکتریکی شهرک صنعتی توسط سیستم CCHP در آینده نیز وجود دارد.

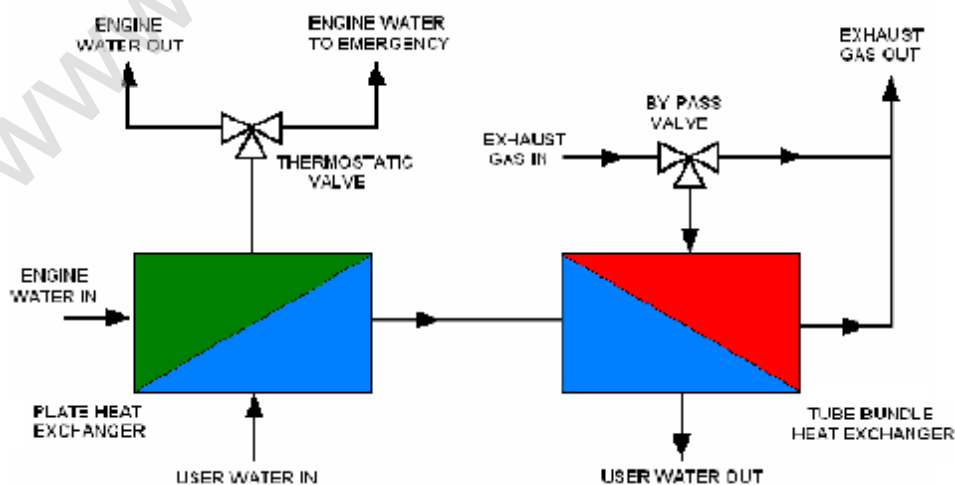
با توجه به طرح توسعه در نظر گرفته شده برای سیستم CCHP، مجموعه ساختمانی به صورت دو ساختمان در مجاورت هم در نظر گرفته شده است. در یک ساختمان سیستم CHP که شامل موتور-ژنراتور و مبدل‌های حرارتی مربوطه برای بازیافت گرما (بدون تجهیزات برودتی مثل چیلر) نصب و در ساختمان دیگر، تجهیزات برودتی مثل چیلر جذبی و ملحقات آن نصب می‌شود. نماهایی از محوطه بیرونی ساختمانهای ساخته شده برای سیستم CCHP در شکل (۲) داده شده است.



شکل ۲- نمای بیرونی ساختمانهای محل نصب چیلر جذبی و ملحقات آن (ساختمان سمت راست) و محل نصب سیستم CHP (ساختمان سمت چپ)

تجهیزات مورد نیاز طرح CCHP را میتوان به سه بخش عمده تقسیم بندی نمود. بخش اول شامل تجهیزات سیستم CHP شامل موتور ژنراتور و مبدلهای حرارتی و تجهیزات کنترلی مربوط به آن است. بخش دوم مربوط به چیلر جذبی و ملحقات آن که شامل برج خنک کن است می باشد. بخش سوم مربوط به سایر تجهیزات مورد نیاز از قبیل پمپها، سختی گیر، دی ارتور، فیلتر، شیرآلات، اتصالات و لولههای مورد نیاز، ترانس، دژنکتور و غیره می باشد.

در بخش اول شامل تجهیزات سیستم CHP، محرک گازسوز ژنراتور، سیستمهای بازیافت حرارت و تجهیزات کنترلی آن است. منبع تولید انرژی مکانیکی یک موتور رفت و برگشتی است که با سوخت گاز کار می کند. موتور و ژنراتور انتخابی با توان نامی یک مگاوات می باشد. سیستم بازیافت حرارت شامل دو مبدل حرارتی است. یک مبدل حرارتی از نوع مبدل حرارتی صفحه ای برای بازیافت حرارت از روغن و آب خنک کننده موتور (jacket water) و مبدل دیگر از نوع لوله-پوسته و برای بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی از اگزوز موتور ژنراتور می باشد. با توجه به نیازهای موجود و طراحی های انجام شده، سیالی که حرارت را گازهای داغ حاصل از احتراق و نیز آب خنک کننده موتور بازیافت می کند، آب گرم است. طراحی به گونه ای انجام شده است که آب با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد، ابتدا وارد مبدل حرارتی صفحه ای شده و بازیافت حرارت را از آب خنک کننده موتور انجام می دهد. سپس آب وارد مبدل حرارتی لوله پوسته شده و بازیافت حرارت از گازهای داغ خروجی اگزوز را انجام داده و به دمای نهایی ۹۰ درجه سانتیگراد می رسد. شمای کلی طرح سیستم بازیافت حرارت در شکل (۳) داده شده است.



