

بِسْمِ اللّٰهِ الرَّحْمٰنِ الرَّحِیْمِ



دانشکده مهندسی مکانیک
رشته مهندسی سیستم‌های انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد

تحلیل فنی - اقتصادی سیکل تولید همزمان سرمایه‌گذاری، گرمایش و قدرت
بر پایه‌ی محرک اولیه‌ی میکروتوربین هیبرید (خورشیدی - گازی)
برای یک ساختمان مسکونی

نگارنده: امیرعلی بقایی

اساتید راهنما:

دکتر محمود چهارطاقی

دکتر علی سررشته داری

شهریور ۱۳۹۶

شماره: ۳,۲۹۶/۱۴۲
تاریخ: ۹۲/۷/۲۵

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صورتجلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم / آقای امیرعلی بقایی با شماره دانشجویی ۹۳۰۳۹۶۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش مهندسی سیستم های انرژی تحت عنوان تحلیل فنی- اقتصادی سیکل تولید همزمان سرمایش، گرمایش و قدرت، برپایه ی محرک اولیه ی میکروتوربین هیبرید (خورشیدی- گازی) برای یک ساختمان مسکونی که در تاریخ ۱۳۹۶/۶/۲۲ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می گردد:

قبول (با امتیاز ۱۹/۲۶ درجه عالی) مردود
نوع تحقیق: نظری عملی

عضو هیأت داوران	نام و نام خانوادگی	مرتبه علمی	امضاء
۱- استاد راهنمای اول	دکتر محمود چهارطاقی	استادیار	
۲- استاد راهنمای دوم	دکتر علی سررشته داری	استادیار	
۳- استاد مشاور	-	-	-
۴- نماینده تحصیلات تکمیلی	دکتر علی جباری مقدم	دانشیار	
۵- استاد ممتحن اول	دکتر احمد نظری	استادیار	
۶- استاد ممتحن دوم	دکتر محمدحسن کیهانی	استاد	

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده:

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:



تبصره: در صورتی که کسی مردود شود حداکثر یکبار دیگر (در مدت مجاز تحصیل) می تواند از پایان نامه خود دفاع نماید (دفاع مجدد نباید زودتر از ۴ ماه برگزار شود).

تعهد نامه

اینجانب امیرعلی بقایی دانشجوی دوره کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک- سیستم های انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه تحلیل فنی- اقتصادی سیکل تولید همزمان سرمایش، گرمایش و قدرت بر پایه ی محرک اولیه ی میکروتوربین هیبرید(خورشیدی- گازی) برای یک ساختمان مسکونی تحت راهنمایی دکتر محمود چهارطاقی و دکتر علی سررشته داری متعهد می شوم.

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهشهای محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام « دانشگاه صنعتی شاهرود » و یا « Shahrood University of Technology » به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه ، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آنها) استفاده شده است ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری ، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزار ها و تجهیزات ساخته شده است) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از روش‌های افزایش بازده تبدیل انرژی و کاهش تولید آلاینده‌ها در بخش ساختمان، استفاده از سیکل تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت می‌باشد. این سیستم‌ها از نظر محرک اولیه، انواع مختلفی دارند. یکی از این محرک‌ها میکروتوربین گاز می‌باشد. با افزودن یک رسیور خورشیدی به میکروتوربین‌های گاز موجود در بازار، امکان استفاده از انرژی خورشیدی به منظور تامین بخشی از حرارت مورد نیاز سیکل فراهم می‌گردد. اجزای تشکیل دهنده سیکل مذکور شامل؛ میکروتوربین گاز، دیش‌های سهموی، رسیور خورشیدی، چیلر جذبی، بویلر کمکی، بویلر بازیاب و مخزن ذخیره حرارت می‌باشد. در این مطالعه، سیکل تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت بر پایه محرک اولیه میکروتوربین خورشیدی هیبرید در محیط نرم‌افزاری شبیه‌سازی شده است. عملکرد سالانه سیکل، در شرایط واقعی، برای یک ساختمان مسکونی در سه شهر تهران، یزد و بندرعباس مورد ارزیابی قرار گرفته است. تاثیر تغییر تعداد میکروتوربین، تغییر مساحت دیش‌های سهموی و تغییر حجم مخزن ذخیره حرارتی مورد بررسی قرار گرفته است. هزینه‌ی برابر شده‌ی برق تولیدی سیکل در قالب سناریوهای قیمتی مختلف محاسبه و بهترین حالت پیشنهاد شده است. این سناریوها شامل تعرفه‌های بین‌المللی و تعرفه‌های داخلی انرژی می‌باشد. نقش سیاست‌های انرژی دولت ایران (شامل هدفمندی یارانه‌ها و حمایت از انرژی‌های تجدیدپذیر) نیز در قالب چند سناریو مورد بررسی قرار گرفته است. حالت‌هایی که از نظر اقتصادی دارای بهترین وضعیت بوده معرفی و برخی از ویژگی‌های فنی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. سهم هرکدام از تجهیزات در هزینه‌ی اولیه و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری مشخص شده است. همچنین نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی سالانه، ماهیانه و ساعتی به دست آمده است. در نهایت هزینه‌ی برابر شده‌ی برق تولیدی سیکل مذکور با هزینه‌ی برق تولیدی سامانه‌های فتوولتائیک و همچنین تعرفه‌ی خرید برق توسط شبکه سراسری مقایسه شده است. نتایج نشان دهنده‌ی آن است که در بسیاری از سناریوها هزینه‌ی تمام شده‌ی برق تولیدی توسط سیستم مورد نظر، از هزینه‌ی برق تولیدی

توسط سیستم‌های فتوولتائیک کمتر، ولی از تعرفه‌ی فروش برق به شبکه سراسری بیشتر می‌باشد. به صورتی که هزینه‌ی برق تولیدی در سیکل مذکور در اغلب سناریوها بین ۱۰ تا ۸۰٪ بیشتر از تعرفه فروش برق به شبکه سراسری می‌باشد. همچنین در مقایسه با برق تولیدی توسط سیستم‌های فتوولتائیک، در برخی از سناریوها بین ۵ تا ۲۰٪ کمتر و در مابقی سناریوها بیشتر از قیمت های برق فتوولتائیک می‌باشد. همچنین هزینه‌ی برق تولیدی در حالت دارای مخزن ذخیره نسبت به حالت فاقد مخزن ذخیره بین ۲ تا ۲۰٪ کمتر می‌باشد. لذا با توجه به اینکه این فناوری هنوز در قدم‌های اول توسعه بوده و به اندازه‌ی فتوولتائیک بر روی آن کار نشده است، به نظر می‌رسد که در آینده بتواند بخشی از بازار انرژی را به خود اختصاص دهد.

کلمات کلیدی: تولید همزمان، میکروتوربین، دیش سهموی، انرژی خورشیدی، تولید پراکنده

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه:

چهارطاقی. م، بقایی. ا، سررشته‌داری. ع، (۱۳۹۶)، "بررسی عملکرد میکروتوربین خورشیدی هیبرید

برای شهر تهران"، هفدهمین کنفرانس دینامیک شاره‌ها، دانشگاه صنعتی شاهرود

فهرست مطالب

فصل اول: مقدمه.....	۱
۱-۱- مقدمه‌ای در مورد سیکل تولید همزمان.....	۲
۲-۱- توربین گاز.....	۴
۳-۱- میکروتوربین گاز.....	۵
۴-۱- میکروتوربین خورشیدی هیبرید.....	۷
۵-۱- رسیور خورشیدی و دیش‌های سهموی.....	۸
۶-۱- مروری بر کارهای گذشته.....	۱۱
۷-۱- ضرورت انجام تحقیق، نکات برجسته و نوآوری‌های کار حاضر.....	۱۴
فصل دوم: مدلسازی.....	۱۵
۱-۲- پیکربندی سیکل تولید همزمان.....	۱۶
۲-۲- اجزای تشکیل دهنده‌ی سیکل.....	۱۷
۱-۲-۲- میکروتوربین‌ها.....	۱۷
۲-۲-۲- دیش‌های سهموی.....	۱۸
۳-۲-۲- رسیور خورشیدی.....	۱۸
۴-۲-۲- بویلر بازیاب.....	۱۹
۵-۲-۲- بویلر کمکی.....	۱۹
۶-۲-۲- چیلر جذبی.....	۲۰
۷-۲-۲- مخزن ذخیره‌ی حرارت.....	۲۰
۳-۲- نحوه‌ی کنترل عملکرد سیکل.....	۲۰
۱-۳-۲- نحوه‌ی عملکرد سیکل در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی.....	۲۰
۲-۳-۲- نحوه‌ی عملکرد سیکل در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی.....	۲۱
۴-۲- معادلات حاکم در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی.....	۲۳
۱-۴-۲- معادلات تولید همزمان.....	۲۳

۲۵	..... ۲-۴-۲- کمپرسور
۲۷	..... ۳-۴-۲- رکوپراتور
۲۸	..... ۴-۴-۲- رسیور خورشیدی
۲۹	..... ۵-۴-۲- محفظه احتراق
۳۰	..... ۶-۴-۲- توربین
۳۰	..... ۷-۴-۲- بویلر بازیاب
۳۱	..... ۸-۴-۲- معادلات قدرت
۳۱	..... ۹-۴-۲- حالت پاره‌بار
۳۲	..... ۱۰-۴-۲- بویلر کمکی
۳۲	..... ۱۱-۴-۲- معادلات خورشیدی
۳۵	فصل سوم: مطالعه‌ی موردی
۳۶	..... ۱-۳- معرفی ساختمان مورد بررسی
۳۷	..... ۲-۳- مشخصات فنی سیکل تولید همزمان مورد استفاده
۳۹	..... ۳-۳- استراتژی‌های اقتصادی
۴۱	..... ۴-۳- سیاست‌های انرژی ایران
۴۱	..... ۱-۴-۳- حذف یارانه‌ی انرژی
۴۱	..... ۲-۴-۳- حمایت از تولید پراکنده‌ی برق و انرژی‌های تجدیدپذیر
۴۷	فصل چهارم: نتایج و بحث
۴۸	..... ۱-۴- توضیح مختصر روش انجام تحقیق
۴۸	..... ۲-۴- بار حرارتی مورد نیاز ساختمان
۵۱	..... ۳-۴- سهم هر یک از مصرف‌کننده‌های حرارت ساختمان از کل حرارت مصرفی
۵۲	..... ۴-۴- تابش مستقیم رسیده به سطح دیش‌های سهموی
۵۳	..... ۵-۴- نتایج شبیه‌سازی‌های اقتصادی در حالت فاقد مخزن ذخیره‌ی حرارتی
۵۴	..... ۱-۵-۴- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر تهران
۵۷	..... ۱-۱-۵-۴- مقایسه LCoE تولید همزمان با LCoE فتوولتائیک

۵۹	۴-۵-۲- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر یزد.....
۵۹	۴-۵-۳- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر بندرعباس.....
۶۱	۴-۶- برق تولیدی و سوخت مصرفی حالت‌های جدول (۴-۴).....
۶۳	۴-۷- نمودار ساعتی برق فروخته شده به شبکه سراسری.....
۶۴	۴-۷-۱- نمودار ساعتی برق تولیدی تهران.....
۶۷	۴-۷-۲- نمودار ساعتی برق تولیدی یزد.....
۶۹	۴-۷-۳- نمودار ساعتی برق تولیدی بندرعباس.....
۷۲	۴-۸- سهم هر کدام از اجزا در تامین حرارت سالانه مورد نیاز ساختمان.....
۷۵	۴-۹- سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین.....
۷۸	۴-۱۰- سهم هر یک از تجهیزات از هزینه‌ی اولیه و هزینه‌ی نگهداری سالانه.....
۸۱	۴-۱۱- نتایج شبیه‌سازی‌های اقتصادی در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی.....
۸۴	۴-۱۲- مقایسه LCoE در حالت دارای مخزن و فاقد مخزن ذخیره حرارتی.....
۸۴	۴-۱۲-۱- مقایسه برای شهر تهران.....
۸۵	۴-۱۲-۲- مقایسه برای شهر یزد.....
۸۶	۴-۱۲-۳- مقایسه برای شهر بندرعباس.....
۸۹	فصل پنجم: نتیجه‌گیری، جمع‌بندی و پیشنهادات.....
۹۳	منابع.....

فهرست شکل ها

- شکل ۱-۱: جریان گرما در سیکل تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت ۳
- شکل ۲-۱: دیاگرام عملکرد توربین گاز رکوپراتوردار ۴
- شکل ۳-۱: نمایی از سه دستگاه میکروتوربین گاز نصب شده ۶
- شکل ۴-۱: اجزای داخلی میکروتوربین گاز ۶
- شکل ۵-۱: دیاگرام میکروتوربین خورشیدی هیبرید ۷
- شکل ۶-۱: نحوه‌ی متمرکز کردن، انتقال و دریافت نور توسط دیش سهموی و رسیور خورشیدی ۹
- شکل ۱-۲: دیاگرام شماتیک CCHP بر پایه میکروتوربین خورشیدی هیبرید در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارت ۲۲
- شکل ۱-۴: پروفیل ماهیانه حرارت مصرفی مجتمع مسکونی برای پاسخ به نیازهای گرمایشی، سرمایشی و آب گرم مصرفی ۴۹
- شکل ۲-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، تهران ۵۰
- شکل ۳-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، یزد ۵۰
- شکل ۴-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، بندرعباس ۵۰
- شکل ۵-۴: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (تهران) ۵۱
- شکل ۶-۴: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (یزد) ۵۱
- شکل ۷-۴: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (بندرعباس) ۵۱
- شکل ۸-۴: تابش مستقیم رسیده به سطح دیش‌های سهموی در ماههای مختلف سال ۵۳
- شکل ۹-۴: میانگین شدت تابش مستقیم دریافتی در ساعات مختلف روز ۵۳
- شکل ۱۰-۴: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر تهران ۶۲
- شکل ۱۱-۴: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر یزد ۶۲
- شکل ۱۲-۴: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر بندرعباس ۶۳
- شکل ۱۳-۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران ($N=2, A=0$) ۶۴
- شکل ۱۴-۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران ($N=2, A=0$) ۶۴
- شکل ۱۵-۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران ($N=3, A=0$) ۶۵

- شکل ۴-۱۶: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران ($N=3, A=0$) ۶۵
- شکل ۴-۱۷: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران ($N=3, A=1000$) ۶۵
- شکل ۴-۱۸: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران ($N=3, A=1000$) ۶۶
- شکل ۴-۱۹: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد ($N=3, A=0$) ۶۷
- شکل ۴-۲۰: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد ($N=3, A=0$) ۶۷
- شکل ۴-۲۱: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد ($N=3, A=1000$) ۶۷
- شکل ۴-۲۲: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد ($N=3, A=1000$) ۶۸
- شکل ۴-۲۳: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد ($N=5, A=1500$) ۶۸
- شکل ۴-۲۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد ($N=5, A=1500$) ۶۸
- شکل ۴-۲۵: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس ($N=5, A=0$) ۶۹
- شکل ۴-۲۶: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس ($N=5, A=0$) ۶۹
- شکل ۴-۲۷: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس ($N=6, A=2000$) ۷۰
- شکل ۴-۲۸: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس ($N=6, A=2000$) ۷۰
- شکل ۴-۲۹: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس ($N=7, A=2000$) ۷۰
- شکل ۴-۳۰: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس ($N=7, A=2000$) ۷۱
- شکل ۴-۳۱: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس ($N=7, A=2500$) ۷۱
- شکل ۴-۳۲: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس ($N=7, A=2500$) ۷۱
- شکل ۴-۳۳: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران ($N=2, A=0$) ۷۲
- شکل ۴-۳۴: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران ($N=3, A=0$) ۷۲
- شکل ۴-۳۵: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران ($N=3, A=1000$) ۷۳
- شکل ۴-۳۶: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد ($N=3, A=0$) ۷۳
- شکل ۴-۳۷: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد ($N=3, A=1000$) ۷۳
- شکل ۴-۳۸: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد ($N=5, A=1500$) ۷۳
- شکل ۴-۳۹: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس ($N=5, A=0$) ۷۴
- شکل ۴-۴۰: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس ($N=6, A=2000$) ۷۴

- شکل ۴-۴۱: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=7,A=2000) ... ۷۴
- شکل ۴-۴۲: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=7,A=2500) ... ۷۴
- شکل ۴-۴۳: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=2,A=0) ۷۵
- شکل ۴-۴۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=3,A=0) ۷۵
- شکل ۴-۴۵: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=3,A=1000) ۷۶
- شکل ۴-۴۶: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=3,A=0) ۷۶
- شکل ۴-۴۷: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=3,A=1000) ۷۶
- شکل ۴-۴۸: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=5,A=1500) ۷۶
- شکل ۴-۴۹: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=5,A=0) ۷۷
- شکل ۴-۵۰: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=6,A=2000) ۷۷
- شکل ۴-۵۱: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=7,A=2000) ۷۷
- شکل ۴-۵۲: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=7,A=2500) ۷۷
- شکل ۴-۵۳: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سالیانه (تهران) ۷۹
- شکل ۴-۵۴: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سالیانه (یزد) ۸۰

شکل ۴-۵۵: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری
سالانه (بندرعباس)..... ۸۰

شکل ۴-۵۶: دیاگرام میکروتوربین هیبرید(خورشیدی - گازی)..... ۸۷

فهرست جداول

- جدول ۳-۱: جنس دیوارهای خارجی ساختمان مورد بررسی ۳۶
- جدول ۳-۲: جنس سقف ساختمان مورد بررسی ۳۶
- جدول ۳-۴: مشخصات فنی میکروتوربین‌های مورد استفاده ۳۸
- جدول ۳-۶: سناریوهای اقتصادی مورد مطالعه ۴۲
- جدول ۳-۷: لیست قیمت تجهیزات و حامل‌های انرژی ۴۴
- جدول ۴-۱: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر تهران ۵۴
- جدول ۴-۲: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر یزد ۵۹
- جدول ۴-۳: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر بندرعباس ۶۰
- جدول ۴-۴: ترکیب مساحت و تعداد میکروتوربین بهینه ۶۱
- جدول ۴-۵: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر تهران ۸۲
- جدول ۴-۶: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر یزد ۸۲
- جدول ۴-۷: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر بندرعباس ۸۳
- جدول ۴-۸: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر تهران ۸۴
- جدول ۴-۹: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر یزد ۸۵
- جدول ۴-۱۰: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر بندرعباس ۸۶
- جدول ۴-۱۱: دمای سیال عامل در نقاط مختلف میکروتوربین بر حسب درجه سانتی‌گراد برای روز ۱۵ تیر، شهر تهران، در حالت (N=3, A=1000) ۸۷

فهرست علائم

علائم	زیر نویس‌ها
A	مساحت 1 ورود به کمپرسور
a_0	ضریب تعدیل خورشیدی 2 خروج از کمپرسور
b	ضریب تعدیل خورشیدی 3 هوای ورودی به رسیور
B_0	منفعت سرمایه‌گذاری اولیه 4 ورود به محفظه احتراق
B_y	منفعت جاری 5 ورود به توربین
$C_{P,a}$	گرمای ویژه هوا 6 خروج از توربین
$C_{P,W}$	گرمای ویژه آب 7 گاز ورودی به بویلر
	بازیاب
C_0	هزینه سرمایه‌گذاری اولیه 8 گاز خروجی بویلر بازیاب
C_y	هزینه جاری a هوا
d	نرخ تنزیل amb محیط
DG	تولید پراکنده‌ی برق aux, B بویلر کمکی
E_y	برق تولیدی در سال مشخص c کمپرسور
G	شدت تابش مستقیم خورشید $comb$ محفظه احتراق

G_{sc}	ثابت خورشیدی	$cons$	مصرفی
h	آنتالپی	C, W	آب شهر
hr	ساعت محلی	cl, nb	هوای صاف، بر روی زمین
k	ضریب افت فشار	d	افت
k_a	ضریب اتمیسیته هوا	D, H, W	آب گرم مصرفی
l	ضریب تعدیل خورشیدی	$elec$	الکتریکی
L	تعداد میکروتوربین فول لود	f	سوخت
$LCOE$	هزینه برابر شده برق	g	گاز عبوری از توربین
LHV	ارزش حرارتی پایین سوخت	gen	ژنراتور میکروتوربین
m	جرم	gen, AC	ژنراتور سیکل جذبی
n	شماره روز	H	گرمایش ساختمان
N	تعداد میکروتوربین	$HRSG$	بویلر بازیاب
P	فشار	F	فول لود
Q	حرارت	m	مکانیکی
r	نسبت فشار	$micro$	میکروتوربین
t	توربین	on	خارج از جو زمین

T	دما	p, d	افت فشار
W	کار	P	پارت لود
y	شماره سال	rec	رسیور خورشیدی
δ	زاویه انحراف زمین	Re	رکوپراتور
Δ	تغییرات	sol	خورشیدی
ε	کارایی رکوپراتور	tot	کل
η	راندمان	w	آب
θ_{hr}	زاویه ساعت خورشیدی	بالانویس‌ها	
θ_z	زاویه سمت الراس	•	dote (نرخ زمانی)
τ_b	ضریب عبور تابش از جو		
\emptyset	عرض جغرافیایی		
ω	نسبت رطوبت		
$SSTE$	سهم خورشید از کل انرژی		

فصل اول: مقدمه

۱-۱- مقدمه‌ای در مورد سیکل تولید همزمان

بخش ساختمان یکی از مصرف‌کننده‌های عمده‌ی انرژی و یکی از بزرگترین تولیدکننده‌های آلودگی

هوا به حساب می‌آید. [۲۱]

یکی از راهکارهای کاهش آلودگی تولیدی توسط بخش ساختمان، کاهش شدت مصرف انرژی از طریق افزایش بهره‌وری انرژی و راهکار دیگر، استفاده از انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی است. در مورد راهکار اول یعنی افزایش بهره‌وری انرژی روش‌های مختلفی پیشنهاد می‌شود. استفاده از عایق دیوارها و سقف به منظور کاهش شدت انتقال حرارت، استفاده از پنجره‌های دو جداره، استفاده از روشنایی طبیعی روز به جای استفاده از نور مصنوعی، استفاده از پرده‌های ضخیم، استفاده از رنگ روشن در نمای ساختمان‌ها برای مناطق گرمسیری و ... از جمله‌ی این روش‌ها است. یکی از روش‌های مهم و تاثیرگذاری که برای افزایش بهره‌وری انرژی در ساختمان‌ها مطرح می‌شود، استفاده از سیکل تولید همزمان است. سیکل تولید همزمان مشابه یک نیروگاه تولید برق کوچک عمل می‌کند، با این تفاوت که حرارت اتلافی آن به جای تخلیه به اتمسفر، برای تامین نیازهای حرارتی ساختمان بازیافت می‌شود. در ساختمان‌هایی که از سیکل تولید همزمان استفاده می‌کنند، راندمان تبدیل انرژی تا ۸۰٪ نیز قابل افزایش است.