شکل ۳- شمای کلی مسیرهای مختلف جریان سیال در سیستم بازیافت حرارت

براساس طراحی‌های انجام شده، سیستم تولید همزمان برق و حرارت شامل موتور-ژنراتور و مبدل‌های حرارتی و سیستم‌های کنترلی مربوطه، در ساختمان با مشخصات استاندارد از لحاظ عدم ایجاد آلودگی صوتی نصب شده است. شکل (۴) تجهیزات CHP نصب شده را نشان می‌دهد. موتور-ژنراتور روی فونداسیون احداث شده در روی کف ساختمان و مبدل‌های حرارتی روی سازه ساخته شده در بخش بالای موتور-ژنراتور قرار داده شده‌اند.



شکل ۴- نمایی از کل تجهیزات نصب شده در سالن CHP شامل موتور-ژنراتور، مبدل حرارتی، پمپها، ورودی گاز و غیره

همانگونه در بالا توضیح داده شد، سیال انتخابی برای بازیافت حرارت، آب می‌باشد. سیستم CHP، آب با دمای ۷۰ درجه سانتیگراد را به آب با دمای ۹۰ درجه سانتیگراد می‌رساند. لذا برای تامین سرمایش و استفاده از آب ۹۰ درجه تولیدی، نیاز به استفاده از چیلر جذبی می‌باشد. چیلر جذبی مورد استفاده در طرح حاضر، چیلر یک مرحله‌ای طرح کریر با تغذیه آب گرم ۹۰ درجه توسط ژنراتور چیلر جذبی می‌باشد. محاسبات انجام شده مشخص نمودند که با انتخاب ظرفیت چیلر جذبی ۲۱۰ تن تبرید، ضمن استفاده کامل از حرارت بازیافتی توسط سیستم CHP، سرمایش مورد نیاز ساختمانهای مربوطه در دانشگاه کاشان نیز تامین می‌شود. شکل (۵) چیلر جذبی نصب شده را نشان می‌دهد.



شکل ۵- نمایی کلی از چیلر جذبی نصب شده و برخی از ملحقات آن داخل سالن چیلر جذبی

۳- ارزیابی اقتصادی طرح ازدیدگاه ملی

همانگونه که توضیح داده شد، تولید انرژی الکتریکی در اغلب نیروگاههای گازی (بدون سیکل ترکیبی) با راندمان حدود ۳۰ تا ۳۵ درصد انجام می-گیرد و بخش زیادی از انرژی سوخت مصرفی به هدر می-رود. همچنین انتقال برق تولیدی به محل مصرف، نیازمند زیرساختهای لازم شبکه توزیع است که علاوه بر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، تلفات انرژی الکتریکی در سیستم توزیع را نیز به همراه خواهد داشت. مزیت مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی‌های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است. این نکته باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات ناشی از این خواهد شد. همچنین کاهش مصرف سوخت در سیستم حاضر، باعث کاهش قابل توجه آلاینده‌های زیست محیطی می‌شود. در محاسبات انجام گرفته برای آنالیز اقتصادی طرح، این موارد لحاظ نشده است ولی با این وجود، صرفه اقتصادی بسیار مناسب طرح اثبات خواهد شد. برای آنالیز اقتصادی طرح موارد زیر تعریف و لحاظ می‌شود.

هزینه اولیه شامل تمامی هزینه‌های مورد نیاز برای خرید، نصب و راه‌اندازی سیستم از قبیل تجهیزات، طراحی، مدیریت پروژه، نیروی کار، هزینه‌های گمرکی و دیگر موارد مرتبط است.

راندمان کل سیستم بیانگر نسبت انرژی خروجی مفید (بصورت برق و حرارت و تبرید) به انرژی سوخت مصرفی است. راندمان الکتریکی موثر، نسبت انرژی الکتریکی تولیدی به تفاضل انرژی سوخت مصرفی و حرارت مفید تولید شده است.

هزینه تعمیر و نگهداری شامل بازرسی‌های دوره‌ای، تعمیرات اساسی و هزینه نیروی انسانی است. جدول (۱) برخی از پارامترهای فنی و اقتصادی موتورهای گازسوز را نشان می‌دهد.

جدول ۱- پارامترهای فنی و اقتصادی سیستم CHP

توان (MWe)	۱
هزینه اولیه سیستم CHP (بدون در نظر گرفتن هزینه های چیلر جذبی) (دلار)	۱۰۰۰۰۰۰
راندمان کلی سیستم CHP	٪۸۵
راندمان الکتریکی	٪۴۰
نسبت توان به حرارت	۰.۹
قابلیت عملکرد دائم	٪۹۵
سوخت مصرفی	گاز طبیعی
نوع سیال خروجی در سیستم انرژی بازیافتی	آب گرم ۹۰ درجه (ورودی ۷۰ درجه)
هزینه تعمیر و نگهداری (\$/KWh)	۰.۰۱
دوره تعمیرات اساسی (ساعت)	۴۸۰۰۰
عملکرد در توانهای کم	بلی
زمان استارت	۱۰ ثانیه
آلودگی صوتی	بالا

در سیستم CCHP سه نوع محصول شامل برق، حرارت و تبرید تولید می شود. لازم بذکر است که در سیستم حاضر، حسب نیاز و در یک بازه زمانی، برق و حرارت و یا برق و برودت تولید خواهد شد. تولید برودت با استفاده از چیلر جذبی انجام میشود که مصرف حرارت آن، توسط سیستم CHP تامین می شود. با وجود چیلر جذبی، حرارت تولیدی سیستم در اکثر مواقع سال مورد استفاده قرار می گیرد. لذا برای آنالیز اقتصادی طرح می توان دو دیدگاه را مطرح نمود. دیدگاه اول در نظر گرفتن هزینه های مربوط به چیلر جذبی در طرح است. در این دیدگاه، ارزش یک واحد تولید برودت نیز باید در نظر گرفته شود. دیدگاه دوم با این فرض انجام می شود که چیلر جذبی توسط سرمایه گذار و مستقل از سیستم CHP تامین شده است و حرارت مورد نیاز آن توسط بویلر تامین می شده است. با نصب سیستم CHP، بویلر از مدار خارج و حرارت تولیدی CHP جایگزین آن می شود. در این دیدگاه تنها هزینه ها و فایده های سیستم CHP در نظر گرفته شده و دیگر نیازی به وارد نمودن ارزش اقتصادی تولید برودت نیست. در محاسبات حاضر از دیدگاه دوم که مرسوم است استفاده می شود.

برای ارزیابی اقتصادی طرح و محاسبه برگشت سرمایه از دیدگاه ملی، ابتدا پیش فرضهای مربوط به پارامترهای اولیه اقتصادی محاسبات که بر اساس بررسی های انجام شده لحاظ شده اند داده می شوند. پیش فرضهای محاسبات در جدول (۲) داده شده اند.

روش در نظر گرفته شده در آنالیز اقتصادی از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) بررسی شده است. کلیه

سرمایه گذاری اولیه در پروژه هزینه شده و عمر مفید سیستم ۲۰ سال تخمین زده شده است.

باتوجه به جداول تعمیرات و سرویس های دوره ای و حذف ساعتهای آن و در نظر گرفتن سایر احتمالات برای عدم کارکرد سیستم، با فرض در مدار بودن موتور ژنراتور با بار کامل (Full Load)، با توجه به توان خروجی واقعی ۱۰۰۰ کیلووات، مقدار انرژی الکتریکی تولیدی سالانه برابر ۷۵۰۰ مگاوات ساعت می باشد.