سیکل تولید همزمان به دو صورت کار می‌کند:

- تولید همزمان حرارت و قدرت (CHP)^۱

در این سیکل حرارت اتلافی در فصل سرد سال صرف تامین حرارت گرمایشی و تامین آب گرم مصرفی ساختمان شده و در سایر فصول سال، فقط تامین آب گرم مصرفی ساختمان را بر عهده دارد.

- تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت (CCHP)^۲

¹ - Combine Heating & Power

² - Combine Cooling, Heating & Power

در این سیکل علاوه بر تامین نیازهای گرمایشی و تامین آب گرم مصرفی، امکان تامین نیازهای سرمایشی ساختمان نیز وجود دارد. به این صورت که حرارت بازیافت شده به ژنراتور سیکل تبرید جذبی هدایت شده و تولید سرما می‌کند.

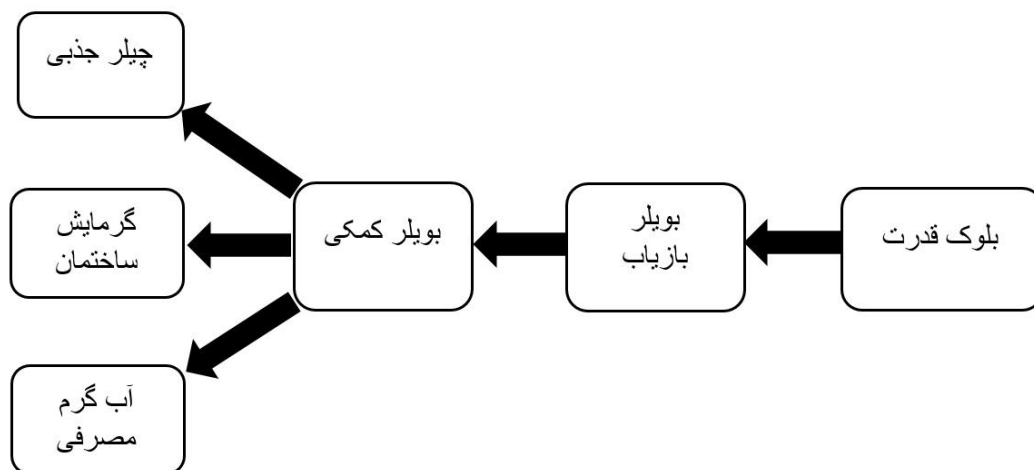
مهمترین مزایای استفاده از تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت عبارتند از [۳]:

۱- کاهش شدت مصرف انرژی

۲- افزایش قابلیت اطمینان تامین انرژی

۳- کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای

در شکل (۱-۱) جریان انرژی حرارتی یک سیکل تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت نشان داده شده است:



شکل ۱-۱: جریان گرما در سیکل تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت

بلوک قدرت که به عنوان محرک اولیه^۱ نیز شناخته می‌شود، مهمترین جزء سیکل به حساب آمده

و انواع مختلفی دارد که به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند [۴]:

الف- فناوری‌های مبتنی بر احتراق (شامل: موتور استرلینگ^۲، توربین گاز^۳، میکروتوربین گاز^۴، سیکل رنکین^۵، موتور رفت و برگشتی^۶)

¹ - Prime Mover
² - Stirling engine
³ - Gas Turbine

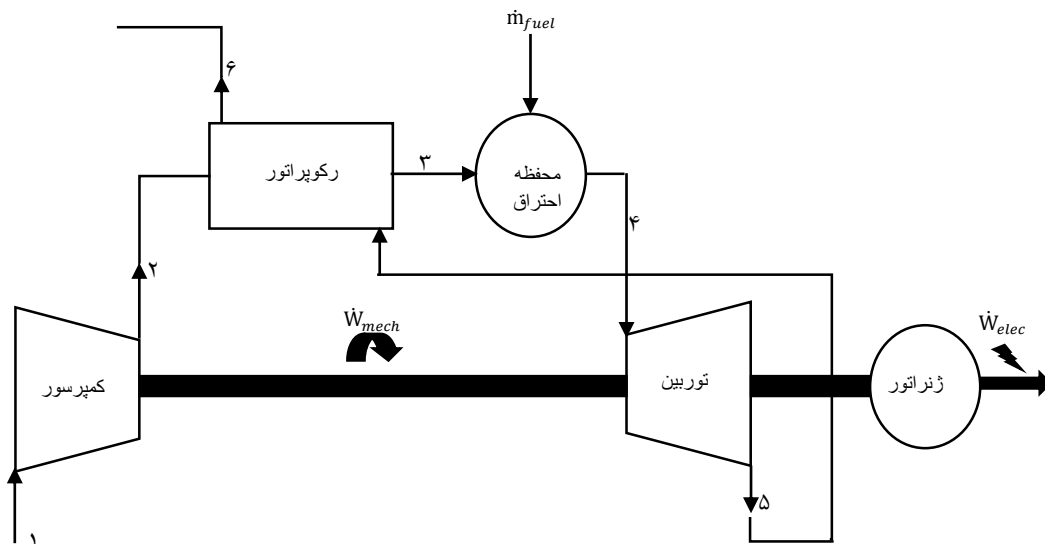
⁴ - Micro Gas Turbine
⁵ - Rankine Sycle
⁶ -Reciprocating engine

ب- فناوری‌های مبتنی بر الکتروشیمی (پیل سوختی)^۱

از آنجائیکه در مطالعه‌ی حاضر، از محرک اولیه‌ی میکروتوربین استفاده شده است، به توضیح توربین گاز و میکروتوربین گاز می‌پردازیم:

۲-۱- توربین گاز

توربین گاز از کمپرسور، رکوپراتور، محفظه احتراق، توربین و ژنراتور که بر روی یک شفت سوار شده‌اند تشکیل شده است. سیکل توربین گاز در شکل (۲-۱) نشان داده شده است.



شکل ۲-۱: دیاگرام عملکرد توربین گاز رکوپراتوردار

در این سیکل، هوای محیط توسط کمپرسور فشرده شده و به رکوپراتور وارد می‌شود. در رکوپراتور بخشی از حرارت اتلافی گاز خروجی از توربین را جذب کرده و افزایش دما می‌دهد. سپس در محفظه احتراق از طریق سوختن گاز طبیعی و یا سایر سوخت‌های فسیلی، افزایش دما داده و وارد توربین می‌شود. به دلیل انبساط در توربین، کاهش دما و فشار داده و کار تولید می‌کند. گاز خروجی از توربین سپس به رکوپراتور وارد شده و حرارت خود را به هوای خروجی از کمپرسور می‌دهد. سپس به اتمسفر

^۱ -Fuel Cell

تخلیه می‌شود. از آنجائیکه کمپرسور، توربین و ژنراتور بر روی یک شفت سوار هستند، تامین کار مورد نیاز کمپرسور و ژنراتور بر عهده‌ی توربین می‌باشد. محصولات خروجی در نقطه‌ی ۶ دارای دمای بالاتر از محیط می‌باشند. لذا می‌توان با نصب یک بویلر بازیاب در نقطه‌ی ۶ حرارت تلف شده را بازیافت نموده و از آن برای اهداف حرارتی و یا برودتی استفاده نمود.

۱-۳- میکروتوربین گاز

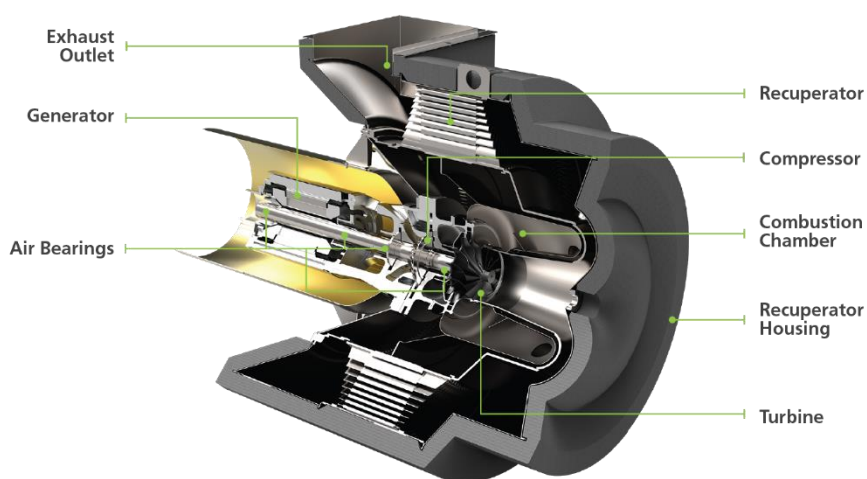
عملکرد میکروتوربین گاز مشابه توربین گاز است با چند تفاوت [۵ تا ۸]:

- ۱- **ظرفیت:** بر خلاف توربین‌های گاز که ظرفیت‌های بسیار زیادی (چند صد کیلووات تا چند صد مگاوات) دارند، میکروتوربین‌ها دارای ظرفیت‌های کوچک (۳۰ کیلووات تا ۵۰۰ کیلووات) هستند.
- ۲- **کنترل ظرفیت:** کنترل ظرفیت توربین گاز باید در دور شفت ثابت صورت پذیرد. دلیل این امر آن است که برق تولیدی توسط توربین گاز مستقیماً به شبکه مصرف تزریق می‌شود. از آنجائیکه فرکانس برق تولیدی به دور ژنراتور بستگی دارد، و ژنراتور و توربین بر روی یک شفت سوار هستند، لذا باید دور شفت توربین ثابت بماند. اما در میکروتوربین، واحد تبدیل الکتریسیته، ابتدا برق تولیدی ژنراتور را توسط یکسو کننده به برق مستقیم تبدیل کرده، سپس با استفاده از متناوب کننده مجدداً آن را به برق متناوب با فرکانس مناسب شبکه تبدیل کرده و به شبکه برق تزریق می‌کند. این مساله سبب می‌شود تا امکان تغییر دور میکروتوربین در ظرفیت‌های کمتر از ظرفیت طراحی وجود داشته باشد.
- ۳- **نسبت فشار:** نسبت فشار در توربین گاز معمولاً بالا است (بین ۱۰ تا ۳۰). اما در میکروتوربین‌ها نسبت فشار در بازه‌ی (۳ تا ۵) قرار دارد.
- ۴- **دور شفت:** توربین گاز دارای دور متوسط (۳۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰) دور بر دقیقه است. در حالی که میکروتوربین‌ها دارای دور شفت نزدیک به ۱۰۰۰۰۰ دور بر دقیقه هستند.
- ۵- **بازده:** توربین گاز دارای بازده تولید الکتریسیته بالا (حدود ۳۰٪)، در مقایسه با میکروتوربین گاز (حدود ۲۰٪) می‌باشد.

در شکل‌های (۳-۱) و (۴-۱)، نمای کلی و برش خورده‌ی میکروتوربین گاز نشان داده شده است [۹]:



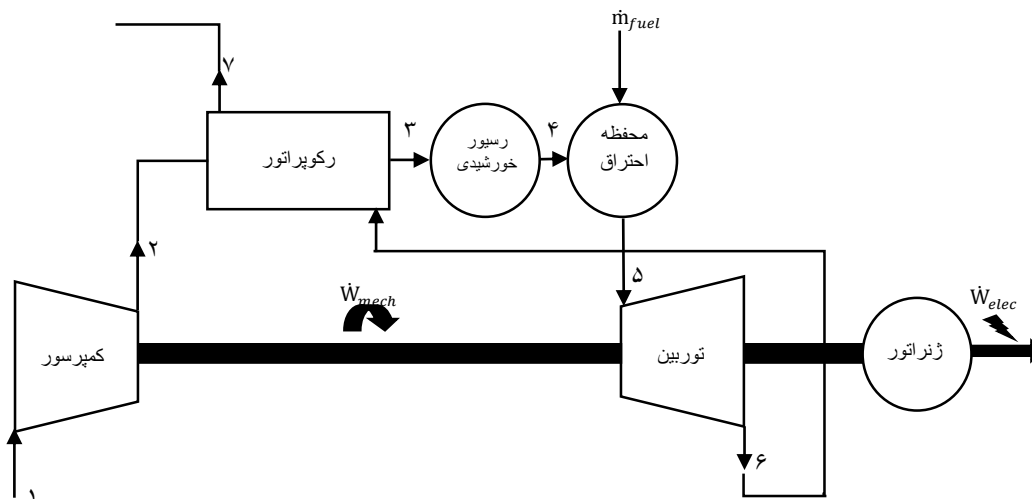
شکل ۳-۱: نمایی از سه دستگاه میکروتوربین گاز نصب شده



شکل ۴-۱: اجزای داخلی میکروتوربین گاز

۴-۱- میکروتوربین خورشیدی هیبرید

یکی از قابلیت‌های میکروتوربین‌های گاز، امکان استفاده از طیف وسیعی از منابع انرژی می‌باشد. از جمله این منابع، انرژی خورشیدی می‌باشد. اگر به سیکل نشان داده شده در شکل (۱-۲) یک رسیور خورشیدی مطابق شکل (۱-۵) اضافه کنیم، میکروتوربین گاز به میکروتوربین خورشیدی هیبرید^۱ تبدیل می‌شود. میکروتوربین خورشیدی هیبرید می‌تواند همزمان با استفاده از سوخت‌های فسیلی، بخشی از انرژی مورد نیاز را از تابش خورشیدی تامین کند.



شکل ۱-۵: دیاگرام میکروتوربین خورشیدی هیبرید

عملکرد میکروتوربین خورشیدی هیبرید مشابه آنچه در بخش ۱-۳ در مورد میکروتوربین گاز توضیح داده شد می‌باشد. با یک تفاوت:

در میکروتوربین گاز، هوای خروجی از رکوپراتور مستقیماً وارد محفظه احتراق شده و به وسیله سوزاندن سوخت فسیلی، تا شرایط مورد نیاز برای ورود به توربین افزایش دما می‌دهد. در حالی که در میکروتوربین خورشیدی هیبرید، هوای خروجی از رکوپراتور ابتدا وارد رسیور خورشیدی شده، و با توجه به شدت تابش خورشیدی، مقداری افزایش دما داده، سپس وارد محفظه احتراق می‌شود. اگر حرارت

^۱ - hybrid Solar Microturbine

اكتسابی در رسیور خورشیدی جوابگوی نیاز حرارتی سیکل باشد، مصرف سوخت در محفظه‌ی احتراق متوقف شده و هوای ورودی به محفظه احتراق بدون تغییر از آن خارج می‌شود. در صورتی که حرارت اکتسابی در رسیور خورشیدی کمتر از حرارت مورد نیاز سیکل باشد، محفظه احتراق با سوزاندن سوخت فسیلی، هوای عبوری را به شرایط استاندارد جهت ورود به توربین می‌رساند. البته از آنجائیکه حرارت دریافتی از خورشید دارای نوسان نسبتاً زیادی می‌باشد، به منظور حصول اطمینان از عملکرد پایدار میکروتوربین‌ها استفاده از محفظه‌ی احتراق اجتناب ناپذیر بوده و امکان حذف محفظه‌ی احتراق وجود ندارد.

۱-۵- رسیور خورشیدی و دیش‌های سهموی

یکی از اجزای مهم در سیکل میکروتوربین خورشیدی هیبرید، دیش‌های سهموی^۱ می‌باشند. برای فهم نحوه‌ی تامین انرژی توسط رسیور خورشیدی لازم است توضیحاتی در خصوص عملکرد دیش‌های سهموی ارائه شود. وظیفه تامین حرارت رسیور خورشیدی بر عهده‌ی دیش‌های سهموی است. تابش خورشیدی در هنگام عبور از جو زمین به سه بخش تقسیم می‌شود. بخشی از آن در هواکره جذب شده و به سطح زمین نمی‌رسد. بخش دوم توسط هوا از مسیر خود منحرف شده و راستای مستقیم خود را از دست می‌دهد و به صورت تابش پراکنده^۲ به سطح زمین می‌رسد. بخش سوم بدون تغییر و در همان مسیر مستقیم خود، به سطح زمین می‌رسد^۳. آن بخش از تابش خورشیدی که بدون تغییر و در مسیر مستقیم به سطح زمین می‌رسد را می‌توان به وسیله‌ی تجهیزات متمرکز کننده مانند لنز فرزنل، آینه‌های سهموی خطی، هلیوستات‌ها و ... متمرکز نمود. متمرکز کردن نور خورشید سبب می‌شود در نقطه‌ی کانونی دمای بسیار زیادی به دست آید. یکی از وسایلی که به منظور متمرکز کردن نور خورشید مورد استفاده قرار می‌گیرد، دیش‌های سهموی هستند. دیش‌های سهموی به دلیل ردیابی دو محوره خورشید

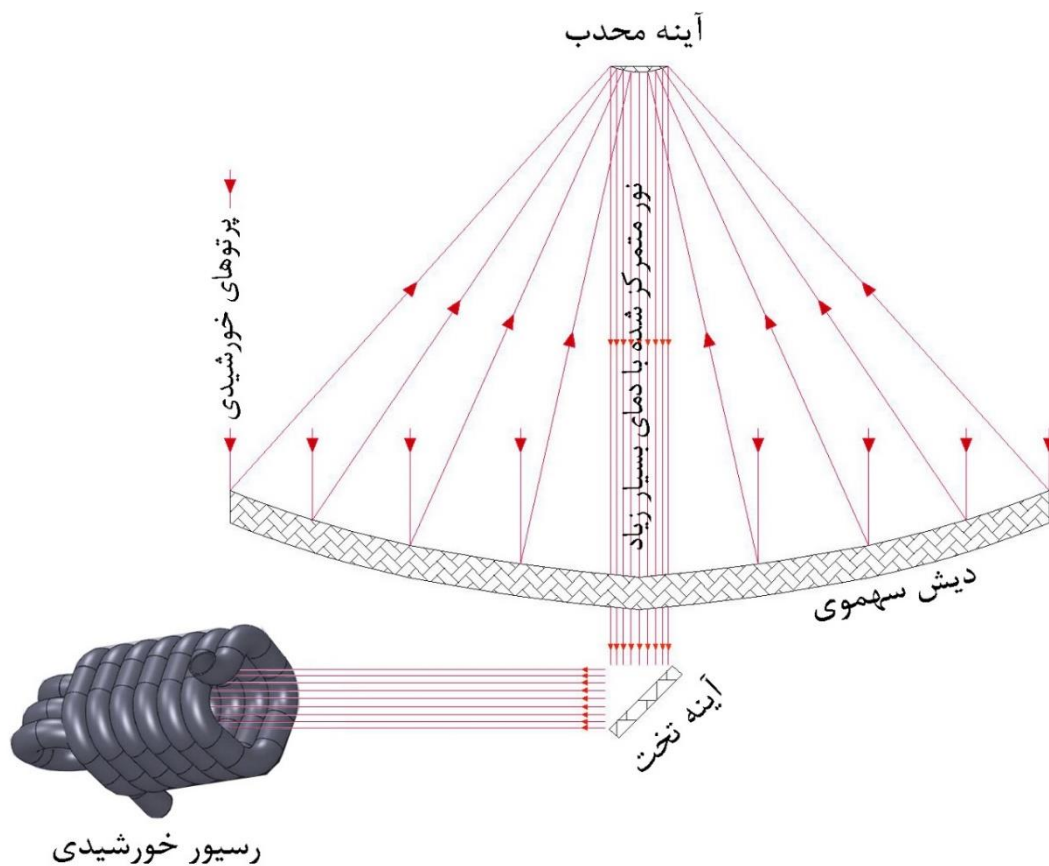
¹ - Parabolic Dish

² - Diffuse Radiation

³ - Beam Radiation

و همچنین متمرکز کردن نور در یک نقطه (به جای یک خط) دمای بسیار زیادی را تامین می‌کنند [۱۱۰ و ۱۱۱].

یکی دیگر از اجزای مهم سیکل، رسیور خورشیدی می‌باشد. مکانیزم انتقال حرارت در رسیور خورشیدی به این صورت است که سیال عامل سیکل (هوا)، پس از پشت سر گذاشتن رکوپراتور وارد رسیور خورشیدی شده و مستقیماً حرارت دریافتی از دیش‌های سهموی را دریافت می‌کند. یک نمونه از دیش سهموی و رسیور خورشیدی و نحوه متمرکز کردن نور توسط آنها در شکل (۱-۶) نشان داده شده است.



شکل ۱-۶: نحوه متمرکز کردن، انتقال و دریافت نور توسط دیش سهموی و رسیور خورشیدی

تشعشع متمرکز شده در کانون دیش را می‌توان به روش‌های مختلف به یک رسیور خورشیدی منتقل نمود. از جمله‌ی این روش‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره نمود:

۱- استفاده از فیبرهای نوری^۱: یکی از وسایل انتقال نور فیبر نوری است. این وسیله نور را با پراکنش بسیار کم و بازده نسبتاً زیاد منتقل می‌کند.

۲- لوله‌های اپتیکی^۲: یکی دیگر از وسایلی که می‌توان با استفاده از آن تابش متمرکز شده را برای فواصل کم منتقل نمود لوله‌های اپتیکی است. در این روش، تابش متمرکز شده، در خطوط موازی به آینه‌های تخت مایل تابانده شده و تغییر جهت می‌دهد. به منظور حفاظت از افراد و اشیاء و همچنین افزایش بازده انتقال، مسیر انتقال تابش توسط لوله‌هایی محصور می‌شود. درون این لوله‌ها با استفاده از موادی با ضریب بازتابش بالا پوشانده می‌شود.

۳- جابجایی رسیور خورشیدی و قرار دادن آن در کانون دیش: یکی دیگر از روش‌های انتقال تابش متمرکز شده، به رسیور خورشیدی، این است که هوای خروجی از رکوپراتور را از طریق لوله‌ها و یا شلنگ‌های قادر به تحمل دمای بالا، به رسیور مستقر در کانون دیش‌ها منتقل نموده و پس از افزایش دما در رسیور مجدداً به سیکل بازگردانده شود.

۴- قرار دادن کل مجموعه میکروتوربین در کانون دیش: در این روش کل مجموعه میکروتوربین در کانون دیش قرار می‌گیرد. قطعات میکروتوربین، به جز رسیور، به وسیله سطوح بازتابنده از تابش داغ دیش محافظت می‌شوند. این کار مشابه آنچه در مورد موتور استرلینگ انجام می‌شود می‌باشد. البته این روش محدودیت‌هایی را در ظرفیت میکروتوربین و همچنین در مساحت دیش سهموی ایجاد می‌نماید.

۵- استفاده از لوله‌های حرارتی^۳: در این روش با استفاده از تکنولوژی لوله‌های حرارتی، حرارت کانون دیش‌ها به رسیور خورشیدی که در نزدیکی دیش قرار گرفته است منتقل می‌شود.

¹ - Optical Fibre

² - Optical Pipe(Sun Pipe)

³ - Heat Pipe

۱-۶- مزایای میکروتوربین خورشیدی هیبرید نسبت به میکروتوربین

گاز

۱- مصرف سوخت فسیلی کاهش می‌یابد: به دلیل آنکه بخشی از حرارت مورد نیاز سیکل توسط

تابش خورشیدی تامین می‌شود، نیاز به مصرف سوخت‌های فسیلی کاهش می‌یابد.

۲- آلودگی تولیدی سیکل کاهش می‌یابد: کاهش مصرف سوخت فسیلی، آلودگی تولیدی سیکل را

کاهش می‌دهد.

۳- قابلیت اطمینان سیکل افزایش می‌یابد: در سیکل میکروتوربین گاز در صورت عدم دسترسی

به سوخت فسیلی، هیچ‌گونه امکانی برای ادامه‌ی کار سیکل وجود ندارد، این در حالی است که در

میکروتوربین خورشیدی هیبرید، در ساعات روز می‌توان بدون استفاده از سوخت فسیلی نیز سیکل را

(حداقل در حالت پاره‌بار) مورد بهره‌برداری قرار داد.

۴- امکان استفاده از این سیکل در مناطقی که امکان دسترسی به شبکه سراسری گاز را

ندارند نیز وجود دارد: به دلیل امکان استفاده از زیست‌توده در میکروتوربین، این پتانسیل در

میکروتوربین خورشیدی هیبرید وجود دارد که به کلی بی‌نیاز از شبکه گاز و یا سایر سوخت‌های فسیلی

شود. البته این امر منوط به پتانسیل تابش خورشیدی بالا و امکان استفاده از زیست‌توده می‌باشد.

۱-۶- مروری بر کارهای گذشته

علی‌رغم اینکه در مورد میکروتوربین خورشیدی هیبرید مطالعات متنوع و خوبی تاکنون انجام شده

است، اما در مورد کاربرد آن در تولید همزمان برودت و حرارت و قدرت مطالعات انجام شده بسیار اندک

می‌باشد. از سوی دیگر، مطالعات اقتصادی در مورد سیکل مذکور نیز انگشت‌شمار می‌باشد. همچنین

تاکنون هیچ‌گونه مطالعه‌ای در مورد عملکرد سیکل مذکور در اقلیم ایران انجام نشده است.

مطالعات پیشین بر روی میکروتوربین خورشیدی هیبرید را می‌توان در چند گروه دسته‌بندی نمود:

۱- مطالعات در مورد امکان‌سنجی فنی و افزایش بازده میکروتوربین خورشیدی هیبرید

۲- مطالعات در مورد کاربردهای میکروتوربین خورشیدی هیبرید

۳- مطالعات اقتصادی در مورد میکروتوربین خورشیدی هیبرید

در رابطه با امکان‌سنجی فنی میکروتوربین خورشیدی هیبرید بر پایه‌ی دیش سهموی، تاکنون مطالعات متنوعی انجام گرفته است. وانگ^۱ و همکاران یک طراحی یکپارچه‌ی جدید از میکروتوربین خورشیدی هیبرید با ظرفیت 25 kW_e ارائه کردند. در مدل ارائه شده توسط ایشان، کل مجموعه میکروتوربین در کانون دیش سهموی قرار گرفته است. همچنین رسیور، محفظه احتراق و توربین به منظور افزایش بازده و حجم کمتر، یکپارچه‌سازی شده‌اند. سپس به طور خاص بر روی ابعاد بهینه رسیور خورشیدی مطالعه نموده و ابعاد بهینه رسیور را تعیین کرده‌اند [۱۲].

آرويو^۲ و همکاران، به بررسی دینامیک روتور میکروتوربین خورشیدی 6 kW_e در سرعت‌های دورانی بالا و ساختارهای متفاوت شفت پرداختند [۱۳].

جیوستری و ماخی^۳ تاثیر افزایش دمای ورودی توربین تا 1100°C بر روی بازده سیکل را مورد بررسی قرار داده‌اند. جهت تحمل دمای بالا، توربین سرامیکی را پیشنهاد داده و ضمن شبیه‌سازی، بازده سالانه $24/6\%$ را گزارش کردند. همچنین به تاثیر متقابل سایه بر چینش دیش‌های سهموی در مزرعه‌ی خورشیدی پرداختند [۱۴].

آیچمیر^۴ و همکاران ضمن انجام یک تحلیل هزینه فایده^۵ بین افت فشار، مواد مورد استفاده و مسائل اقتصادی به طراحی رسیور خورشیدی بهینه برای میکروتوربین خورشیدی به ظرفیت 10 kW_e پرداخته‌اند. همچنین محل بهینه قرارگیری رسیور را نیز مورد بررسی قرار داده‌اند [۱۵].

تجزیه و تحلیل سیکل از نگاه قانون دوم ترمودینامیک نیز در مطالعات روکس^۶ و همکاران به چشم می‌خورد. ضمن پرداختن به هندسه‌ی بهینه رکوپراتور و رسیور بر مبنای حداقل‌سازی تولید آنتروپی،

1. Wang

1. Arroyo

2. Giostri & Macchi

3. Aichmayer

4. trade-off

5. Roux

نقطه‌ی کار بهینه‌ی سیکل را در نقطه‌ای گزارش داده‌اند که بازگشت ناپذیری‌های داخلی ۳ برابر بازگشت ناپذیری‌های خارجی است [۱۶ تا ۱۹].

مطالعاتی نیز بر روی هزینه و کاربردهای میکروتوربین خورشیدی هیبرید انجام گرفته است. گواگنین^۱ و همکاران قیمت تمام شده‌ی سیکل مذکور را با احتساب هزینه‌ی تولید، انتقال و نصب محاسبه نموده‌اند. قیمت تمام شده، با توجه به تکنولوژی تولید و تیراژ سالانه بین $2500 - 3300 \text{ €/kWh}_e$ گزارش شده است [۲۰].

سانچز^۲ و همکاران از یک روش نوآورانه به منظور شناسایی بازارهای بالقوه برای فروش این تکنولوژی استفاده نموده‌اند. با ترکیب پارامترهایی مانند؛ میزان دسترسی به انرژی خورشیدی، توزیع جمعیت، شدت مصرف برق، شاخص‌های اقتصادی و محیط کسب و کار از بین ۲۰ کشور منتخب، مناسب‌ترین بازارها را معرفی نموده‌اند [۲۱].

سمپرنی^۳ و همکاران، به مقایسه‌ی عملکرد میکروتوربین در دو حالت فقط خورشیدی، و هیبرید برای سویل^۴ اسپانیا پرداخته‌اند. مقایسه تحت استراتژی‌ها و ظرفیت‌های متفاوت انجام شده است. نتایج نشان داده است که بازده تولید الکتریسیته بین $16/7$ تا $18/3$ ٪ می‌باشد. همچنین از منظر بازده متوسط سالانه و تعداد ساعت کار سالانه، حالت هیبرید را ارجح‌تر از حالت فقط خورشیدی تشخیص داده است [۲۲].

آیچمیر و همکاران، نیروگاه سیکل ترکیبی 150 MWe را شبیه‌سازی کرده‌اند که به جای استفاده از توربین گاز، از تعداد زیادی میکروتوربین خورشیدی هیبرید به همراه دیش سهموی استفاده نموده است. سپس عملکرد نیروگاه مذکور را با نیروگاه سیکل ترکیبی برج نیرو مقایسه نموده‌اند [۲۳]. در تحقیقی دیگر، توجیه فنی اقتصادی تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت^۵ با محرک اولیه میکروتوربین خورشیدی هیبرید را برای یک روستای دور از شبکه برق، بررسی نموده‌اند [۲۴].

⁶. Gavagnin

¹. Sanchez

². Semprini

³. Seville

⁴. CCHP

۱-۷- ضرورت انجام تحقیق، نکات برجسته و نوآوری‌های کار حاضر

در میان مطالعاتی که تاکنون بر روی سیکل مذکور صورت گرفته است، کاربرد آن برای ساختمان‌های مسکونی به چشم نمی‌خورد. همچنین مطالعات اندکی بر روی جنبه‌های اقتصادی طرح مذکور صورت پذیرفته است. از سوی دیگر به دلیل تاثیرپذیری زیاد این سیکل، از شرایط اقلیمی، لازم است تا عملکرد سیکل در اقلیم‌های مختلف مورد ارزیابی قرار گیرد. اما تحقیقات قبلی بیشتر در فضای آزمایشگاهی و در شرایط طراحی صورت پذیرفته و کمتر به تاثیر اقلیم بر عملکرد آن توجه شده است. همچنین لازم است که عملکرد سیکل در بلندمدت (طول عمر طرح) مورد ارزیابی قرار گیرد، اما در مطالعات قبلی بیشتر به عملکرد لحظه‌ای سیکل پرداخته شده است.

نوآوری‌های کار حاضر به طور خلاصه عبارتند از:

- تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت بر پایه میکروتوربین خورشیدی هیبرید برای یک ساختمان مسکونی صورت گرفته است، که در مطالعات گذشته سابقه نداشته است.
- سناریوهای قیمتی مختلفی برای قیمت گاز طبیعی در نظر گرفته شده است. این سناریوها، شامل گاز یارانه‌ای، و گاز فاقد یارانه می‌باشد. همچنین سیاست‌های دولت ایران در خصوص حذف تدریجی یارانه‌ها نیز در محاسبات لحاظ شده است.
- سیاست‌های دولت ایران در مورد حمایت از تولید پراکنده‌ی برق^۱ و تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر که به صورت خرید تضمینی صورت می‌گیرد، در محاسبات لحاظ شده است.
- یک فرمول جدید برای محاسبه‌ی نرخ خرید تضمینی برق از میکروتوربین خورشیدی هیبرید، جهت پیشنهاد به دولت ایران ابداع شده است.
- تاثیر اقلیم بر عملکرد سیکل مورد بررسی قرار گرفته است.

^۱ - Distributed Generation (DG)

فصل دوم: مدل‌سازی

در این مطالعه به بررسی توجیه فنی و اقتصادی تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت، (CCHP) بر پایه‌ی محرک اولیه‌ی میکروتوربین خورشیدی هیبرید برای یک ساختمان مسکونی در ایران پرداخته شده است. از دیش‌های سهموی به منظور گردآوری حرارت خورشیدی، و از گاز طبیعی به عنوان سوخت پشتیبان استفاده شده است. شبیه‌سازی‌ها برای سه اقلیم مختلف معتدل، گرم و مرطوب، و گرم و خشک انجام گرفته است. محاسبات به صورت ساعتی و برای کل طول سال انجام شده است. برق تولیدی توسط میکروتوربین‌ها به شبکه برق سراسری فروخته شده، و حرارت اتلافی میکروتوربین‌ها به وسیله‌ی بویلر بازیاب بازیافت شده و برای تامین نیازهای حرارتی ساختمان و ژنراتور سیکل تبرید جذبی استفاده شده است. از بویلر کمکی نیز برای جبران کمبود حرارت استفاده شده است.

با تغییر در تعداد میکروتوربین‌ها و مساحت دیش‌های سهموی، بهترین حالت از منظر اقتصادی، تعیین شده و هزینه‌ی برابر شده الکتریسیته (LCOE)^۱ محاسبه شده است.

۲-۱- پیکربندی سیکل تولید همزمان

به طور کلی سیستم‌های تولید همزمان CCHP با یکی از ۳ استراتژی زیر کنترل می‌شوند:

۱- اولویت حرارت مصرفی: در این حالت میکروتوربین‌ها بر اساس تامین نیاز حرارتی ساختمان کار می‌کنند و سعی می‌شود تا هدررفت حرارت توسط میکروتوربین‌ها به حداقل ممکن برسد. برق تولیدی به شبکه فروخته می‌شود. همچنین در برخی از طرح‌ها نیز می‌توان بخشی از برق تولیدی را در داخل ساختمان مصرف نمود.

مزیت این روش این است که می‌توان به بازده انرژی بالاتر دست یافت، همچنین به دلیل نیاز کمتر به کار میکروتوربین‌ها هزینه‌ی نگهداری کاهش می‌یابد. اما عیب این روش نیز در این است که برق تولیدی سالانه در این روش کاهش می‌یابد و در نتیجه‌ی آن درآمد سیکل کاهش یافته و ممکن است طرح مذکور از توجیه‌پذیری اقتصادی دور شود.

^۱. Levelized Cost of Electricity

۲- اولویت برق مصرفی: در این روش، میکروتوربین‌ها بر اساس تامین نیاز الکتریکی ساختمان کار می‌کنند و حرارت مازاد تولیدی در اتمسفر تخلیه شده و یا ذخیره می‌شود. در این روش ملاک کنترل سیکل، برق تولیدی توسط آن می‌باشد. عیب این روش آن است که بخش زیادی از حرارت تولیدی توسط میکروتوربین‌ها به هدر می‌رود.

۳- تولید حداکثر توان الکتریکی: در این روش، سیکل تولید همزمان را به عنوان یک نیروگاه تولید پراکنده در نظر می‌گیریم، که برنامه‌ریزی آن به گونه‌ای است که تا حد امکان در حداکثر ظرفیت ممکن کار کند تا بتواند درآمد بیشتری از محل فروش برق به دست آورد. مزیت این روش در افزایش درآمد فروش برق، و عیب بزرگ آن افزایش هدر رفت انرژی حرارتی می‌باشد.

در این مطالعه، از بین سناریوهای فوق، سناریوی اول به دلیل راندمان بالا، مورد استفاده قرار گرفته است.

نحوه‌ی کنترل مجموعه به این صورت است که، میکروتوربین‌ها بر اساس نیاز حرارتی ساختمان وارد مدار می‌شوند. در صورتی که حرارت تولیدی در بویلر بازیاب میکروتوربین‌ها، جوابگوی نیاز حرارتی ساختمان نباشد، بویلر کمکی کمبود حرارت را از طریق مصرف گاز طبیعی جبران می‌کند. برق تولیدی میکروتوربین‌ها نیز به شبکه برق سراسری فروخته می‌شود.

۲-۲- اجزای تشکیل دهنده‌ی سیکل

سیکل تولید همزمان مورد بررسی در این مطالعه از اجزای زیر تشکیل شده است:

۲-۲-۱- میکروتوربین‌ها

این جزء از سیکل به عنوان تولیدکننده‌ی قدرت و حرارت و در واقع مهم‌ترین تجهیز سیستم می‌باشد. از آنجائیکه یکی از اهداف مطالعه‌ی حاضر تعیین ظرفیت بهینه‌ی میکروتوربین‌ها می‌باشد، لذا تعداد مختلف میکروتوربین مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میکروتوربین‌ها قادر هستند در دو حالت تمام‌بار و یا پاره‌بار کار کنند. برای نزدیک شدن نتیجه‌ی تحقیق با واقعیت، از کاتالوگ یکی از شرکت‌های

تولیدکننده‌ی میکروتوربین، به منظور استخراج ویژگی‌های فنی میکروتوربین استفاده شده است. میکروتوربین‌ها دارای دو نوع رکوپراتوردار و فاقد رکوپراتور می‌باشند که نوع رکوپراتوردار دارای راندمان و قیمت بالاتر می‌باشد. در مطالعه‌ی حاضر میکروتوربین دارای رکوپراتور برای شبیه‌سازی‌ها انتخاب شده است. میکروتوربین‌ها قادرند با طیف وسیعی از سوخت‌های فسیلی کار کنند، در اینجا گاز طبیعی و انرژی خورشیدی به عنوان منابع تامین انرژی میکروتوربین‌ها انتخاب شده‌اند.

۲-۲-۲- دیش‌های سهموی

دیش‌های سهموی دارای ردیابی دو محوره می‌باشند. و فقط قادر به استفاده از تابش مستقیم خورشیدی می‌باشند. در این تحقیق به منظور انطباق بیشتر نتایج با واقعیت از کاتالوگ یکی از شرکت‌های تولید کننده‌ی دیش‌های سهموی برای استخراج شاخصه‌های فنی آن استفاده شده است. بازده دیش‌های سهموی همیشه مقداری کمتر از ۱ می‌باشد. تلفات دیش‌های سهموی ناشی از موارد زیر می‌باشد:

- کثیفی سطح دیش

- اشکالات هندسی در طراحی دیش

- خطا در ردیابی نور خورشید

- سایه‌ی تجهیزات و سایر دیش‌ها

- تلفات سیستم انتقال نور از کانون دیش به رسیور خورشیدی

در این مطالعه تلفات فوق در قالب ضریبی تحت عنوان بازده خورشیدی (η_{sol}) لحاظ شده و در شبیه‌سازی‌ها به کار رفته است.

۲-۲-۳- رسیور خورشیدی

وظیفه‌ی رسیور خورشیدی انتقال حرارت دریافتی از دیش‌ها به سیال عامل میکروتوربین‌ها می‌باشد. به کاربردن رسیور خورشیدی سبب کاهش مصرف سوخت می‌شود. به دلیل متغیر بودن دبی سیال عامل

سیکل، رسیور باید در برابر افزایش بیش از اندازه‌ی دما (ناشی از تابش شدید خورشیدی) محافظت شود. از سوی دیگر یکنواختی انتقال حرارت در رسیور خورشیدی یکی از پارامترهایی است که بایستی در طراحی رسیور مورد توجه قرار گیرد.

۲-۲-۴- بویلر بازیاب

بویلر بازیاب وظیفه‌ی بازیافت حرارت اتلافی از جریان گاز تخلیه شونده به اتمسفر را دارد. حرارت بازیافت شده به مصارف ساختمان می‌رسد. این مصارف شامل، حرارت مورد نیاز برای گرمایش ساختمان، حرارت مورد نیاز ژنراتور سیکل تبرید جذبی و حرارت مورد نیاز آب گرم مصرفی ساختمان می‌باشد. البته به دلیل اینکه کاهش بیش از حد دمای محصولات احتراق در بویلر بازیاب سبب تقطیر بخار آب موجود در محصولات احتراق و تشکیل اسید و خوردگی می‌شود، بویلر بازیاب قادر به بازیافت کل حرارت اتلافی سیکل نیست. از سوی دیگر، دمای بخار (و یا آب داغ) تولید شده در بویلر بازیاب، از یک سطحی از دما نمی‌تواند پایین‌تر بیاید. دلیل این مساله، ویژگی‌های فنی چیلر جذبی و سیستم گرمایشی ساختمان می‌باشد. لذا در مطالعه‌ی حاضر فرض شده است که حداقل دمای محصولات احتراق خروجی از بویلر بازیاب ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

۲-۲-۵- بویلر کمکی

از آنجائیکه حرارت مورد نیاز ساختمان دارای نوسان نسبتاً زیادی در طول سال و در طول روز می‌باشد، جهت اطمینان از تامین بدون وقفه حرارت مورد نیاز، از یک بویلر کمکی در کنار بویلر بازیاب استفاده می‌شود. به عبارتی بویلر کمکی تنها زمانی وارد مدار می‌شود که میکروتوربین‌ها نتوانند کل حرارت مورد نیاز ساختمان را تامین نمایند. وظیفه‌ی بویلر کمکی جبران کمبود حرارت می‌باشد. بویلر کمکی از گاز طبیعی تغذیه شده و محصولات احتراق خروجی آن به اتمسفر تخلیه می‌شود.

۲-۲-۶- چیلر جذبی

وظیفه چیلر جذبی تولید برودت مورد نیاز ساختمان در طول فصول گرم سال می‌باشد. چیلرهای جذبی انواع مختلفی دارند. از نظر جفت سیال عامل، دو نوع "آب - آمونیاک" و "لیتیوم بروماید- آب" از جمله مرسوم‌ترین آنها می‌باشند. از نظر نحوه‌ی عملکرد نیز شامل؛ تک اثره، دو اثره و سه اثره می‌باشند. چیلرهای دو و سه اثره دارای قیمت و راندمان بالاتری می‌باشند. از آنجائیکه استفاده از چیلرهای جذبی "تک اثره لیتیوم بروماید- آب" در ساختمان‌های مسکونی ایران مرسوم‌تر است، برای تحقیق حاضر از این مدل استفاده شده است.

۲-۲-۷- مخزن ذخیره‌ی حرارت

وظیفه‌ی مخزن ذخیره‌ی حرارت، ذخیره‌ی گرمای مازاد، و استفاده از آن در هنگام نیاز می‌باشد. این عمل سبب می‌شود تا مصرف سوخت، کاهش یابد اما هزینه سرمایه‌گذاری را افزایش می‌دهد. یکی از کارهایی که در تحقیق حاضر انجام شده است، بررسی تاثیر اضافه کردن مخزن ذخیره حرارت بر عملکرد سیکل می‌باشد.

۲-۳- نحوه‌ی کنترل عملکرد سیکل

۲-۳-۱- نحوه‌ی عملکرد سیکل در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی

نیاز حرارتی ساختمان از طریق دبی بخار مصرفی مشخص می‌شود. میکروتوربین‌ها بر اساس دبی بخار مصرفی به ترتیب وارد مدار می‌شوند. از آنجائیکه میکروتوربین‌ها می‌توانند در حالت تمام‌بار و یا پاره‌بار کار کنند، چنانچه حرارت مورد نیاز ساختمان، برابر با حرارت تولیدی توسط یک یا چند میکروتوربین در حالت تمام‌بار باشد، به همان تعداد میکروتوربین وارد مدار می‌شود. اما چنانچه حرارت مورد نیاز به اندازه‌ای باشد که اگر تعدادی میکروتوربین به صورت تمام‌بار کار کنند بخشی از حرارت هدر می‌رود، یکی از میکروتوربین‌ها به صورت پاره‌بار کار کرده و مابقی تمام‌بار کار می‌کنند، تا ضمن تامین حرارت مورد نیاز، از هدر رفت حرارت جلوگیری شود.

در صورتی که مجموع حرارت تولیدی توسط بویلر بازیاب میکروتوربین‌ها از حرارت مورد نیاز ساختمان کمتر باشد، دو حالت پیش می‌آید:

حالت اول اینکه؛ بخشی از حرارت گردآوری شده توسط دیش‌های سهموی، مازاد بر نیاز رسیور خورشیدی میکروتوربین‌ها باشد. در این حالت، حرارت مازاد دیش‌های سهموی، به بویلر کمکی هدایت می‌شود تا ضمن گرم کردن آب داخل بویلر، گاز کمتری برای این منظور مصرف شود. بدیهی است که پس از انتقال تابش به بویلر، اگر بازهم حرارت مورد نیاز ساختمان تامین نشد، به وسیله‌ی مصرف‌گاز طبیعی در بویلر کمکی، کمبود حرارت جبران می‌شود.