با توجه به راندمان حرارتی سیستم و تولید ۱۱۲۵ کیلووات ساعت حرارت، توان حرارتی واقعی خروجی سیستم در یک سال برابر ۸۴۳۷.۵ مگاوات ساعت است. اگر این حرارت توسط یک بویلر با راندمان ۱۰ درصد هم ایجاد شود (راندمان بویلر حدود ۸۰ درصد است)، نیاز به ۱۱۲.۵ مترکعب سوخت گاز در هر ساعت و یا ۸۴۳۷۵۰ مترکعب سالیانه می باشد. این مقدار سوخت گاز در حقیقت توسط سیستم CHP صرفه جویی شده است.

جدول ۲- پارامترهای اقتصادی اولیه از دیدگاه ملی

Capital cost (\$)	1000000
Natural gas price (\$/m ³)	0.23
Electricity price (\$/KWh)	0.09
Electricity Power output (KW)	1000
Thermal Power output (KW)	1125
Working hour per year	7500
Life time (year)	20
O & M cost (\$/KWhe)	0.01
Interest rate	%12
Fuel cost increase per year	%4
O & M increase per year	%10
Energy sales price increase per year	%10
Feul consumption (m ³ /hour)	250

موتور گاز سوز در حالت بار کامل ۲۵۰ مترمکعب در ساعت و یا معادل ۱۸۷۵۰۰۰ مترمکعب در سال گاز طبیعی استفاده می‌کند. لذا با توجه به زمان‌های بهره‌برداری و قیمت گاز طبیعی، هزینه سوخت مصرفی در سال اول بهره‌برداری ۴۳۱۲۵۰ دلار خواهد بود که این مبلغ سیر صعودی سالانه به میزان ۴ درصد را خواهد داشت.

با توجه به مقدار متوسط در نظر گرفته شده برای هزینه تعمیر و نگهداری، این هزینه‌ها برای ساعتهای بهره‌برداری برابر $(0.01 * 1000 * 7500 = 75000)$ دلار خواهد بود که این مبلغ نیز به میزان ۱۰ درصد افزایش سالانه خواهد داشت. لذا مجموع هزینه‌های سال اول برابر ۵۰۶۲۵۰ دلار است.

با در نظر گرفتن قیمت هر کیلووات ساعت برق تولیدی معادل ۰.۰۹ دلار، درآمد سالیانه ناشی از فروش برق تولیدی برابر ۶۷۵۰۰۰ دلار خواهد بود. با توجه به اینکه حرارت تولیدی توسط سیستم CHP، معادل صرفه‌جویی سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی است و قیمت هر مترمکعب گاز طبیعی ۰.۲۳ دلار در نظر گرفته شده است، ارزش اقتصادی گاز صرفه‌جویی شده در یک سال توسط سیستم معادل ۱۹۴۰۶۲.۵ دلار می‌باشد. با توجه به مقادیر بدست آمده، درآمد ناخالص سیستم CHP طی سال اول برابر ۳۶۲۸۱۲.۵ دلار (فروش-هزینه) محاسبه می‌شود. این مقدار مشخص کننده نرخ برگشت سرمایه IRR برابر ۳۶.۳ درصد است. لازم بذکر است که در محاسبات انجام شده، منفعت‌های اجتماعی ناشی از کاهش آلاینده‌های زیست محیطی لحاظ نشده است.

جدول ۳، محاسبات را برای چند سال بهره‌برداری سیستم که شامل جریان مالی کل جمعی (Cumulative Net Cash Flow) نیز می‌باشد را نشان می‌دهد. با توجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال تخمین زده می‌شود.