حالت دوم اینکه؛ حرارت مازادی در دیش‌های سهموی موجود نمی‌باشد، و تمام حرارت تولیدی در دیش‌های سهموی، توسط رسیور خورشیدی میکروتوربین‌ها مصرف می‌شود. در این صورت بویلر کمکی از طریق مصرف‌گاز طبیعی کمبود حرارت را جبران می‌نماید.

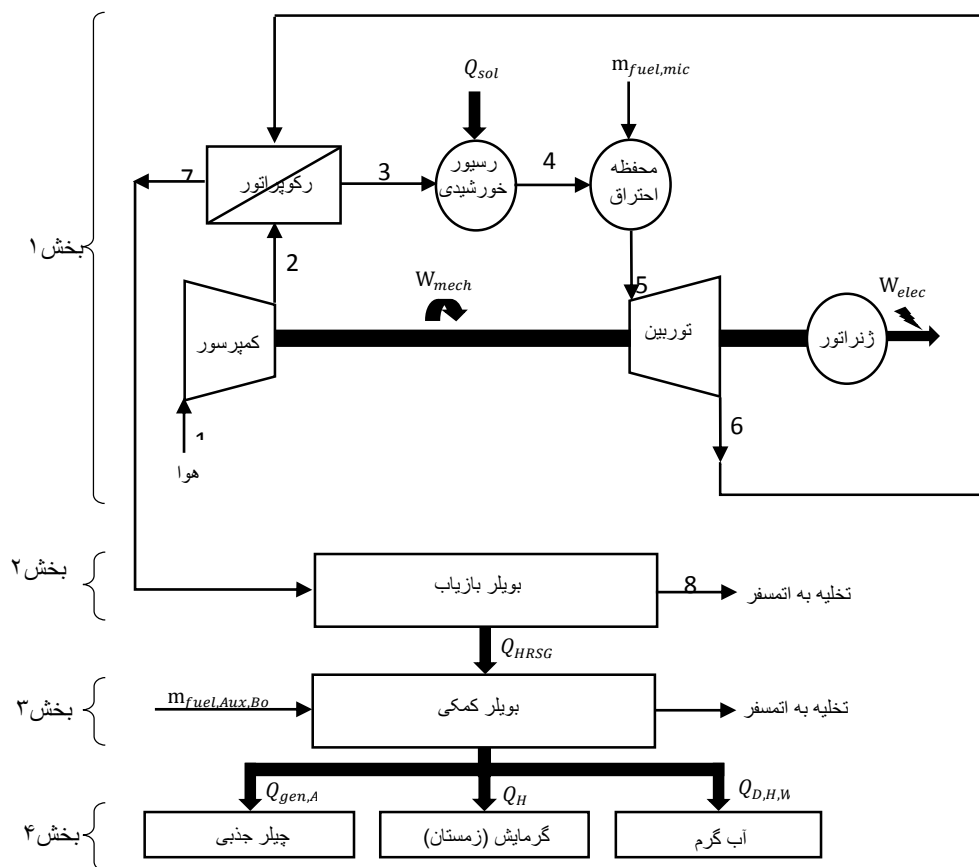
لازم به ذکر است که حرارت گردآوری شده توسط دیش‌های سهموی در صورتی که از مجموع نیاز رسیور خورشیدی میکروتوربین‌ها و بویلر کمکی بیشتر باشد، به اتمسفر تخلیه می‌شود تا از آسیب به تجهیزات جلوگیری شود.

۲-۳-۲- نحوه‌ی عملکرد سیکل در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی

عملکرد سیکل در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی، مشابه حالت فاقد مخزن می‌باشد. تنها تفاوت بین عملکرد سیکل در این دو حالت مربوط به پاراگراف آخر از بخش ۲-۳-۱ است. در آنجا عنوان کردیم که در حالت فاقد مخزن در صورتی که حرارت گردآوری شده توسط دیش‌های سهموی از مجموع نیاز میکروتوربین‌ها و بویلر کمکی بیشتر باشد، به اتمسفر تخلیه می‌شود. اما در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی، در صورتی که حرارت گردآوری شده، از مجموع نیاز رسیور و بویلر بیشتر باشد، به مخزن ذخیره حرارتی هدایت شده و در آنجا ذخیره می‌شود. حرارت ذخیره شده در مخزن ذخیره، در زمان نیاز به حرارت مصرف می‌شود.

نحوه‌ی تخلیه‌ی مخزن ذخیره حرارتی به این صورت است که؛ در زمانهایی که حرارت تولیدی توسط بویلر بازیاب میکروتوربین‌ها، کمتر از حرارت مورد نیاز باشد، مخزن ذخیره شروع به تخلیه می‌کند. در این روش استفاده از مخزن ذخیره حرارتی سبب کاهش مصرف گاز در بویلر کمکی می‌شود. اما تاثیری بر عملکرد میکروتوربین‌ها ندارد.

سیکل عملکردی CCHP بر پایه میکروتوربین خورشیدی هیبرید در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی در شکل (۱-۲) نشان داده شده است.



شکل ۱-۲: دیاگرام شماتیک CCHP بر پایه میکروتوربین خورشیدی هیبرید در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارت

سیکل نشان داده شده در شکل (۱-۲) از ۴ بخش تشکیل شده است:

بخش اول؛ شامل میکروتوربین خورشیدی هیبرید و دیش‌های سهموی است. هوای محیط پس از افزایش فشار در کمپرسور، وارد رکوپراتور شده و مقداری افزایش دما می‌دهد. سپس وارد رسیور خورشیدی شده و حرارت ارسالی از دیش‌های سهموی را دریافت می‌کند. در صورتی که دمای سیال

عامل در خروجی از رسیور به میزان مورد نیاز برای ورود به توربین نرسیده باشد، در محفظه‌ی احتراق با سوزاندن گاز طبیعی به دمای مطلوب می‌رسد.

بخش دوم؛ سیال عامل پس از پشت سر گذاشتن توربین و رکوپراتور وارد بخش دوم سیکل یعنی بویلر بازیاب می‌شود. در بویلر بازیاب، حرارت خود را از دست داده و در دمای ۱۲۰ درجه سانتی‌گراد به اتمسفر تخلیه می‌شود.

بخش سوم؛ بخار تولید شده در بویلر بازیاب وارد بخش سوم سیکل یعنی بویلر کمکی می‌شود. بویلر کمکی نوسانات حرارت را خنثی کرده و در صورت کافی نبودن حرارت تولیدی توسط بویلر بازیاب، از طریق مصرف گاز طبیعی کمبود حرارت را جبران می‌نماید.

بخش چهارم؛ به عنوان مصرف‌کننده‌های نهایی حرارت سیکل شناخته می‌شوند. این مصارف شامل؛ آب گرم مصرفی ساختمان، حرارت مورد نیاز سیستم‌های گرمایشی (برای فصل زمستان) و حرارت مورد نیاز ژنراتور سیکل تبرید جذبی (برای فصل تابستان) می‌باشد.

۲-۴- معادلات حاکم در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی

۲-۴-۱- معادلات تولید همزمان

به منظور تعیین روابط بالانس انرژی برای اجزای مختلف سیکل لازم است ابتدا، روابط حرارتی بین بخش‌های چهارگانه‌ی فوق ارائه گردد. مجموع حرارت مورد نیاز ساختمان برابر است با:

$$\dot{Q}_{cons} = \dot{Q}_{gen,AC} + \dot{Q}_{D,H,W} + \dot{Q}_H \quad (1-2)$$

در معادله (۱-۲) \dot{Q}_{cons} کل حرارت مورد نیاز ساختمان، $\dot{Q}_{gen,AC}$ ، حرارت مورد نیاز ژنراتور سیکل تبرید جذبی، $\dot{Q}_{D,H,W}$ حرارت مورد نیاز آب گرم مصرفی و \dot{Q}_H حرارت مورد نیاز گرمایش ساختمان می‌باشد.

حرارت مورد نیاز ساختمان، توسط بویلر بازیاب، بویلر کمکی و اتلافات دیش‌های سهموی توسط رابطه (۲-۲) تامین می‌شود:

$$\dot{Q}_{cons} = \dot{Q}_{HRSG} + \dot{Q}_{aux,B} + (\dot{Q}_{sol} - \dot{Q}_{rec}) \quad (۲-۲)$$

درجائیکه \dot{Q}_{HRSG} حرارت بازیافت شده در بویلر بازیاب، $\dot{Q}_{aux,B}$ حرارت تولید شده توسط بویلر کمکی، \dot{Q}_{sol} حرارت گردآوری شده توسط دیش‌های سهموی و \dot{Q}_{rec} حرارت مصرفی میکروتوربین‌ها به وسیله‌ی رسیور خورشیدی می‌باشد.

ترم سوم سمت راست معادله فوق بیانگر آن است که در صورتی که حرارت گردآوری شده در دیش‌های سهموی از حرارت مورد نیاز در میکروتوربین‌ها بیشتر باشد، حرارت اضافی به بویلر کمکی منتقل می‌شود، تا به مصرف ساختمان برسد. این حالت به ویژه در زمانی که مجموع ظرفیت میکروتوربین‌ها کم باشد اتفاق می‌افتد. این کار سبب کاهش مصرف سوخت در بویلر کمکی می‌شود.

حرارت تولیدی بویلر بازیاب و حرارت مصرفی رسیورهای خورشیدی از روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$\dot{Q}_{HRSG} = \dot{Q}_{HRSG,P} + \sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(HRSG,F)_i} \quad (۳-۲)$$

$$\dot{Q}_{Rec} = \dot{Q}_{rec,P} + \sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(rec,F)_i} \quad (۴-۲)$$

در معادلات (۳-۲) و (۴-۲) $\dot{Q}_{HRSG,P}$ حرارت تولیدی در بویلر بازیاب میکروتوربینی است که در حالت پاره‌بار کار می‌کند، $\sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(HRSG,F)_i}$ مجموع حرارت تولیدی در بویلر بازیاب میکروتوربین‌های در حالت عملکرد تمام‌بار می‌باشد. $\dot{Q}_{rec,P}$ حرارت مصرفی در رسیور خورشیدی میکروتوربین پاره‌بار، و $\sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(rec,F)_i}$ مجموع حرارت مصرفی در رسیورهای خورشیدی میکروتوربین‌های تمام‌بار می‌باشد. L بیانگر تعداد میکروتوربین‌هایی است که در آن لحظه در حالت تمام‌بار مشغول به کار می‌باشند.

حرارت مورد نیاز آب گرم مصرفی ساختمان برابر است با:

$$\dot{Q}_{D,H,W} = \dot{m}_{D,H,W} \times C_{P,W} \times (T_{D,H,W} - T_{C,W}) \quad (5-2)$$

در رابطه‌ی (5-2) $\dot{m}_{D,H,W}$ دبی جرمی لحظه‌ای آب گرم مصرفی است که از استانداردهای ساختمان ایران به دست آمده است، $C_{P,W}$ گرمای ویژه آب است که برابر $\left(\frac{kJ}{kg.K}\right)$ 4,186 است. $T_{D,H,W}$ ، $T_{C,W}$ به ترتیب دمای آب شهر و دمای آب گرم مصرفی می‌باشد.

در معادلات (1-2) تا (5-2) ابتدا $\dot{Q}_{gen,AC}$ ، $\dot{Q}_{D,H,W}$ ، \dot{Q}_H ، \dot{Q}_{cons} و \dot{Q}_{sol} محاسبه شده و به عنوان مقادیر معلوم به نرم‌افزار شبیه‌ساز (EES)¹ وارد می‌شود. اما برای محاسبه‌ی $\dot{Q}_{aux,B}$ ، $\dot{Q}_{HRS,G,P}$ ، $\sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(HRS,G,F)_i}$ ، $\dot{Q}_{rec,P}$ ، $\sum_{i=1}^L \dot{Q}_{(rec,F)_i}$ نیاز به حل همزمان دستگاه معادلات ترمودینامیکی است. در این مجموعه معادلات عملکرد میکروتوربین‌ها در دو حالت پاره‌بار و تمام‌بار شبیه‌سازی شده و با استفاده از ورودی‌های فوق به حل دستگاه معادلات با استفاده از نرم‌افزار EES می‌پردازد.

۲-۴-۲- کمپرسور

کار مصرفی کمپرسور از رابطه (6-2) محاسبه می‌شود [25]:

$$\dot{W}_c = \dot{m}_a (h_2 - h_1) \quad (6-2)$$

در این رابطه \dot{W}_c کار مصرفی کمپرسور، \dot{m}_a دبی جرمی سیال عامل (هوا)، h_1 و h_2 به ترتیب آنتالپی هوای ورودی و خروجی از کمپرسور می‌باشد. h_1 بر حسب دما، نسبت رطوبت و فشار هوای ورودی تعیین می‌شود. از آنجائیکه هوای ورودی ابتدا به خنک‌کاری ژنراتور پرداخته و سپس وارد کمپرسور می‌شود [8]، لذا برای تعیین شرایط هوای ورودی به کمپرسور داریم:

¹ - Engineering Equation Solver

$$P_1 = P_{amb} - P_{d,gen} \quad (7-2)$$

$$P_{d,gen} = P_{amb} \times k_{P,d,gen} \quad (8-2)$$

$$T_1 = T_{amb} + \Delta T_{gen} \quad (9-2)$$

$$\Delta T_g = \frac{\dot{Q}_{gen}}{\dot{m}_a \times C_{P,a}} \quad (10-2)$$

$$\dot{Q}_{gen} = \dot{W}_m \times (1 - \eta_{gen}) \quad (11-2)$$

$$\omega_1 = \omega_{amb} \quad (12-2)$$

در معادلات (۷-۲) تا (۱۲-۲) فشار هوای ورودی به کمپرسور، P_{amb} فشار هوای محیط، $P_{d,g}$ افت فشار هوا در هنگام خنک کاری ژنراتور، $k_{P,d,g}$ ضریب افت فشار هوای عبوری از ژنراتور، T_1 دمای هوای ورودی به کمپرسور، T_{amb} دمای هوای محیط، ΔT_g افزایش دمای هوا حین خنک کاری ژنراتور، \dot{Q}_g حرارت تولیدی در ژنراتور، $C_{P,a}$ گرمای ویژه هوا در دما و فشار محیط، η_g راندمان تولید برق ژنراتور، ω_1 ، ω_{amb} به ترتیب نسبت رطوبت هوای محیط و هوای ورودی به کمپرسور می‌باشند.

برای تعیین h_2 باید ابتدا T_2 ، P_2 و ω_2 تعیین شود [۲۵]:

$$T_2 = T_1 \times \left(1 + \frac{1}{\eta_c} \left(r_c^{\frac{k_a-1}{k_a}} - 1 \right) \right) \quad (13-2)$$

$$P_2 = r_c \cdot P_1 \quad (14-2)$$

$$\omega_2 = \omega_1 \quad (15-2)$$

در روابط (۱۳-۲) تا (۱۵-۲) P_1 و P_2 به ترتیب فشار هوای ورودی و خروجی کمپرسور، r_c نسبت فشار کمپرسور، η_c راندمان آیزنتروپیک کمپرسور، k_a ضریب اتمیسیته هوا در دمای متوسط، T_1 و T_2 به ترتیب دمای ورودی و خروجی کمپرسور می‌باشد.

۲-۴-۳- رکوپراتور

حرارت مبادله شده در رکوپراتور برابر است با [۲۵]:

$$\dot{Q}_{Re} = \dot{m}_g \cdot (h_6 - h_7) = \dot{m}_a \cdot (h_3 - h_2) \quad (۱۶-۲)$$

در رابطه‌ی (۱۶-۲) \dot{Q}_{Re} حرارت مبادله شده در رکوپراتور، \dot{m}_g و \dot{m}_a به ترتیب؛ دبی گاز و هوای عبوری از رکوپراتور، h_2 و h_3 به ترتیب آنتالپی هوای ورودی و خروجی رکوپراتور، h_6 و h_7 به ترتیب آنتالپی گاز ورودی و خروجی رکوپراتور می‌باشد.

دبی گاز عبوری از رکوپراتور از رابطه (۱۷-۲) به دست می‌آید:

$$\dot{m}_g = \dot{m}_a + \dot{m}_f \quad (۱۷-۲)$$

در جائیکه \dot{m}_f دبی جرمی سوخت مصرفی در محفظه احتراق میکروتوربین می‌باشد.

برای تعیین شرایط خروجی از رکوپراتور داریم:

$$P_3 = P_2 - P_{d,Re,a} \quad (۱۸-۲)$$

$$P_{d,Re,a} = P_2 \times k_{P,d,Re,a} \quad (۱۹-۲)$$

$$T_3 = T_2 + \varepsilon_{Re} \times (T_6 - T_2) \quad (۲۰-۲)$$

$$P_7 = P_6 - P_{d,Re,g} \quad (۲۱-۲)$$

$$P_{d,Re,g} = P_6 \times k_{P,d,Re,g} \quad (۲۲-۲)$$

$$\omega_3 = \omega_2 \quad (۲۳-۲)$$

$$\omega_7 = \omega_6 \quad (۲۴-۲)$$

در روابط (۱۸-۲) تا (۲۴-۲) P_3 فشار هوای خروجی از رکوپراتور، P_6 و P_7 به ترتیب فشار گاز ورودی و خروجی رکوپراتور، $k_{P,d,Re,a}$ و $k_{P,d,Re,g}$ به ترتیب ضرایب افت فشار سمت هوا و سمت گاز در رکوپراتور، ω_3 ، ω_6 و ω_7 به ترتیب نسبت رطوبت هوای خروجی، گاز ورودی و گاز خروجی از رکوپراتور، و ε_{Re} کارایی رکوپراتور می‌باشد.

۲-۴-۴- رسیور خورشیدی

حرارت دریافتی توسط رسیور خورشیدی از روابط شرطی (۲۵-۲) و (۲۶-۲) محاسبه می‌شود:

$$if: \dot{Q}_{sol} \leq \dot{m}_a \times (h_5 - h_3) \rightarrow \dot{Q}_{rec} = \dot{Q}_{sol} \quad (25-2)$$

$$if: \dot{Q}_{sol} > \dot{m}_a \times (h_5 - h_3) \rightarrow \dot{Q}_{rec} = \dot{m}_a \times (h_5 - h_3) \quad (26-2)$$

در این روابط، h_5 آنتالپی گاز ورودی به توربین می‌باشد. این روابط بیان می‌دارد که در صورتی که مجموع حرارت گردآوری شده توسط دیش‌های سهموی کوچکتر یا مساوی حرارت مورد نیاز جهت رساندن گاز به شرایط استاندارد ورودی توربین باشد، کل حرارت دیش‌ها توسط رسیور جذب می‌شود. و در صورتی که حرارت جمع‌آوری شده توسط دیش‌ها بیشتر از مقدار مورد نیاز سیکل باشد، در رسیور فقط مقدار حرارت مورد نیاز جذب می‌شود، تا از آسیب به تجهیزات به دلیل دمای بالا جلوگیری شود. برای تعیین شرایط هوای خروجی از رسیور داریم:

$$P_4 = P_3 - P_{d,rec} \quad (27-2)$$

$$P_{d,rec} = P_3 \times k_{P,d,rec} \quad (28-2)$$

$$\dot{Q}_{rec} = \dot{m}_a \times (h_4 - h_3) \quad (29-2)$$

$$\omega_4 = \omega_3 \quad (30-2)$$

در روابط (۲۷-۲) تا (۳۰-۲) P_4 ، $P_{d,rec}$ و $k_{P,d,rec}$ به ترتیب فشار هوای خروجی، افت فشار و ضریب افت فشار رسیور می‌باشد.

همچنین h_4 و ω_4 به ترتیب آنتالپی و نسبت رطوبت هوای خروجی از رسیور می‌باشد.

۲-۴-۵- محفظه احتراق

برای تعیین بالانس انرژی در محفظه‌ی احتراق از روابط (۲-۳۱) تا (۲-۳۴) استفاده می‌کنیم [۲۵].

$$\dot{m}_g \times h_5 = (\dot{m}_a \times h_4) + (\dot{m}_f \times LHV \times \eta_{comb}) \quad (۲-۳۱)$$

$$\dot{Q}_{comb} = \dot{m}_f \times LHV \quad (۲-۳۲)$$

$$P_5 = P_4 - P_{d,comb} \quad (۲-۳۳)$$

$$P_{d,comb} = P_4 \times k_{P,d,comb} \quad (۲-۳۴)$$

درجائیکه η_{comb} راندمان محفظه احتراق، LHV ارزش حرارتی پایین سوخت، \dot{Q}_{comb} حرارت تولید شده در محفظه احتراق، P_5 ، $P_{d,comb}$ ، $k_{P,d,comb}$ به ترتیب فشار خروجی، افت فشار و ضریب افت فشار محفظه احتراق می‌باشد.

سوختن هرگونه سوخت فسیلی منجر به تولید بخار آب می‌شود. بخار آب تولیدی سبب تغییر نسبت رطوبت هوای عبوری از محفظه احتراق می‌شود. به دلیل مجهول بودن نسبت رطوبت گاز خروجی از محفظه احتراق امکان حل معادله‌ی (۲-۳۱) وجود ندارد. لذا باید رابطه‌ای برای افزایش نسبت رطوبت در محفظه احتراق پیدا کرده و همزمان با معادلات فوق حل شود.

با توجه به استفاده از گاز طبیعی به عنوان سوخت پشتیبان، و با ملاحظه ترکیبات گاز طبیعی ایران

[۲۶ و ۲۷] و استفاده از روابط استوکیومتری، برای تعیین ω_5 داریم:

$$\dot{m}_{w,comb} = 2 \times \dot{m}_f \quad (۲-۳۵)$$

$$\dot{m}_{w,5} = \dot{m}_{w,4} + \dot{m}_{w,comb} \quad (۲-۳۶)$$

$$\omega_4 = \frac{\dot{m}_{w,4}}{\dot{m}_a - \dot{m}_{w,4}} \quad (۲-۳۷)$$

$$\omega_5 = \frac{\dot{m}_{w,5}}{\dot{m}_g - \dot{m}_{w,5}} \quad (۲-۳۸)$$

در روابط (۲-۳۵) تا (۲-۳۸) $\dot{m}_{w,comb}$ ، $\dot{m}_{w,4}$ و $\dot{m}_{w,5}$ به ترتیب دبی جرمی بخار آب تولیدی

در محفظه‌ی احتراق، دبی جرمی آب ورودی و دبی جرمی آب خروجی از محفظه‌ی احتراق می‌باشد.

۲-۴-۶- توربین

برای محاسبه‌ی کار تولیدی و دمای گاز خروجی از توربین داریم [۲۵]:

$$\dot{W}_t = \dot{m}_g \times (h_5 - h_6) \times \eta_m \quad (۳۹-۲)$$

$$T_6 = T_5 - \eta_t \times \left(T_5 - \frac{T_5}{r_t^{\left(\frac{k_g - 1}{k_g} \right)}} \right) \quad (۴۰-۲)$$

$$r_t = \frac{P_5}{P_6} \quad (۴۱-۲)$$

$$\omega_6 = \omega_5 \quad (۴۲-۲)$$

در روابط (۳۹-۲) تا (۴۲-۲) \dot{W}_t ، η_m ، η_t و r_t به ترتیب کار تولیدی، راندمان مکانیکی، بازده آیزنتروپیک و نسبت فشار توربین و k_g ضریب اتمیسیته گاز عبوری از توربین در دمای متوسط می‌باشد.

۲-۴-۷- بویلر بازیاب

برای تعیین بالانس انرژی در بویلر بازیاب داریم:

$$\dot{Q}_{HRSG} = \dot{m}_g \times (h_7 - h_8) \quad (۴۳-۲)$$

$$P_8 = P_7 - P_{d,HRSG} \quad (۴۴-۲)$$

$$P_{d,HRSG} = P_7 \times k_{P,d,HRSG} \quad (۴۵-۲)$$

$$P_8 = 1.01 \times P_{amb} \quad (۴۶-۲)$$

$$\omega_8 = \omega_7 \quad (۴۷-۲)$$

در روابط (۴۳-۲) تا (۴۷-۲) h_8 ، P_8 و ω_8 به ترتیب آنتالپی، فشار و نسبت رطوبت گاز خروجی از بویلر بازیاب است که به اتمسفر تخلیه می‌شود. $P_{d,HRSG}$ و $k_{P,d,HRSG}$ نیز به ترتیب افت فشار و ضریب افت فشار در بویلر بازیاب می‌باشد.

علت به‌کارگیری ضریب ۱,۰۱ در معادله (۲-۴۶) ایجاد فشار نسبی مثبت جهت تخلیه محصولات احتراق به اتمسفر می‌باشد.

۲-۴-۸- معادلات قدرت

برق تولیدی و بازده الکتریکی و بازده کل میکروتوربین‌ها از روابط (۲-۴۸) تا (۲-۵۱) به دست می‌آید:

$$\dot{W}_m = \dot{W}_t - W_c \quad (۲-۴۸)$$

$$\dot{W}_{elec} = \dot{W}_{mech} \times \eta_{gen} \quad (۲-۴۹)$$

$$\eta_{elec} = \frac{\dot{W}_{elec}}{\dot{Q}_{rec} + \dot{Q}_{comb}} \quad (۲-۵۰)$$

$$\eta_{tot,micro} = \frac{\dot{W}_{elec} + \dot{Q}_{HRSG}}{\dot{Q}_{rec} + \dot{Q}_{comb}} \quad (۲-۵۱)$$

در این روابط، \dot{W}_m ، \dot{W}_{elec} ، η_{elec} و $\eta_{tot,micro}$ به ترتیب کار مکانیکی، کار الکتریکی، بازده تولید الکتریسیته و بازده کلی میکروتوربین‌ها می‌باشد.

۲-۴-۹- حالت پاره‌بار

پاره‌بار شدن میکروتوربین‌ها به وسیله‌ی تغییر دبی جرمی سوخت و تغییر دور شفت صورت می‌گیرد. با تغییر دور شفت بسیاری از روابط و ثوابت سیکل مانند افت فشار در اجزاء، بازده آیزنتروپیک کمپرسور و توربین، کارایی رکوپراتور و ... تغییر می‌کند. از سوی دیگر، معادلات ارائه شده در بالا برای حالت ایزو معتبر می‌باشد. منظور از حالت ایزو شرایطی است که در آن:

$$RH_{amb} \text{ از منظور } [۲۸]. \text{ باشد } T_{amb} = 15^\circ C, P_{amb} = 101kPa, RH_{amb} = 60\%$$

رطوبت نسبی هوای محیط می‌باشد. این در حالی است که در مطالعه‌ی حاضر، شرایط واقعی مورد بررسی قرار گرفته است. لذا ملزم به استفاده از روابطی به منظور اصلاح مشخصات عملکرد میکروتوربین در حالت پاره‌بار و خارج از شرایط طراحی هستیم.

مالینوسکی^۱ و همکاران به وسیله‌ی یک مدل تحلیلی، عملکرد میکروتوربین در حالت پاره‌بار و خارج از شرایط طراحی را مدلسازی کرده، و معادلات مربوطه را استخراج نموده‌اند. ایشان ضمن ارائه‌ی روابط ابتکاری به بررسی عملکرد اجزای مختلف میکروتوربین در حالت پاره‌بار و خارج از شرایط طراحی پرداخته‌اند. سپس با ترکیب روابط اجزا، عملکرد کلی میکروتوربین را تحلیل نموده و با نتایج تجربی عملکرد میکروتوربین 30 kW شرکت Capstone در حالت پاره‌بار مقایسه کرده‌اند. در مدل ایشان، تغییر در بار میکروتوربین به وسیله‌ی تغییر دبی سوخت ورودی به محفظه احتراق انجام شده است. در حین تغییر بار، دور شفت و دمای ورودی توربین تغییر کرده اما دمای گاز خروجی از توربین ثابت می‌ماند [۸].

در مطالعه‌ی حاضر از این منبع استفاده شده است. البته به دلیل مفصل بودن روابط از ذکر آنها در این نوشتار خودداری شده است.

۲-۴-۱۰- بویلر کمکی

برای تعیین دبی جرمی سوخت مصرفی بویلر کمکی داریم:

$$\dot{m}_{f,aux,B} = \frac{\dot{Q}_{aux,B}}{LHV \times \eta_{aux,B}} \quad (2-52)$$

در رابطه (۲-۵۳) $\dot{m}_{f,aux,B}$ و $\eta_{aux,B}$ به ترتیب دبی جرمی سوخت مصرفی و راندمان بویلر کمکی می‌باشد.

۲-۴-۱۱- معادلات خورشیدی

تابش خورشیدی رسیده به سطح زمین از دو بخش مستقیم و پراکنده تشکیل شده است. دیش‌های سهموی فقط قادر به دریافت و متمرکز کردن تابش مستقیم می‌باشند. دیش‌های سهموی تابش دریافتی را در نقطه کانونی خود متمرکز کرده و به وسیله‌ی لوله‌های اپتیکی به رسیور میکروتوربین و یا بویلر

^۱ Malinowski

کمکی منتقل می‌کنند. به منظور تعیین انرژی خورشیدی دریافتی (\dot{Q}_{sol})، ابتدا باید تابش مستقیم خورشید در سطح عمود بر جهت تابش را به دست آورده، سپس در بازه دیش‌های سهموی و بازه سیستم انتقال اپتیکی ضرب کنیم.

$$\dot{Q}_{sol} = G_{cl,nb} \times A_{dishes} \times \eta_{sol} \quad (53-2)$$

$$G_{cl,nb} = G_{on} \times \tau_b \quad (54-2)$$

در روابط (53-2) و (54-2) A_{dishes} مجموع مساحت دیش‌های سهموی، η_{sol} بازه دیش‌ها و سیستم انتقال اپتیکی، $G_{cl,nb}$ و G_{on} به ترتیب شدت تابش مستقیم دریافتی از خورشید در سطح عمود بر جهت تابش بر روی زمین و خارج از جو زمین و τ_b ضریب عبور تابش خورشیدی از جو زمین می‌باشد.

مقادیر G_{on} و τ_b از طریق روابط (55-2) و (56-2) تعیین می‌شود [29]:

$$G_{on} = G_{sc} \times \left(1 + 0.033 \cos\left(\frac{360n}{365}\right) \right) \quad (55-2)$$

$$\tau_b = a_0 + b \times \exp\left(\frac{-l}{\cos\theta_z}\right) \quad (56-2)$$

درجائیکه G_{sc} ثابت خورشیدی و برابر 1366، و n شماره روز سال از اول ژانویه (12 دی) می‌باشد. ثوابت a_0 ، b و l بر حسب ارتفاع از سطح دریا، میزان دید افقی، فصل و اقلیم منطقه تعیین می‌شود که در مرجع [29] به تفصیل موجود می‌باشد.

برای محاسبه $\cos\theta_z$ داریم:

$$\cos\theta_z = \cos\phi \cos\delta \cos\theta_{hr} + \sin\phi \sin\theta_{hr} \quad (57-2)$$

$$\delta = 23.45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{365}\right) \quad (58-2)$$

$$\theta_{hr} = 15 \times (hr - 12) \quad (59-2)$$

در روابط (۵۷-۲) تا (۵۹-۲) θ_z ، \emptyset ، δ ، θ_{hr} ، t به ترتیب زاویه سمت الراس، عرض جغرافیایی، زاویه انحراف، زاویه ساعت خورشیدی و ساعت خورشیدی می باشد. ساعت خورشیدی در این رابطه بر مبنای ظهر محاسبه می شود.

فصل سوم: مطالعه‌ی موردی

۳-۱- معرفی ساختمان مورد بررسی

همان‌گونه که در فصل اول اشاره شد، یکی از بخش‌های پرمصرف انرژی و یکی از عمده‌ترین تولیدکننده‌های آلودگی هوا، بخش ساختمان می‌باشد، از سوی دیگر بخش ساختمان نیاز متوالی و پیوسته به حرارت دارد. علاوه بر این به دلیل دسترسی بخش ساختمان به شبکه برق سراسری، امکان فروش برق تولیدی به شبکه نیز میسر می‌باشد. همه دلایل فوق در کنار مطالعات اندکی که بر روی عملکرد سیکل تولید همزمان در بخش ساختمان صورت گرفته است، ما را بر آن داشت تا بخش ساختمان را برای مطالعات خود انتخاب نماییم.

ساختمان مورد بررسی یک مجتمع مسکونی است که از چهار بلوک چهارطبقه تشکیل شده است. مجموع مساحت زیر بنای این مجتمع $4120 m^2$ می‌باشد. مواد به کاررفته در ساخت این مجتمع مطابق معمول معماری ایران فرض شده است. اجزای تشکیل دهنده دیوارهای خارجی در جدول (۳-۱) معرفی شده است.

جدول ۳-۱: جنس دیوارهای خارجی ساختمان مورد بررسی

ضخامت (cm)	ماده
۲	گچ
۱/۵	پلاستر سیمان
۲۰	آجر توخالی (سفال)
۱/۵	پلاستر سیمان
۱/۵	آجر نما

جنس سقف مطابق جدول (۳-۲) می‌باشد:

جدول ۳-۲: جنس سقف ساختمان مورد بررسی

ضخامت (cm)	ماده
۲	گچ
۳۰	بلوک سفالی
۴	بتن غیر مسلح
۱	ایزوگام

سقف، دارای پوشش آلومینیوم، به منظور انعکاس تابش خورشیدی می‌باشد.

هر طبقه به مساحت 257 m^2 دارای ۲ واحد مسکونی بوده و ساختمان در تمام ساعات روز و تمام

ایام سال اشغال می‌باشد.

در و پنجره‌های خارجی ساختمان از نوع فلزی با شیشه‌های تک جداره می‌باشد. ضریب کلی انتقال

حرارت متوسط دیوارهای خارجی $\frac{W}{\text{m}^2 \cdot \text{C}}$ $1/476$ می‌باشد.

محاسبات برای ۳ شهر از ایران انجام گرفته است. تهران، به نمایندگی از اقلیم معتدل، یزد به نمایندگی

از اقلیم گرم و خشک و بندرعباس به نمایندگی از اقلیم گرم و مرطوب. برخی از ویژگی‌های شهرهای

انتخابی در جدول ۳ خلاصه شده است [۳۰].

جدول ۳-۳: مشخصات شهرهای مورد بررسی

شاخص	واحد	تهران	یزد	بندرعباس
متوسط حداکثر دما	°C	۲۳	۲۷	۳۲
متوسط حداقل دما	°C	۱۳	۱۳	۲۲
میانگین دمای سالانه	°C	۱۸/۵	۲۰	۲۷
رطوبت متوسط سالانه	%	۴۰	۳۰	۶۵
ارتفاع از سطح دریا	m	۱۱۹۰	۱۲۳۰	۱۰
عرض جغرافیایی	°	۳۵	۳۱	۲۷
مجموع ساعات آفتابی سالانه	hr	۲۹۹۰	۳۳۹۰	۳۲۴۵

۳-۲- مشخصات فنی سیکل تولید همزمان مورد استفاده

در جداول (۳-۴) و (۳-۵) مشخصات فنی میکروتوربین مورد استفاده در این مطالعه در شرایط ایزو

و حالت تمام‌بار و برخی داده‌های ضروری ارائه شده است:

جدول ۳-۴: مشخصات فنی میکروتوربین‌های مورد استفاده

مرجع	مقدار	واحد	نماد	مشخصات
-	Capston _{C30}	-	-	مدل میکروتوربین
-	۳۰	kW	\dot{W}_{elec}	توان الکتریکی میکروتوربین
[۳۱]	۳/۶۴	-	r_c	نسبت تراکم کمپرسور
[۳۱]	۰/۷۹	%	η_c	راندمان آیزنتروپیک کمپرسور
[۳۱]	۰/۸۴۳	%	η_t	راندمان آیزنتروپیک توربین
[۸]	۰/۹۸	%	η_{comb}	بازده محفظه احتراق
[۸]	۰/۹۹	%	η_m	راندمان مکانیکی میکروتوربین
[۸]	۰/۹۲	%	η_g	راندمان ژنراتور
[۳۱]	۰/۸۶	%	ϵ_{Re}	کارایی رکوپراتور
[۳۱]	۱۰۹۸	K	T_5	دمای گاز ورودی به توربین
-	۳۹۳	K	T_8	دمای گاز خروجی از بویلر بازیاب
[۸]	۰/۰۱	-	$k_{P,d,g}$	ضریب افت فشار هوا در ژنراتور
[۸]	۰/۰۲	-	$k_{P,d,Re,a}$	ضریب افت فشار سمت هوا در رکوپراتور
[۸]	۰/۰۳	-	$k_{P,d,Re,g}$	ضریب افت فشار سمت گاز در رکوپراتور
[۳۲]	۰/۰۳	-	$k_{P,d,rec}$	ضریب افت فشار رسیور خورشیدی
[۸]	۰/۰۲	-	$k_{P,d,comb}$	ضریب افت فشار محفظه احتراق
-	۰/۰۳	-	$k_{P,d,HRSg}$	ضریب افت فشار بویلر بازیاب

جدول ۳-۵: برخی داده‌های ضروری برای انجام محاسبات

مرجع	مقدار	واحد	نماد	مشخصات
-	۳۵	°C	$T_{D,H,W}$	میانگین دمای آب گرم مصرفی
-	۱۵	°C	$T_{C,W}$	دمای آب شهر
[۳۳]	۰/۱۷	kg/s	$\dot{m}_{D,H,W}$	دبی آب مصرفی
[۲۶]	۳۶۰۰۰	kJ/kg	LHV	ارزش حرارتی گاز طبیعی
[۳۴]	۷۵	%	$\eta_{aux,B}$	بازده بویلر کمکی
[۳۶ و ۳۵ و ۱۰]	۵۵	%	η_{sol}	بازده سیستم خورشیدی
[۴۹]	۰/۷۵	-	Cop_{AC}	ضریب عملکرد متوسط چیلر جذبی
[۵۰]	۴/۵	-	Cop_{CC}	ضریب عملکرد چیلر تراکمی

۳-۳- استراتژی‌های اقتصادی

از نظر مسائل اقتصادی، در این مطالعه دو هدف زیر دنبال شده است:

۱- پیدا کردن بهترین ترکیب از؛ مساحت دیش‌های سهموی و تعداد میکروتوربین، برای هر کدام از شهرهای مورد مطالعه

۲- محاسبه هزینه برق تولید شده برای بهترین ترکیب، و مقایسه آن با هزینه‌های فتوولتائیک.

به این صورت که ابتدا با فرض وجود ۱ دستگاه میکروتوربین $30 kW$ و مجموع مساحت صفر متر مربع برای دیش‌های سهموی، محاسبات اقتصادی انجام شده است. سپس مساحت دیش‌ها به ۵۰۰ و ۱۰۰۰ و ۱۵۰۰ و ۲۰۰۰ و ۲۵۰۰ و ۳۰۰۰ متر مربع تغییر یافته و مجدداً کل محاسبات برای هر ۳ شهر تکرار شده است. در مرحله‌ی بعد با فرض وجود ۲ عدد میکروتوربین ۳۰ کیلووات محاسبات برای تمام مساحت‌های فوق انجام شده است. این کار تا ۷ عدد میکروتوربین انجام شده و در هر بار ۷ مساحت مختلف مورد آزمایش قرار گرفته است. مقرون به صرفه‌ترین مساحت برای هر تعداد مشخص از میکروتوربین‌ها گزارش شده است. در پایان اقتصادی‌ترین ترکیب تعداد میکروتوربین و مساحت دیش از بین ۴۹ حالت فوق برای هر شهر به صورت جداگانه مشخص شده است. در تمام این حالات فرض شده است که مخزن ذخیره حرارت وجود ندارد.

سپس کل محاسبات فوق مجدداً برای حالت دارای مخزن ذخیره حرارت تکرار شده است. به این صورت که یکبار ظرفیت مخزن ذخیره برابر با ۱ گیگاژول، بار دوم ۲ گیگاژول و در بار سوم ۳ گیگاژول در نظر گرفته شده است.

از سوی دیگر کلیه مراحل فوق برای ۱۰ سناریوی اقتصادی انجام گرفته است.

در مجموع می‌توان گفت وضعیت اقتصادی سیکل مذکور تحت ۱۹۶۰ حالت مختلف مورد ارزیابی واقع شده است.

به منظور دستیابی به دو هدف فوق، از روش هزینه برابر شده انرژی^۱ (LCOE) استفاده شده است.

رابطه کلی LCOE به صورت زیر است [۳۷]:

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{\text{هزینه‌ی چرخه عمر پروژه}}{\text{کل برق تولیدی در چرخه عمر پروژه}} \quad (۱-۳)$$

رابطه‌ی (۱-۳) نسبت هزینه چرخه‌ی عمر سیستم به کل برق تولیدی سیکل را نشان می‌دهد. رابطه‌ی فوق به صورت ساده بیان می‌کند که قیمت فروش برق سیستم به شبکه باید چه مقدار باشد، تا هزینه‌های اضافی که بابت نصب، بهره‌برداری و نگهداری سیستم به جای سیستم متعارف پرداخت شده است، در طول عمر پروژه (۲۰ سال) جبران شود. بدیهی است که اگر قیمت فروش برق به شبکه کمتر از LCOE باشد، اجرای این سیستم از نظر اقتصادی نامعقول است.

$$LCOE \left(\frac{\$}{kWh} \right) = \frac{C_0 - B_0 + \sum_{y=1}^o \frac{C_y}{(1+d)^y} + \sum_{y=1}^o \frac{B_y}{(1+d)^y}}{\sum_{y=1}^o \frac{E_y}{(1+d)^y}} \quad (۲-۳)$$

در رابطه‌ی (۲-۳) C_0 هزینه سرمایه‌گذاری اولیه‌ی اجرای پروژه و B_0 کاهش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه است. منظور از B_0 هزینه سرمایه‌ای اجرای گرمایش و سرمایش ساختمان به روش متعارف است که به دلیل اجرای سیستم CCHP در آنها صرفه جویی می‌شود. C_y هزینه‌ی جاری سیکل تولید همزمان می‌باشد که شامل هزینه‌ی تعمیر و نگهداری و سوخت مصرفی می‌باشد. B_y هزینه‌ی جاری صرفه جویی شده به دلیل استفاده از سیکل تولید همزمان می‌باشد. این هزینه‌ها شامل تعمیر و نگهداری و سوخت مصرفی تهویه مطبوع متعارف می‌باشد. y شماره سال، d نرخ تنزیل، E_y برق فروخته شده به شبکه در سال y و o طول عمر سیستم می‌باشد.

^۱ - The Levelized Cost of Energy

۳-۴- سیاست‌های انرژی ایران

۳-۴-۱- حذف یارانه‌ی انرژی

مطابق این سیاست، قیمت حامل‌های انرژی ایران طی پنج سال آینده به قیمت صادراتی افزایش یافته و از این طریق یارانه‌های انرژی حذف خواهد شد [۳۸]. بدیهی است که پس از این مرحله، به دلیل نوسان قیمت انرژی، یک قیمت ثابت را نمی‌توان برای حامل‌های انرژی در نظر گرفت. لذا به ناچار سناریوهای مختلف قیمتی باید بررسی شوند.

۳-۴-۲- حمایت از تولید پراکنده‌ی برق و انرژی‌های تجدیدپذیر

وزارت نیروی ایران سیاست‌های زیادی را برای حمایت از تولید برق به صورت پراکنده^۱ و تولید برق از انرژی‌های تجدیدپذیر وضع کرده است. قرارداد خرید تضمینی ۲۰ ساله، ریسک سرمایه‌گذاری در این زمینه را کاهش داده است. تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تولید پراکنده با سوخت فسیلی در سال ۲۰۱۶ برای ظرفیت‌های کمتر از ۲۰۰ kW، برابر با $\left(\frac{\$}{kWh}\right) 0.31$ و برای ظرفیت‌های بالاتر $\left(\frac{\$}{kWh}\right) 0.28$ می‌باشد. همچنین به ازای هر kWh برق تولیدی این نیروگاه‌ها معادل قیمت (m^3) ۰/۲ گاز طبیعی نیز پرداخت می‌شود [۳۹]. تعرفه‌ی خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های کوچک خورشیدی نیز برای ظرفیت‌های کمتر از $(kW) 100$ برابر با $\left(\frac{\$}{kWh}\right) 0.2$ و برای ظرفیت‌های بالاتر برابر با $\left(\frac{\$}{kWh}\right) 0.14$ می‌باشد [۴۰ و ۴۱]. تعرفه‌ی خرید تضمینی برای هر دو نوع نیروگاه، هر ساله با توجه به نرخ تسعیر ارز^۲ و نرخ تورم^۳ تعدیل می‌شود. برای نیروگاه‌های کوچک خورشیدی از سال دهم تا سال بیستم تعرفه‌ی خرید تضمینی در عدد ۰/۷ ضرب می‌شود. در پایان دوره‌ی ۲۰ ساله‌ی قرارداد، مالک نیروگاه مجاز به ادامه‌ی همکاری با وزارت نیرو، خودمصرفی^۴ برق تولیدی، و یا صادرات برق در چارچوب قوانین ایران می‌باشد.