جدول ۳- محاسبات فایده، هزینه و برگشت سرمایه

Description	0	سال اول	سال دوم	سال سوم	سال چهارم	سال پنجم
هزینه کل اولیه (\$)	1000000					
سوخت گاز مصرفی سالیانه		1875000	1875000	1875000	1875000	1875000
قیمت واحد گاز ($\$/m^3$)		0.23	0.2392	0.248768	0.2587187	0.2691
هزینه سالیانه گاز (\$)		431250	448500	466440	485097.6	504501.5
هزینه تعمیر و نگهداری (\$)		75000	82500	90750	99825	109807.5
هزینه کل دلار	1000000	506250	531000	557190	584922.6	614309
برق تولیدی سالیانه (kwh)		7500000	7500000	7500000	7500000	7500000
قیمت فروش برق تولیدی (\$/KWh)		0.09	0.0936	0.097344	0.10124	0.10529
قیمت برق تولیدی (\$)		675000	702000	730080	759283	789655
سوخت گاز صرفه جویی شده سالیانه (بر اساس حرارت بازیافتی) (m^3)		843750	843750	843750	843750	843750
هزینه سوخت صرفه جویی شده (\$)		194062.5	201825	209898	218294	227025
درآمد سالیانه ناشی از برق و حرارت (\$)		869062	903825	939978	977577	1016680
درآمد ناخالص سالیانه (Net Cash Flow) (\$)	1000000-	362812	372825	382788	392654.4	402371
Cumulative Net Cash Flow(\$)	1000000-	637188-	264363-	118425	511079	913450

در مسیر حرکت جهانی به سوی توسعه پایدار، توجه به مضرات زیست محیطی ناشی از سوختهای فسیلی امری ضروری و مهم است. در این راستا، توجه به میزان انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای از منظر اثرات محلی، منطقه‌ای و جهانی از اهمیت شایانی برخوردار است. همانطور که توضیح داده شد، از جمله مزایای سیستم CCHP، کاهش گازهای آلاینده محیط و به تبع آن کاهش هزینه‌های اجتماعی می‌باشد. کاهش مقدار آلاینده‌ها به ازاء هر متر مکعب گاز طبیعی، حدود ۲.۱۶ کیلوگرم است. با توجه به کاهش سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی توسط سیستم اجرا شده، انتظار کاهش مقدار متناهی گاز آلاینده و حدود ۱۸۰۰ تن در یک سال می‌رود که حدود ۹۹.۸٪ آن CO₂ است.

۴- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری نهایی

با توجه به مطالب بیان شده، کلیه عملیات نصب، تست و راه‌اندازی اولیه سیستم CCHP بطور کامل انجام شده است. در پروژه انجام شده در دانشگاه کاشان مراحل طراحی، ساخت، نصب و راه‌اندازی یک سیستم تولید همزمان برق، حرارت و تبرید، با ظرفیت تولید برق یک مگاوات، تولید حرارت ۱.۲ مگاوات و تولید سرمایش حدود ۲۰۰ تن تبرید، بطور کامل انجام شده است. از جمله مزیت‌های مهم سیستم CCHP اجرا شده در دانشگاه کاشان، علاوه بر راندمان بالای مجموعه (شامل ۴۰ درصد راندمان الکتریکی و ۴۵ درصد راندمان حرارتی و در مجموع راندمان ۸۵ درصد)، استفاده و مصرف انرژی‌های تولیدی در محل دانشگاه کاشان است که باعث حذف هزینه ایجاد شبکه توزیع و تلفات آن شده است. صرفه‌جویی بدست آمده از کاهش مصرف سوخت، باعث کاهش قابل توجه آلاینده‌های زیست محیطی نیز شده است. آنا لیز اقتصادی طرح مذکور از دو دیدگاه بازگشت سرمایه (Payback) و نرخ بازگشت سرمایه (IRR) انجام شده است. با توجه به محاسبات انجام شده، مدت زمان برگشت سرمایه طرح مذکور کمتر از ۳ سال و نرخ بازگشت سرمایه حدود ۳۶ درصد تخمین زده شده است. با توجه به کاهش سالیانه ۸۴۳۷۵۰ مترمکعب گاز طبیعی توسط سیستم اجرا شده، انتظار کاهش مقدار متناهی گاز آلاینده و حدود ۱۸۰۰ تن در یک سال می‌رود که حدود ۹۹.۸٪ آن CO₂ است.

تشکر و قدردانی

مقاله حاضر براساس پروژه طرح پایلوت تولید برق، حرارت و برودت دانشگاه کاشان که با حمایت شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور به انجام رسیده، تهیه شده است. نویسندگان مقاله تشکر و قدردانی خود را از شرکت بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور ابراز می‌نمایند.

www.cementtechnology.ir