1 - Distributed Generation
2 - Exchange Rate

3 - Inflation
4 - Self Consumption

در مطالعه‌ی حاضر ۱۰ سناریوی اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. که در جدول (۳-۶) مشاهده می‌شود. در هر سناریو LCOE محاسبه شده است. هر کدام از سناریوهای جدول (۳-۶) برای ۱۹۶ حالتی که در بخش ۳-۳ شرح داده شد مورد آزمایش قرار گرفته است.

جدول ۳-۶: سناریوهای اقتصادی مورد مطالعه

سناریو	برق خریداری از شبکه برای سیستم متعارف	برق تولیدی فروخته شده به شبکه	گاز خریداری شده از شبکه برای سیستم متعارف	گاز خریداری شده از شبکه برای CCHP
۱	صادراتی ۲۰۱۳	$LCoE_{S1}$	صادراتی ۲۰۱۳	صادراتی ۲۰۱۳
۲	صادراتی ۲۰۱۶	$LCoE_{S2}$	صادراتی ۲۰۱۶	صادراتی ۲۰۱۶
۳	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	$LCoE_{S3}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)
۴	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	$LCoE_{S4}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)
۵	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	$LCoE_{S5}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	یارانه ای، نیروگاهی (تا ۲۰۱۶)
۶	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	$LCoE_{S6}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	یارانه ای، نیروگاهی (تا ۲۰۱۳)
۷	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	$DG + LCoE_{S7}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)
۸	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	$DG + LCoE_{S8}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)
۹	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	$DG + LCoE_{S9}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۶)	یارانه ای، نیروگاهی (تا ۲۰۱۶)
۱۰	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	$DG + LCoE_{S10}$	یارانه ای، مسکونی (تا ۲۰۱۳)	یارانه ای، نیروگاهی (تا ۲۰۱۳)

منظور از صادراتی ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ در جدول (۳-۶)، قیمت گاز و برق صادراتی ایران در سال‌های ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ است. علت بررسی این دو سناریو اختلاف زیاد قیمت در این دو سال است. عبارت

یارانه‌ای به معنی محاسبه قیمت بر مبنای قانون هدفمندی یارانه‌های ایران است. از آنجائیکه تعرفه فروش گاز طبیعی به بخش مسکونی و نیروگاهی متفاوت است هر دو فرض در ستون چهارم مورد بررسی قرار گرفته است. عبارات (تا ۲۰۱۳) و (تا ۲۰۱۶) به این دلیل است که پس از اجرای قانون هدفمندی یارانه‌های انرژی در ایران قیمت جهانی دقیقاً معلوم نیست، لذا به ناچار حداقل و حداکثر قیمت احتمالی در نظر گرفته شده است. از آنجائیکه سال ۲۰۱۳ جزو گران‌ترین سال‌ها و ۲۰۱۶ جزو ارزان‌ترین سال‌ها بوده لذا این دو سال به عنوان نماینده حداکثر و حداقل قیمت فرض شده است. در ستون سوم عبارت $LCOE_{Si}$ به معنی قیمت تمام شده‌ی برق برای آن سناریو است. $DG + LCOE_{Si}$ فرمول پیشنهادی قیمت برق تولیدی است. معنای این عبارت آن است که در صورتی که سهم سوخت فسیلی از تولید برق، با قیمت تولید پراکنده‌ی تضمینی وزارت نیروی ایران پرداخت شود، برای سهم خورشید از تولید برق باید چه قیمتی در نظر گرفته شود. برای محاسبه سهم خورشید در تولید برق از ضریبی تحت عنوان سهم خورشید از کل انرژی (SSTE)^۱ مطابق رابطه (۳-۳) استفاده شده است:

$$SSTE = \frac{\dot{Q}_{rec}}{\dot{Q}_{rec} + \dot{Q}_{comb}} \quad (۳-۳)$$

$$\frac{\text{هزینه چرخه عمر پروژه}}{\text{برق تولیدی در چرخه عمر پروژه}} \quad (۴-۳)$$

$$= (SSTE \times LCOE_{s7-s10}) + \left((1 - SSTE) \times DG_{price} \right)$$

در روابط (۳-۳) و (۴-۳) $SSTE$ سهم خورشید از برق تولیدی بر حسب درصد، $LCOE_{s7-s10}$ هزینه‌ی برق تولیدی خورشیدی بر حسب $\left(\frac{\$}{kWh}\right)$ برای ردیف‌های ۷ تا ۱۰ جدول (۳-۶) می‌باشد. مشروط بر اینکه سهم سوخت فسیلی از تولید برق، با قیمت ثابت خرید تضمینی توسط دولت ایران

^۱ - Share of the Solar from Total Energy

محاسبه شود. DG_{price} نیز تعرفه‌ی خرید تضمینی برق تولید پراکنده گازسوز توسط دولت ایران می‌باشد.

لیست قیمت تجهیزات و سوخت‌های مورد استفاده در جدول (۳-۷) خلاصه شده است.

جدول ۳-۷: لیست قیمت تجهیزات و حامل‌های انرژی

تجهیز	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری	هزینه‌ی نگهداری	مرجع
بویلر کمکی	$45 \left(\frac{\$}{kW_{th}} \right)$	۳٪ از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه (برای هر سال)	[۴۲]
میکروتوربین	$1100 \left(\frac{\$}{kW_e} \right)$	$25 \left(\frac{\$}{kW_e} \right) + 1.49 \left(\frac{\$}{MWh_e} \right)$	[۲۳ و ۳۲]
رسیور خورشیدی	$185 \left(\frac{\$}{kW_{th}} \right)$	$11 \left(\frac{\$}{kW_{th}} \right) + 0.69 \left(\frac{\$}{MWh_{th}} \right)$	[۲۳]
دیش سهموی	$260 \left(\frac{\$}{m^2} \right)$	۱٪ از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه (برای هر سال)	[۳۶]
بویلر بازیاب	$100 \left(\frac{\$}{kW_{e,microturbine}} \right)$	۳٪ از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه (برای هر سال)	[۳۲]
چیلر جذبی	$(6240 + (292 \times \dot{Q}_{r,max}) - (0.121 \times \dot{Q}_{r,max}^2)) (\$)$	۳٪ از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه (برای هر سال)	[۴۴ و ۴۳]
برج خنک‌کن	$(10000 + 20 \times (\dot{Q}_{r,max} - 233)) (\$)$	۳٪ از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اولیه (برای هر سال)	[۴۴]
گاز طبیعی صادراتی (حداقل قیمت)	$0.13 \left(\frac{\$}{m^3} \right)$	-	[۴۵]

[۴۵]	-	$0.43 \left(\frac{\$}{m^3} \right)$	گاز طبیعی صادراتی (حداکثر قیمت)
[۴۶]	-	$0.04 - 0.09 \left(\frac{\$}{m^3} \right)^*$	متوسط قیمت گاز طبیعی مسکونی (یارانه‌ای ۲۰۱۶ ایران)
[۴۶]	-	$0.027 \left(\frac{\$}{m^3} \right)$	قیمت گاز طبیعی نیروگاهی (یارانه‌ای ۲۰۱۶ ایران)
[۳۸]	-	$0.08 \left(\frac{\$}{kWh} \right)$	برق صادراتی (حداقل قیمت)
[۳۸]	-	$0.12 \left(\frac{\$}{kWh} \right)$	برق صادراتی (حداکثر قیمت)
[۴۷]	-	$0.017 - 0.09 \left(\frac{\$}{kWh} \right)^*$	متوسط قیمت برق مسکونی (یارانه‌ای ۲۰۱۶ ایران)
[۳۹]	-	$0.031 + 0.2Eq1m^3_{NG} \left(\frac{\$}{kWh} \right)^{**}$	برق خرید تضمینی تولید پراکنده $\leq 200kW$
[۳۹]	-	$0.028 + 0.2Eq1m^3_{NG} \left(\frac{\$}{kWh} \right)^{**}$	برق خرید تضمینی تولید پراکنده $> 200kW$

[۴۱و۴۰]	-	$0.2 \left(\frac{\$}{kWh} \right)^{***}$	برق خرید تضمینی خورشیدی $\leq 100 kW$
[۴۱و۴۰]	-	$0.14 \left(\frac{\$}{kWh} \right)^{***}$	برق خرید تضمینی خورشیدی $> 100 kW$
[۴۸]	-	$0.1 - 0.5 \left(\frac{\$}{m^3} \right)^{****}$	میانگین قیمت آب شهری
[۵۲و۵۱]	-	(ظرفیت مخزن بر حسب kJ) $\times 0.007 (\$)$	مخزن ذخیره حرارت

* وزارت نیروی ایران با توجه به اقلیم، فصل و میزان مصرف ماهیانه، تعرفه‌های مختلفی را اعمال می‌کند.

** $0.2Eq1m^3_{NG}$: معادل قیمت $0/2$ متر مکعب گاز طبیعی، اعداد $0/031$ و $0/028$ هرساله با توجه

به نرخ تسعیر و تورم تعدیل می‌شوند.

*** از سال دهم تا بیستم این عدد در ضریب $0/7$ ضرب می‌شود، همچنین هرساله با توجه به نرخ

تسعیر و تورم نیز مجدداً تعدیل می‌شود.

**** وزارت نیروی ایران با توجه به میزان مصرف ماهیانه، تعرفه‌های مختلفی را اعمال می‌کند.

فصل چهارم: نتایج و بحث

۴-۱- توضیح مختصر روش انجام تحقیق

به منظور شبیه‌سازی عملکرد سیستم مورد مطالعه، ابتدا پروفیل ساعتی بار ساختمان با استفاده از روابط موجود در استانداردهای ASHRAE و پروفیل ساعتی تابش خورشیدی با استفاده از روابط ارائه شده در بخش ۲-۴-۱۱ تعیین شد. برای محاسبه‌ی هر دو پروفیل از نرم‌افزار Microsoft Excel کمک گرفته شده است. سپس روابط عملکرد میکروتوربین و سیکل CCHP به همراه پروفیل بار ساختمان و تابش خورشیدی در نرم‌افزار Engineering Energy Solver (EES) وارد شده و به کمک نرم‌افزار مذکور به تحلیل ساعتی عملکرد سیکل پرداخته شده است. در نهایت، خروجی نرم‌افزار EES جهت تحلیل‌های اقتصادی و فنی مجدداً به نرم‌افزار Excel سپرده شده است.

روش مذکور ۴۹ دفعه با تغییر در تعداد میکروتوربین از ۱ تا ۷ دستگاه و مساحت دیش‌های سهموی از ۰ تا ۳۰۰۰ مترمربع، برای ۳ شهر و برای ۱۰ سناریوی اقتصادی تکرار شده است، که در مجموع شامل ۱۴۷۰ مرتبه می‌باشد. سپس برای هر سناریوی اقتصادی بهترین ترکیب تعداد میکروتوربین و مساحت دیش سهموی (از منظر اقتصادی) پیشنهاد شده و پارامترهای فنی آن مورد ارزیابی قرار گرفته است. مراحل فوق یک‌بار برای حالت فاقد مخزن ذخیره انجام شده، و سه‌بار نیز برای حالت دارای مخزن ذخیره تکرار شده است. در حالت دارای مخزن ذخیره نیز سه ظرفیت مختلف لحاظ شده است که عبارت است از ۱ گیگاژول، ۲ گیگاژول و ۳ گیگاژول. سپس کمترین میزان LCoE در بین حالت‌های دارای مخزن نیز تعیین شده است.

مجموع تعداد حالت‌های مورد بررسی در این مطالعه ۵۸۸۰ حالت می‌باشد.

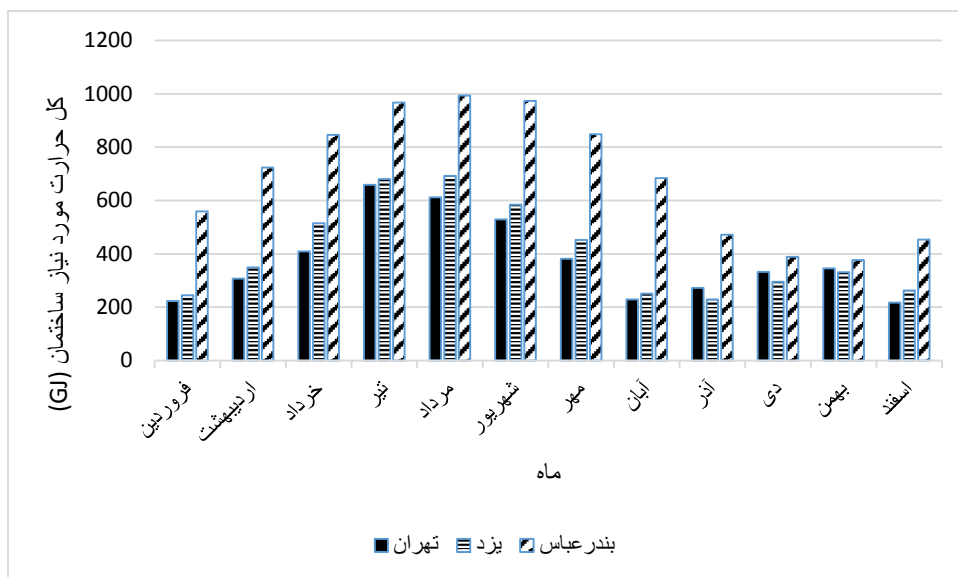
۴-۲- بار حرارتی مورد نیاز ساختمان

پروفیل بار حرارتی مورد نیاز (مصرفی) ساختمان، برای شهرهای مورد بررسی در شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) نشان داده شده است. شکل (۴-۱) مجموع حرارت ماهیانه مورد نیاز ساختمان و شکل (۴-۲) تا (۴-۴) میانگین شدت مصرف انرژی در ساعات مختلف را نشان می‌دهد. در این مطالعه به منظور

سهولت در انجام محاسبات نیمه‌ی هر ماه به عنوان روز میانگین انتخاب شده و مصرف انرژی در آن روز به کل ماه تعمیم داده شده است. در روزهای انتخابی نیز ۸ لحظه‌ی مختلف با فاصله‌ی ۳ ساعت مورد بررسی قرار گرفته و نتیجه‌ی محاسبات به کل ۳ ساعت تعمیم داده شده است. از شکل‌های (۴-۱) تا (۴-۴) موارد زیر نتیجه می‌شود:

۱- پروفیل بار ساختمان برای شهرهای یزد و تهران اختلاف چندانی ندارد اما برای بندرعباس اختلاف نسبتاً زیاد است.

۲- پیک مصرف انرژی ساختمان در ماه‌های خرداد تا مهر است.

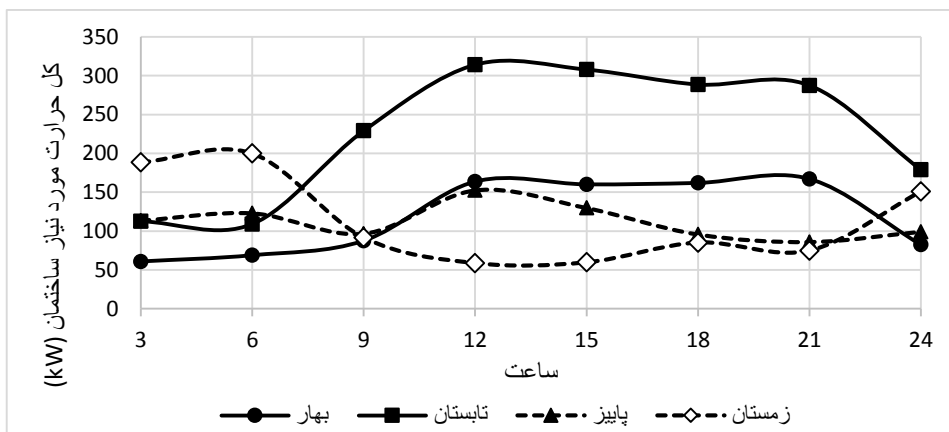


شکل ۴-۱: پروفیل ماهیانه حرارت مصرفی مجتمع مسکونی برای پاسخ به نیازهای گرمایشی، سرمایشی و آب گرم مصرفی

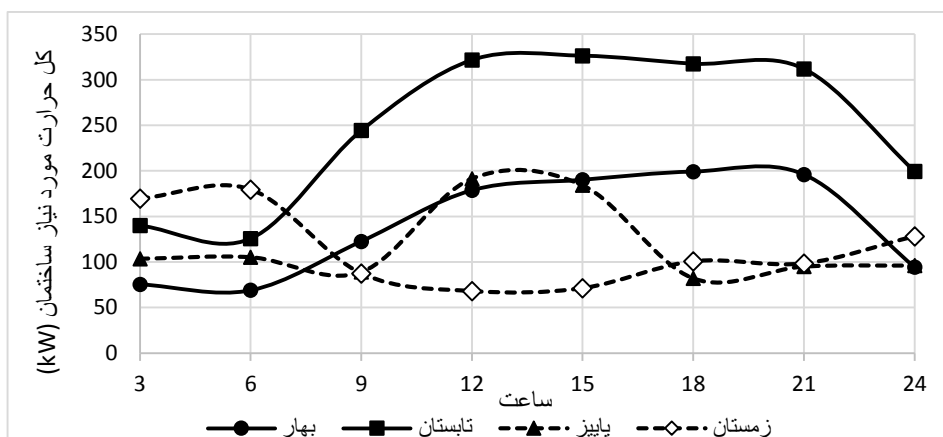
۳- شهر بندرعباس دارای بیشترین مصرف حرارت می‌باشد.

۴- به دلیل اختلاف کم دمای شب و روز در شهر بندرعباس، پروفیل بار نوسان کمی دارد.

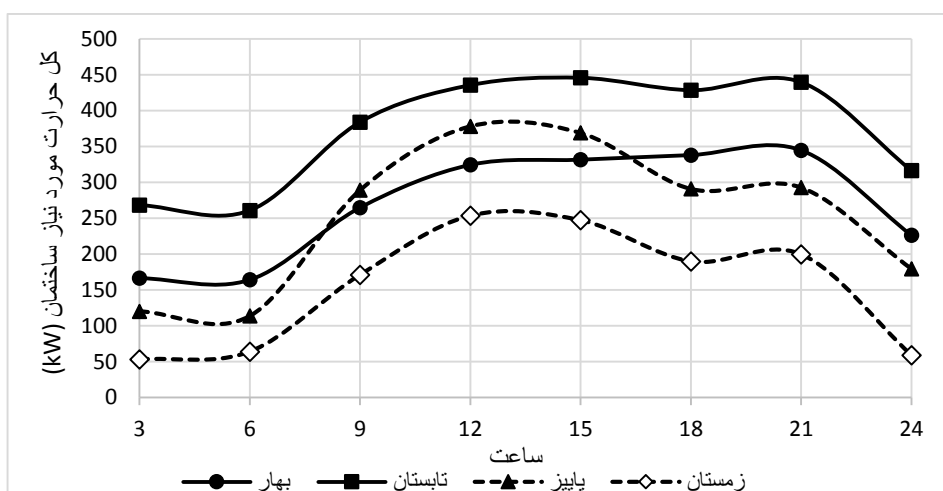
۵- به دلیل اختلاف دمای زیاد هوا بین شب و روز تهران و یزد، پروفیل بار نوسان زیادی دارد.



شکل ۲-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، تهران



شکل ۳-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، یزد

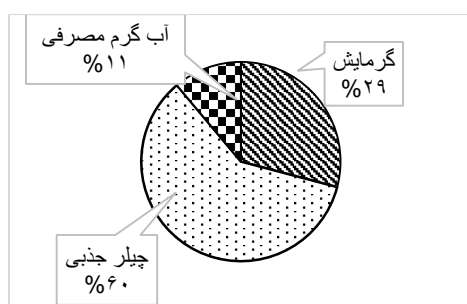


شکل ۴-۴: میانگین ساعتی مصرف حرارت ساختمان، بندرعباس

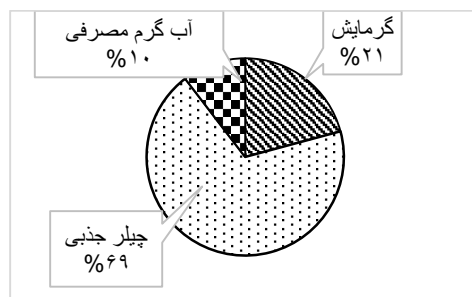
۳-۴- سهم هر یک از مصرف‌کننده‌های ساختمان از کل حرارت مصرفی

در شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۷) سهم هر یک از سه بخش مصرف‌کننده‌ی حرارت (گرمایش، چیلر جذبی و آب گرم مصرفی)، از کل حرارت مصرفی ساختمان نشان داده شده است. اهمیت این نمودارها در موارد زیر خلاصه می‌شود:

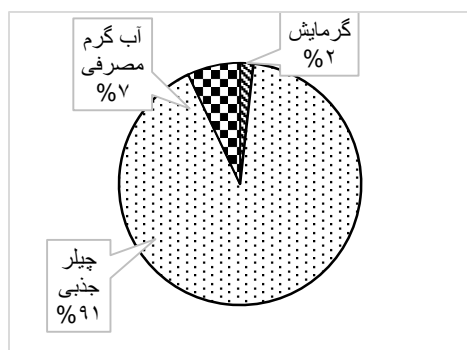
- ۱- نشان می‌دهد که کدام‌یک از بخش‌های مصرف‌کننده حرارت، پتانسیل بهینه‌سازی بیشتری دارند.
- ۲- کمک می‌کند تا بتوان عملکرد سیستم مورد نظر را برای سایر شهرها و اقلیم‌ها نیز تخمین زد.



شکل ۴-۵: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (تهران)



شکل ۴-۶: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (یزد)

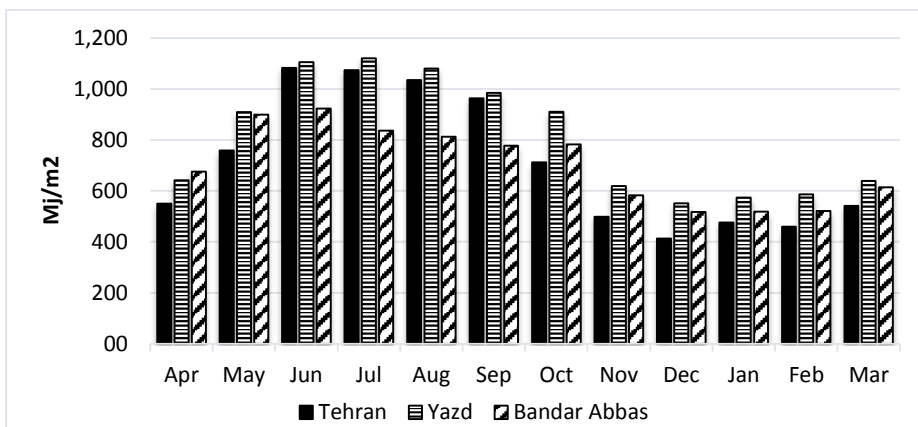


شکل ۴-۷: سهم هر بخش از کل حرارت مصرفی سالانه ساختمان (بندرعباس)

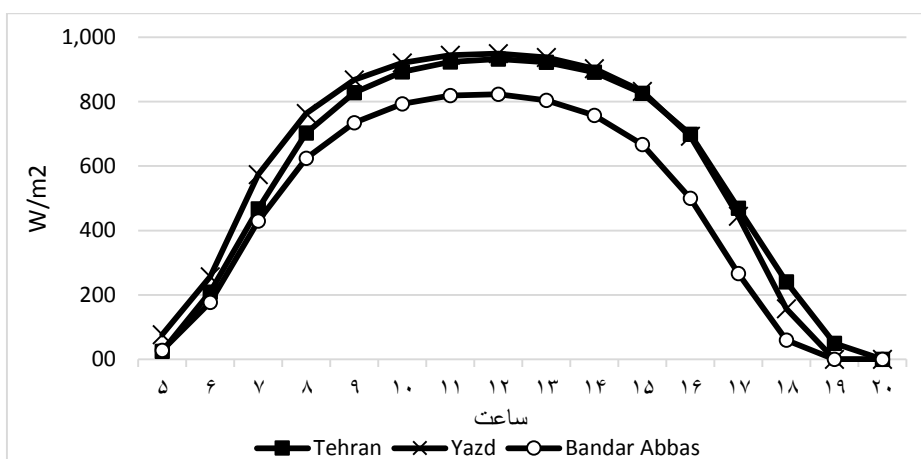
از شکل‌های (۴-۵) تا (۴-۷) معلوم است که آب گرم مصرفی تنها حدود ۱۰٪ از حرارت مصرفی ساختمان را به خود اختصاص داده است. حرارت مصرفی برای گرمایش فضا نیز در دو شهر یزد و تهران اختلاف چندانی نداشته و حدود ۲۰٪ از کل حرارت تولیدی را مصرف می‌کند. اما در شهر بندرعباس تنها ۲٪ از حرارت مصرفی ساختمان مربوط به گرمایش فضا می‌باشد. آنچه در نمودارهای فوق حائز اهمیت است این است که بیش از ۶۰٪ حرارت مصرفی در شهرهای تهران و یزد، و بیش از ۹۰٪ حرارت مصرفی در شهر بندرعباس مربوط به چیلر جذبی می‌باشد. این مطلب نشان دهنده‌ی آن است که در سیستم‌های تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت، عمده‌ی حرارت تولیدی صرف عملکرد چیلر جذبی می‌شود. لذا هرگونه توسعه در خصوص افزایش بازده سیکل تبرید جذبی می‌تواند تا حد زیادی به بهبود وضعیت فنی و اقتصادی سیکل تولید همزمان کمک کند.

۴-۴- تابش مستقیم رسیده به سطح دیش‌های سهموی

میزان تابش مستقیم دریافتی از خورشید، در شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) نشان داده شده است. از مقایسه شکل (۴-۱) و (۴-۸) این نتیجه به دست می‌آید که تابش دریافتی در ماههایی که ساختمان به حرارت زیادتری نیاز دارد بیشتر است. اما بر خلاف شکل (۴-۱) که نشان می‌داد بیشترین مصرف حرارت در شهر بندرعباس اتفاق می‌افتد، شکل‌های (۴-۸) و (۴-۹) گویای دریافت تابش خورشیدی کمتر در شهر بندرعباس است. علت پایین بودن شدت تابش خورشید در شهر بندرعباس، رطوبت بالای هوای آن است. همان‌گونه که قبلاً نیز اشاره شد، دیش‌های سهموی فقط قادر به متمرکز کردن تابش مستقیم دریافتی از خورشید هستند. و تابش پخش را نمی‌توانند متمرکز نمایند. در شهر بندرعباس به دلیل رطوبت بسیار زیاد موجود در هوا، بخش زیادی از تابش خورشید، حین عبور از جو، از مسیر خود منحرف شده و به تابش پخش تبدیل می‌شود، لذا امکان گردآوری آن توسط دیش‌های سهموی وجود ندارد.



شکل ۴-۸: تابش مستقیم رسیده به سطح دیش‌های سهموی در ماه‌های مختلف سال



شکل ۴-۹: میانگین شدت تابش مستقیم دریافتی در ساعات مختلف روز

۴-۵- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی در حالت فاقد مخزن ذخیره‌ی حرارتی

پس از محاسبه‌ی LCoE برای ۴۹ ترکیب از تعداد میکروتوربین و مساحت دیش‌های سهموی برای

شهرهای مورد مطالعه، کمترین مقادیر LCoE در جداول (۴-۱) تا (۴-۳) خلاصه شده است.

۴-۵-۱- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر تهران

در جدول (۴-۱) نتایج برای شهر تهران آمده است:

جدول ۴-۱: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر تهران

سناریو	N	A	LCoE ۲۰ ساله	LCoE ۵ ساله	تعارفه الکتریسیته	اختلاف ۲۰ ساله ٪	اختلاف ۵ ساله ٪
۱	۳	۱۰۰۰	۰/۲۱	۰/۳۷۵	۰/۱۲	۷۷	۲۱۲
۲	۳	۰	۰/۱	۰/۱۶۵	۰/۰۸	۲۲	۱۰۷
۳	۳	۰	۰/۰۷	۰/۱۴۷	۰/۰۳۱	۱۲۲	۳۷۴
۴	۳	۱۰۰۰	۰/۱۲	۰/۲۸۳	۰/۰۳۱	۲۸۹	۸۱۳
۵	۲	۰	۰/۰۶	۰/۱۱۴	۰/۰۳۱	۷۸	۲۶۸
۶	۳	۱۰۰۰	۰/۱	۰/۲۶۴	۰/۰۳۱	۲۳۲	۷۵۲
۷	۳	۱۰۰۰	۰/۲۴	۰/۶۴۸	۰/۲	۱۸	۲۲۴
۸	۳	۱۰۰۰	۰/۳۷	۰/۷۲۲	۰/۲	۸۴	۲۶۱
۹	۳	۱۰۰۰	۰/۲۱	۰/۶۱۳	۰/۲	۷	۲۰۷
۱۰	۳	۱۰۰۰	۰/۳۲	۰/۶۷۵	۰/۲	۶۲	۲۳۸

در جدول (۴-۱)، ستون اول، سناریوهای اقتصادی مورد بررسی را نشان می‌دهد.

N تعداد بهینه میکروتوربین و A مجموع مساحت بهینه دیش‌های سهموی است. این اعداد نشان دهنده‌ی آن است که در هر کدام از سناریوهای مورد بررسی تعداد میکروتوربین و مساحت دیش‌ها باید چه مقدار باشد که منجر به کمترین هزینه تولید برق (LCoE) شود.

در ستون چهارم، مقدار (LCoE)، با فرض N,A بهینه را نشان می‌دهد. باید توجه نمود که در هر کدام از سناریوها، حداقل LCoE ممکن، مقداری است که در این ستون اشاره شده است.

در ستون پنجم LCoE پنج ساله آمده است. منظور از LCoE پنج ساله، قیمت فروش برق به شبکه به منظور بازگشت سرمایه در ۵ سال است. این عبارت نشان می‌دهد که تعارفه فروش برق به شبکه باید چه مقدار باشد تا سرمایه‌گذاری در این طرح بازگشت سرمایه‌ی ۵ ساله را به دنبال داشته باشد.

تفاوت LCoE پنج ساله و LCoE بیست ساله در مدت بازگشت سرمایه است.

در ستون ششم، منظور از عبارت تعرفه‌ی الکتریسیته، تعرفه‌ی فروش برق تولیدی سیستم تولید همزمان به شبکه برق سراسری می‌باشد. این تعرفه در سناریوهای مختلف متفاوت می‌باشد. در سناریوی ۱ و ۲، تعرفه‌های برق صادراتی در سالهای ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ می‌باشد. در سناریوهای ۳ و ۴ و ۵ و ۶ تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تولید پراکنده‌ی فسیلی توسط دولت ایران می‌باشد. در سناریوهای ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰ منظور از تعرفه الکتریسیته، تعرفه خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تولید پراکنده‌ی خورشیدی توسط دولت ایران می‌باشد. بدیهی است که LCoE کمتر از تعرفه الکتریسیته، نشان دهنده‌ی این است که هزینه‌ی برق تولیدی سیستم تولید همزمان از تعرفه فروش برق به شبکه‌ی سراسری کمتر است و طرح مذکور در آن سناریو دارای توجیه اقتصادی می‌باشد. در صورتی که LCoE، بیشتر از تعرفه‌ی الکتریسیته باشد، یعنی تعرفه‌ی فروش برق به شبکه‌ی سراسری پاسخگوی هزینه‌های تولید برق نیست و استفاده از سیکل تولید همزمان با فرض آن سناریو دارای توجیه اقتصادی نمی‌باشد.

اعداد موجود در ستون هفتم و هشتم نشان دهنده‌ی میزان اختلاف بین LCoE با تعرفه‌ی الکتریسیته می‌باشد. این عدد گویای آن است که تعرفه‌ی فروش برق به شبکه سراسری چند درصد باید افزایش یابد تا هزینه‌های تولید برق را پوشش دهد و طرح مذکور به حداقل توجیه اقتصادی دست یابد. به عنوان مثال در سناریوی نهم از جدول (۴-۱) در صورتی که تعرفه‌ی خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تولید پراکنده‌ی خورشیدی، به میزان ۱۸٪ افزایش یابد، طرح مذکور توجیه اقتصادی پیدا می‌کند.

تفسیر اعداد موجود در جدول (۴-۱):

در سناریوهای ۱ و ۴ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰، تعداد بهینه‌ی میکروتوربین ۳ عدد به دست آمده است، که با فرض ظرفیت ۳۰ کیلوواتی هر میکروتوربین، مجموع ظرفیت نامی ۹۰ کیلووات الکتریسیته برای ساختمان مورد نظر در شهر تهران مناسب می‌باشد. همچنین مساحت دیش‌های سهموی در تمام این سناریوها مقدار ۱۰۰۰ متر مربع به دست آمده است.

در سناریوهای ۲ و ۳ و ۵ مساحت بهینه دیش‌های سهموی معادل صفر متر مربع به دست آمده است. این بدان معناست که در این سناریوها حداقل هزینه‌ی تولید الکتریسیته در حالتی اتفاق می‌افتد که از انرژی خورشیدی استفاده نکنیم. دلیل این امر قیمت پایین گاز در این سناریوها است. قیمت گاز مصرفی CCHP در این سه سناریو معادل گاز یارانه‌ای در نظر گرفته شده است. همچنین فرض شده است که در پایان اجرای قانون هدفمندی یارانه‌ها، قیمت گاز به قیمت گاز صادراتی در سال ۲۰۱۶ برسد، که در واقع پایین‌ترین قیمت صادراتی ایران است.

در ۶ سناریوی اول صرفاً یک LCoE به عنوان هزینه برق به دست می‌آوریم. اما در ۴ سناریوی بعد برای محاسبه‌ی LCoE از یک روش نوآورانه استفاده شده است. بدین صورت که فرض شده که درصدی از برق تولیدی میکروتوربین‌ها که به واسطه‌ی سوخت فسیلی تولید شده است را با نرخ خرید تضمینی تولید پراکنده DG که در ردیف‌های ۱۶ و ۱۷ جدول (۳-۷) مشخص شده است محاسبه کرده و برای مابقی برق تولیدی که به وسیله‌ی انرژی خورشیدی تولید شده است، LCoE را محاسبه می‌نمائیم. از آنجائیکه همیشه قیمت تعرفه خرید تضمینی تولید پراکنده گازسوز کمتر از LCoE محاسبه شده است، لذا هر چه سهم خورشید در تولید برق بیشتر شود LCoE کاهش می‌یابد. البته این بدان معنا نیست که هر چه مساحت دیش‌ها بیشتر شود مناسب‌تر است. زیرا مساحت بیشتر دیش‌ها سبب افزایش هزینه اولیه و نگهداری می‌شود.

همان‌گونه که می‌بینیم، در سناریوهای ۷ و ۹ اختلاف بین LCoE و تعرفه الکتریسیته به صفر نزدیک شده است. این بدان معناست که اندکی کاهش در هزینه‌های سیکل و یا اندکی افزایش در تعرفه‌های برق سبب توجیه‌پذیری سیکل مذکور می‌شود. نکته‌ی مهمی که در اینجا ملاحظه می‌شود، بالا بودن LCoE در مواردی است که قیمت گاز بالا است. دلیل این اتفاق این است که به کارگیری سیکل CCHP همیشه منجر به افزایش مصرف گاز می‌شود، این مساله به ویژه در فصل تابستان منجر به افزایش شدید هزینه‌ها می‌شود. زیرا همان‌گونه که در جدول (۳-۵) اشاره شده است COP سیکل تبرید جذبی به

مراتب کمتر از سیکل تبرید تراکمی است. از سوی دیگر به دلیل افزایش دمای محیط در فصل تابستان، بازده میکروتوربین‌ها کاهش پیدا می‌کند. این امر سبب افزایش هزینه‌ی جاری می‌شود. لذا استفاده از سیکل تبرید جذبی چند اثره و یا میکروتوربین‌هایی با نسبت فشار بالاتر ممکن است تا حدودی به کارگیری این سیستم را اقتصادی‌تر کند. که پیشنهاد می‌شود در تحقیقات آتی مورد بررسی قرار گیرد.

۴-۵-۱-۱- مقایسه LCoE تولید همزمان با LCoE فتوولتائیک

یکی از روش‌هایی که می‌توان به سهولت، پی به وضعیت اقتصادی طرح حاضر برد، مقایسه هزینه‌های آن با هزینه سیستم‌های مرسوم تولید الکتریسیته است. یکی از سیستم‌های مرسوم تولید برق از انرژی خورشیدی سیستم فتوولتائیک است. در اینجا هزینه‌ی تولید برق توسط سیکل تولید همزمان با هزینه‌ی تولید برق توسط سیستم فتوولتائیک مقایسه شده است.

عدالتی و همکاران به محاسبه LCoE سیستم‌های فتوولتائیک برای شهرهای مختلف ایران پرداخته‌اند

[۳۷]. مقادیر گزارش شده توسط آنها $0.23 \left(\frac{\$}{kWh} \right)$ برای تهران، $0.2 \left(\frac{\$}{kWh} \right)$ برای یزد و $0.245 \left(\frac{\$}{kWh} \right)$ برای بندرعباس می‌باشد.

در اینجا با مقایسه مقادیر LCoE موجود در جدول (۴-۱) با LCoE گزارش شده توسط مرجع [۵۲]

نکات زیر قابل توجه است:

- سناریوی ۱ : LCoE به دست آمده توسط مطالعه‌ی حاضر کمتر از LCoE فتوولتائیک است. اما از تعرفه صادرات برق ایران در سال ۲۰۱۳ بالاتر است. لذا اگر تعرفه فروش برق سیستم تولید همزمان، معادل تعرفه صادراتی ۲۰۱۳ باشد، توجیه اقتصادی ندارد. اما نسبت به فتوولتائیک ارجح‌تر است.

- سناریوی ۲: LCoE به دست آمده در سناریوی ۲ بسیار پایین‌تر از سناریوی ۱ می‌باشد. علت این اختلاف، تفاوت قیمت‌های گاز در سال ۲۰۱۳ و ۲۰۱۶ است. علی‌رغم کاهش LCoE در سناریوی ۲، اما همچنان از تعرفه برق صادراتی ایران در سال ۲۰۱۶ بالاتر است. اما از LCoE فتوولتائیک کمتر است.

- سناریوهای ۳ تا ۶: در این سناریوها LCoE سیکل تولید همزمان از LCoE فتوولتائیک کمتر و از تعرفه خرید تضمینی برق توسط دولت ایران بالاتر است.

نکته‌ی مهمی که باید در اینجا مورد توجه قرار گیرد این است که LCoE فتوولتائیک برای شهر تهران مقدار ثابت $\left(\frac{\$}{kWh}\right)$ ۰/۲۳ را دارد و در هنگام مقایسه با تمام سناریوهای مطالعه‌ی حاضر، از همین مقدار ثابت استفاده شده است. علت ثابت بودن LCoE فتوولتائیک، مستقل بودن آن از شبکه گاز می‌باشد. لذا از تغییرات قیمت گاز تاثیر نمی‌پذیرد. اما در سیکل تولید همزمان حرارت، برودت و قدرت، LCoE به شدت تحت تاثیر تعرفه گاز می‌باشد.

- سناریوهای ۷ و ۸ و ۱۰: در این سناریوها LCoE سیکل تولید همزمان از LCoE فتوولتائیک و همچنین از تعرفه‌ی خرید تضمینی برق خورشیدی توسط دولت ایران بالاتر است. البته در سناریوهای ۷ تا ۱۰ فرض شده است که بخشی از برق تولیدی، که توسط سوخت فسیلی تولید شده است، با تعرفه‌ی خرید تضمینی برق از نیروگاه‌های تولید پراکنده گازسوز محاسبه می‌شود. اما در سناریوهای ۳ تا ۶ هیچ‌گونه قیدی برای تعیین قیمت فروش برق به شبکه لحاظ نشده است. لذا LCoE محاسبه شده در سناریوهای ۷ تا ۱۰ از LCoE محاسبه شده در سناریوهای ۳ تا ۶ به مراتب بالاتر است.

- سناریوی ۹: توضیحات این سناریو نیز مشابه سناریوهای ۷ و ۸ و ۱۰ می‌باشد، با این تفاوت که در این سناریو علی‌رغم اینکه بخشی از برق تولیدی، با قیمت مصوب دولت به شبکه برق سراسری فروخته می‌شود اما باز هم LCoE آن از LCoE فتوولتائیک کمتر است.

۴-۵-۲- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر یزد

جدول ۴-۲: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر یزد

اختلاف ۵ساله %	اختلاف ۲۰ساله %	تعرفه الکتریسیته	LCoE ۵ ساله	LCoE ۲۰ ساله	A	N	سناریو
۲۵۱	۸۹	۰/۱۲	۰/۴۲۱	۰/۲۳	۱۵۰۰	۵	۱
۱۱۱	۲۵	۰/۰۸	۰/۱۶۹	۰/۱	۰	۳	۲
۳۹۰	۱۳۰	۰/۰۳۱	۰/۱۵۲	۰/۰۷	۰	۳	۳
۸۵۹	۳۲۹	۰/۰۳۱	۰/۲۹۷	۰/۱۳	۱۰۰۰	۳	۴
۲۹۰	۸۵	۰/۰۳۱	۰/۱۲۱	۰/۰۶	۰	۳	۵
۷۸۷	۲۶۶	۰/۰۳۱	۰/۲۷۵	۰/۱۱	۱۰۰۰	۳	۶
۲۳۷	۲۳	۰/۲	۰/۶۷۳	۰/۲۵	۱۰۰۰	۳	۷
۲۹۱	۹۰	۰/۲	۰/۷۸۲	۰/۳۸	۱۵۰۰	۵	۸
۲۱۶	۱۱	۰/۲	۰/۶۳۲	۰/۲۲	۱۰۰۰	۳	۹
۲۷۱	۷۲	۰/۲	۰/۷۴۲	۰/۳۴	۱۵۰۰	۵	۱۰

نوعی تحلیل نتایج محاسبات برای شهر یزد مشابه شهر تهران می‌باشد. از جدول (۴-۲) می‌توان دریافت که در سناریوهای ۱ و ۷ و ۸ و ۹ و ۱۰، LCoE سیکل از LCoE فتوولتائیک (۰,۲) بیشتر و در سایر سناریوها کمتر می‌باشد. همچنین در مقایسه با تعرفه‌ی فروش برق به شبکه‌ی سراسری، در تمام سناریوها بالاتر می‌باشد. لذا در برخی از سناریوها نسبت به فتوولتائیک توجیه داشته اما نسبت به تعرفه فروش به شبکه توجیه ندارد.

۴-۵-۳- نتایج شبیه‌سازی اقتصادی برای شهر بندرعباس

در مورد شهر بندرعباس نیز روش تحلیل مشابه آنچه در مورد تهران و یزد توضیح داده شد می‌باشد. با این تفاوت که به دلیل بالاتر بودن پیک مصرف انرژی ساختمان در فصل تابستان در این شهر، تعداد میکروتوربین و به تبع آن مساحت بهینه دیش‌ها در برخی از سناریوها اندکی افزایش یافته است. نکته

مهمی که در مورد شهر بندرعباس به چشم می‌خورد، کمتر شدن LCoE نسبت به تعرفه خرید تضمینی فعلی در سناریوی ۹ می‌باشد. همچنین LCoE طرح مذکور در تمام سناریوها به غیر از سناریوی ۸ و ۱۰، کمتر از LCoE فتوولتائیک (۰/۲۴۵) می‌باشد.

جدول ۳-۴: نتیجه بررسی اقتصادی پروژه در شهر بندرعباس

سناریو	N	A	LCoE ۲۰ ساله	LCoE ۵ ساله	تعرفه الکتریسیته	اختلاف ۲۰ ساله %	اختلاف ۵ ساله %
۱	۷	۲۰۰۰	۰/۲۱	۰/۳۶۳	۰/۱۲	۷۹	۲۰۳
۲	۵	۰	۰/۰۹	۰/۱۴۸	۰/۰۸	۱۰	۸۵
۳	۵	۰	۰/۰۷	۰/۱۴۶	۰/۰۳۱	۱۱۳	۳۷۱
۴	۷	۲۰۰۰	۰/۱۳	۰/۲۷۹	۰/۰۳۱	۳۰۵	۸۰۰
۵	۵	۰	۰/۰۵	۰/۱۱۲	۰/۰۳۱	۶۶	۲۶۱
۶	۷	۲۰۰۰	۰/۱۱	۰/۲۵۶	۰/۰۳۱	۲۴۱	۷۲۶
۷	۶	۲۰۰۰	۰/۲۲	۰/۶۰۸	۰/۲	۸	۲۰۴
۸	۷	۲۵۰۰	۰/۳۵	۰/۶۸۵	۰/۲	۷۴	۲۴۳
۹	۶	۲۰۰۰	۰/۱۹	۰/۵۶۵	۰/۲	-۴	۱۸۳
۱۰	۷	۲۵۰۰	۰/۳۱	۰/۶۴	۰/۲	۵۶	۲۲۰

با دقت در جداول (۱-۴) تا (۳-۴) مشاهده می‌شود که حالت‌های بهینه اقتصادی در چند ترکیب خاص از تعداد میکروتوربین و مساحت دیش اتفاق می‌افتد. در جدول (۴-۴) می‌توان خلاصه‌ای از این حالت‌ها را به همراه مشخصات فنی آنها مشاهده نمود:

جدول ۴-۴: ترکیب مساحت و تعداد میکروتوربین بهینه

η_{CCHP}	$\eta_{total,micro}$	η_{elec}	A	N	
۰/۵۶	۰/۵۵	۰/۲	۰	۲	تهران
۰/۵۳	۰/۵۵	۰/۲	۰	۳	
۰/۵۴	۰/۵۷	۰/۲	۱۰۰۰	۳	
۰/۵۴	۰/۵۵	۰/۲	۰	۳	یزد
۰/۵۵	۰/۵۷	۰/۲	۱۰۰۰	۳	
۰/۴۹	۰/۵۸	۰/۲	۱۵۰۰	۵	
۰/۵	۰/۵۷	۰/۲۱	۰	۵	بندرعباس
۰/۵۱	۰/۶	۰/۲۱	۲۰۰۰	۶	
۰/۵۱	۰/۶	۰/۲۱	۲۰۰۰	۷	
۰/۵۱	۰/۶	۰/۲۱	۲۵۰۰	۷	

در جدول (۴-۴) منظور از η_{elec} ، $\eta_{tot,micro}$ ، η_{CCHP} به ترتیب؛ بازده الکتریکی

میکروتوربین‌ها، بازده کلی میکروتوربین‌ها و بازده کلی تولید همزمان می‌باشد. N و A نیز به ترتیب؛

تعداد بهینه‌ی میکروتوربین و مساحت بهینه‌ی دیش‌های سهموی است.

۴-۶- برق تولیدی و سوخت مصرفی حالت‌های جدول (۴-۴)

در شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) برق تولیدی و سوخت مصرفی کل، به صورت ماهیانه برای هر یک

از حالت‌های جدول (۴-۴) نشان داده شده است.

نمودار تغییرات سوخت مصرفی از آن جهت اهمیت دارد که می‌توانیم بر اساس آن برنامه‌ریزی

صحیحی در مورد سوخت مصرفی سیکل داشته باشیم. این مساله به ویژه در زمانهای بحران (که ممکن

است مجبور به استفاده از سوخت‌های جایگزین شویم)، و یا در مکانهایی که دسترسی به شبکه گاز

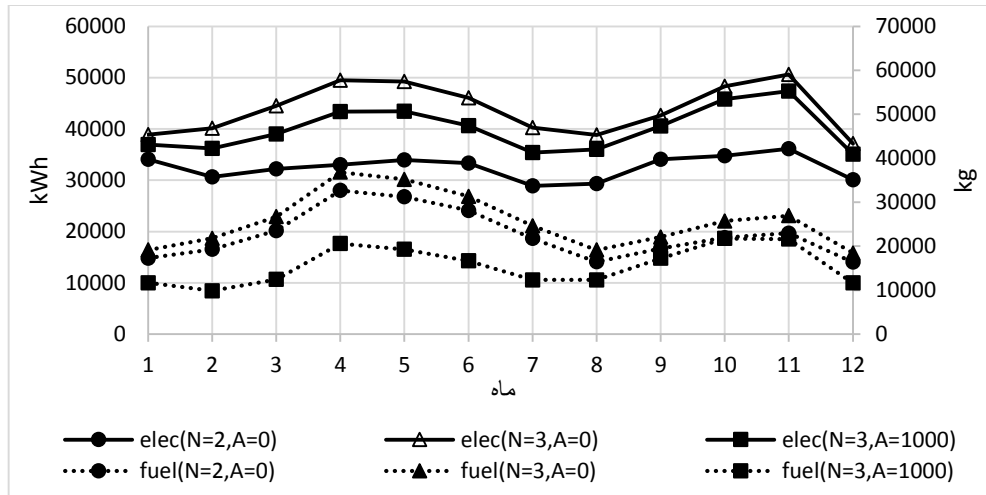
سراسری وجود ندارد حائز اهمیت می‌باشد.

نمودار تغییرات برق تولیدی نیز از جهات زیر حائز اهمیت می‌باشد:

۱- درآمد ماهیانه سیکل را (از محل فروش برق) مشخص می‌کند.

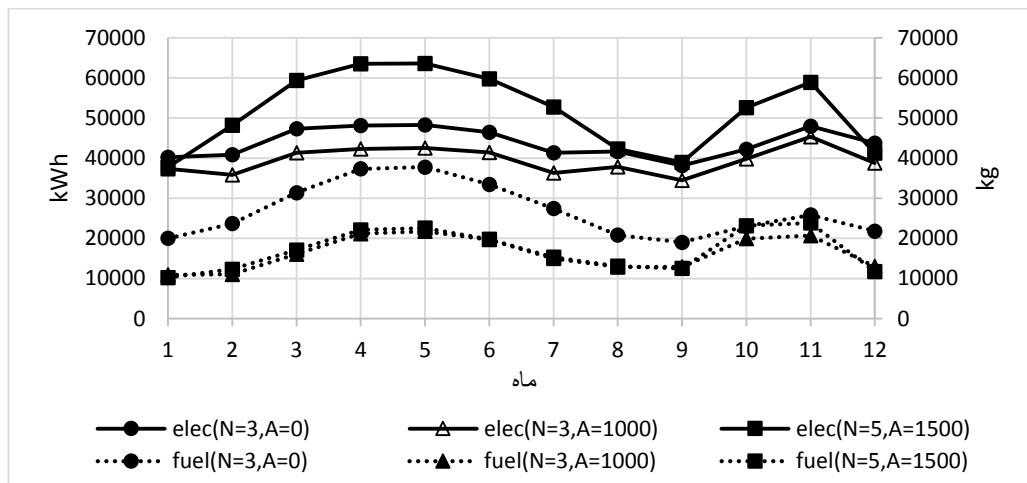
۲- امکان برنامه‌ریزی مناسب برای عملیات تعمیر و نگهداری را با کمترین هزینه‌ی اقتصادی فراهم می‌آورد.

۳- به برنامه‌ریزان شبکه برق سراسری برای کنترل بهتر شبکه کمک می‌کند.



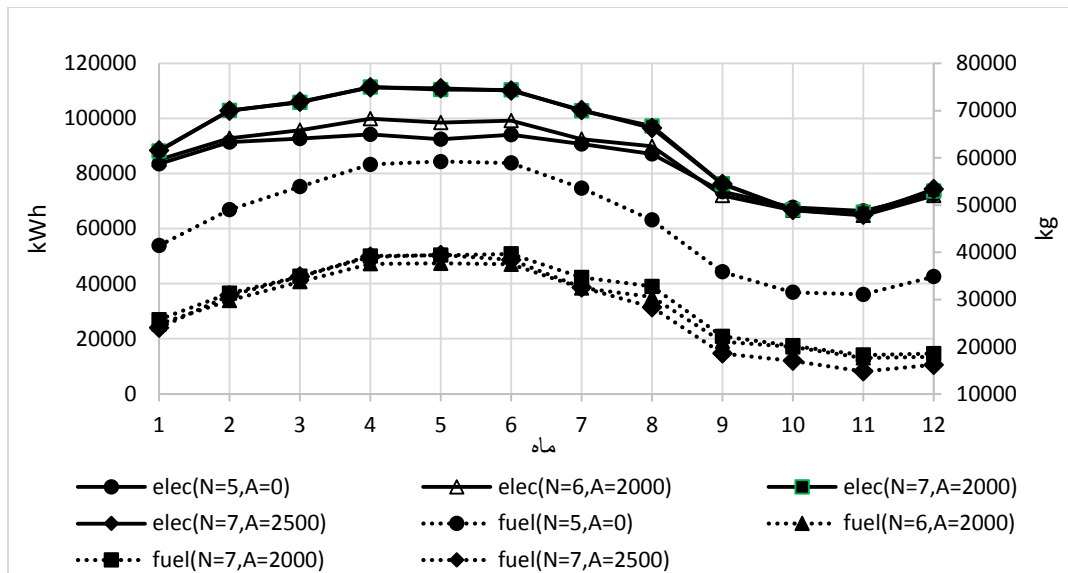
شکل ۴-۱۰: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر تهران

از شکل (۴-۱۰) مشخص است که بیشترین میزان برق تولیدی برای شهر تهران مربوط به ماههای خرداد تا شهریور و آذر تا بهمن می‌باشد. علت این امر، نیاز بیشتر ساختمان به حرارت و در نتیجه کار بیشتر میکروتوربین‌ها در این ماهها می‌باشد.



شکل ۴-۱۱: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر یزد

از شکل (۴-۱۱) نیز پیداست که بیشترین برق تولیدی میکروتوربین‌های شهر یزد مربوط به ماههای خرداد تا شهریور و بهمن و اسفند می‌باشد. کمترین برق تولیدی نی زمربوط به ماههای فروردین، آذر و اسفند می‌باشد. علت این مساله آن است که در این ماهها حداقل نیاز به حرارت وجود دارد.



شکل ۴-۱۲: نمودار برق تولیدی و سوخت مصرفی ماهیانه برای شهر بندرعباس

از شکل (۴-۱۲) پیداست که بیشترین برق تولیدی شهر بندرعباس مربوط به ماههای اردیبهشت تا آبان می‌باشد. علت این مساله این است که این ۷ ماه جزو گرم‌ترین ماههای سال و جزو پر مصرف‌ترین ماهها در بندرعباس می‌باشد.

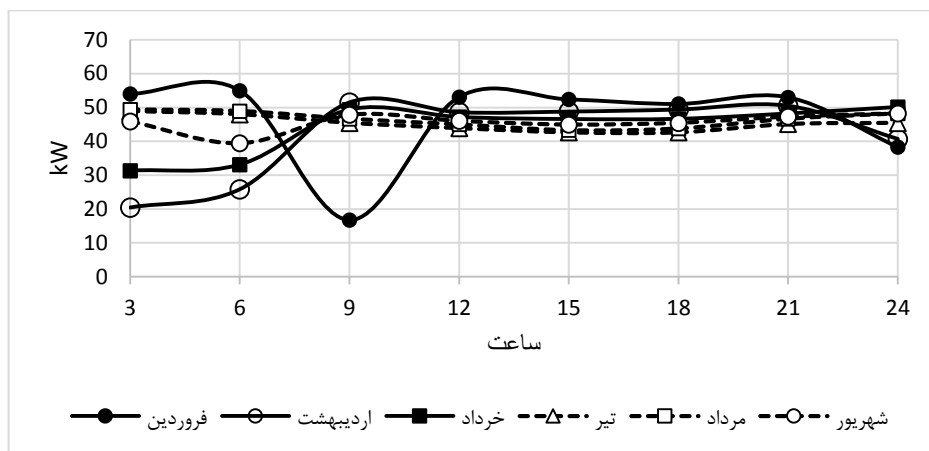
از شکل‌های (۴-۱۰) تا (۴-۱۲) مشخص است که روند تغییرات سوخت مصرفی کل با برق تولیدی رابطه‌ی مستقیم دارد، اما از یک نسبت ثابت تبعیت نمی‌کند. دلیل این امر آن است که بخشی از سوخت مصرفی مربوط به بویلر کمکی می‌باشد.

۴-۷- نمودار ساعتی برق فروخته شده به شبکه سراسری

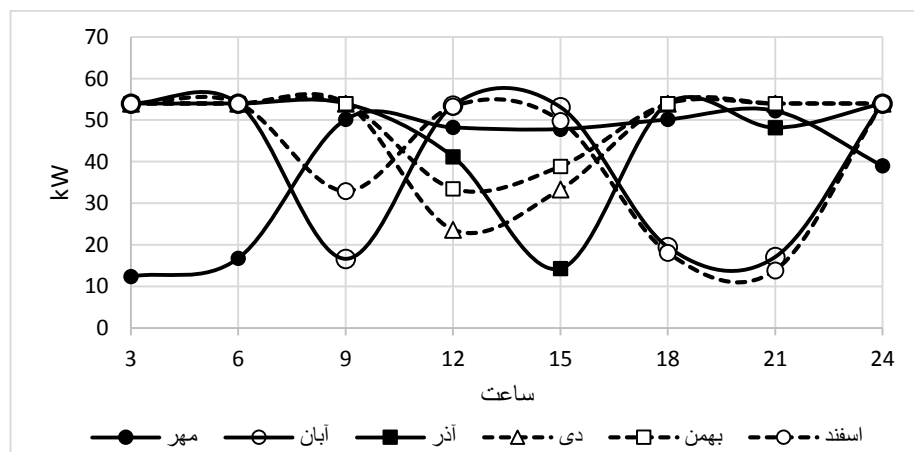
در شکل‌های زیر نمودار ساعتی برق فروخته شده به شبکه‌ی سراسری در ماههای مختلف سال نشان داده شده است. این نمودارها می‌تواند به برنامه‌ریزان شبکه‌ی برق سراسری (دیسپاچینگ)، کمک نماید تا با در نظر گرفتن پروفیل برق تولیدی توسط سیستم حاضر، برنامه‌ریزی بهتری برای تصمیم‌گیری در

مورد توسعه این سیستم‌ها اتخاذ کنند. همچنین این نمودارها می‌تواند الگوی تولید برق در نیروگاه‌ها و همچنین الگوی تعرفه خرید تضمینی برق از تولید پراکنده مذکور را مشخص نماید. همچنین این نمودارها به برنامه‌ریزی صحیح تعمیرات کوتاه مدت کمک شایانی می‌کند. از سوی دیگر از طریق بررسی این نمودارها می‌توان به میزان همخوانی برق تولیدی توسط این سیستم‌ها با نیاز شبکه سراسری پی برد.

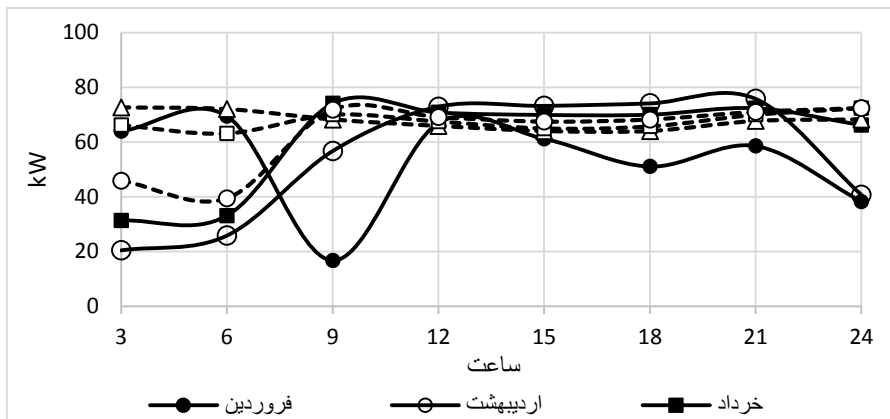
۴-۷-۱- نمودار ساعتی برق تولیدی تهران



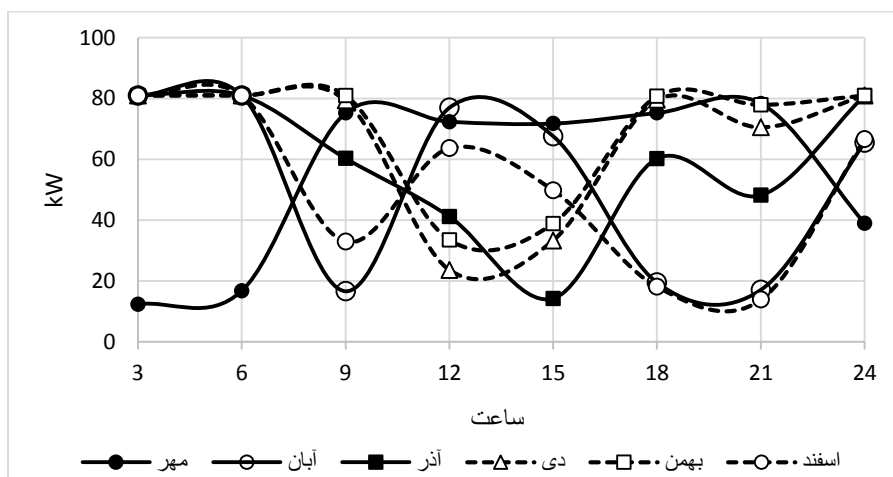
شکل ۴-۱۳: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران (N=2, A=0)



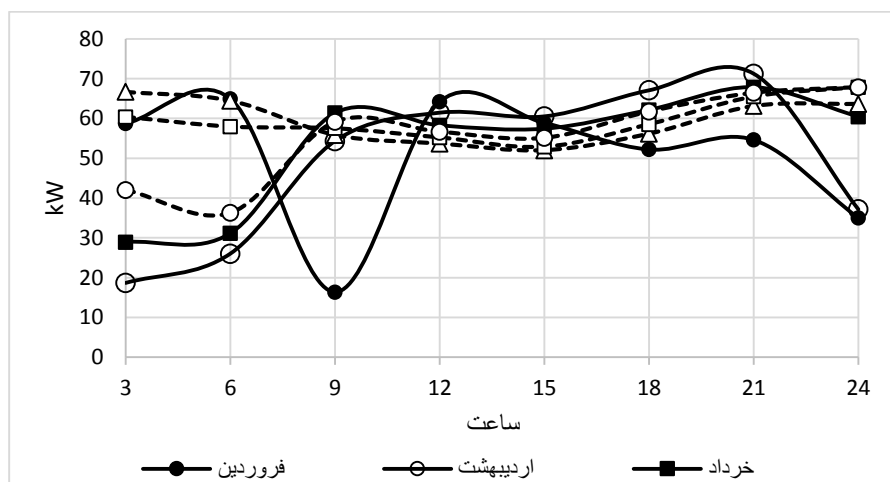
شکل ۴-۱۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران (N=2, A=0)



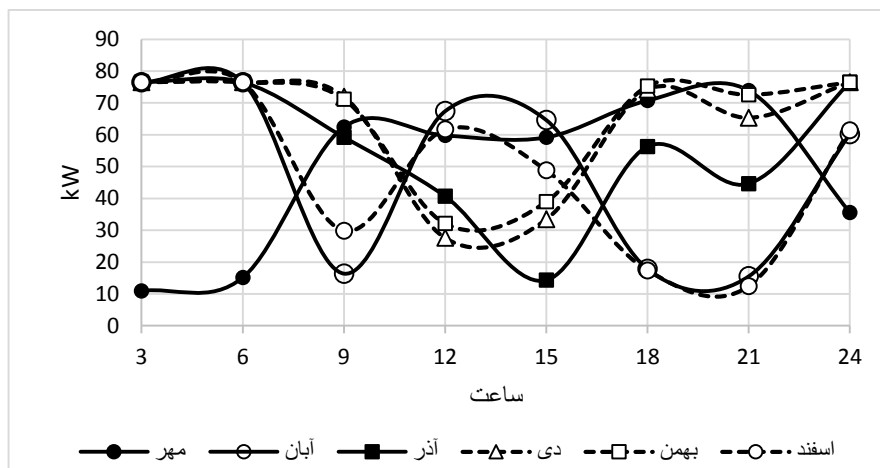
شکل ۴-۱۵: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران (N=3, A=0)



شکل ۴-۱۶: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران (N=3, A=0)



شکل ۴-۱۷: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، تهران (N=3, A=1000)



شکل ۴-۱۸: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، تهران (N=3, A=1000)

از مقایسه شکل‌های (۴-۱۳) تا (۴-۱۸)، نتایج زیر برای شهر تهران حاصل می‌شود:

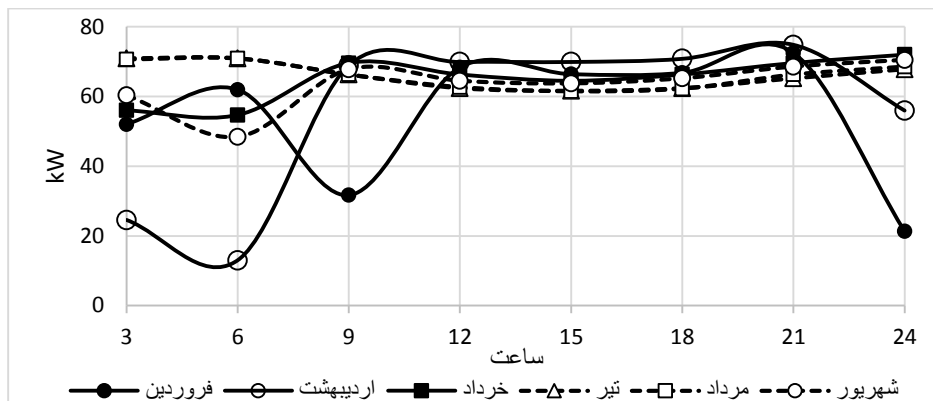
۱- در شش ماهه‌ی اول سال از ساعت ۱۲ تا ۲۱ برق تولیدی هر ماه تقریباً ثابت بوده و نوسان اندکی دارد. دلیل این امر آن است که در این ساعات نوسان دمای محیط کم می‌باشد.

۲- در شش ماهه‌ی اول سال از ساعت ۱۲ تا ۲۱ برق تولیدی ماههای مختلف تقریباً برابر می‌باشد.

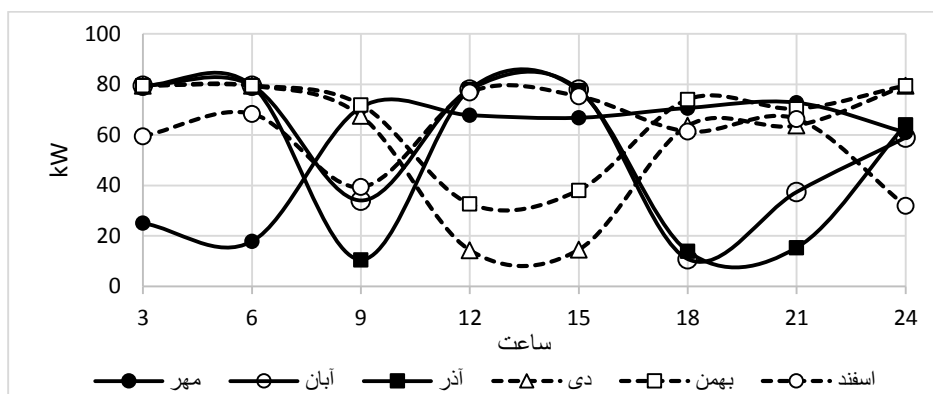
۳- در شش ماهه‌ی دوم سال برق تولیدی به شدت دارای نوسان می‌باشد.

علت اصلی نوسان تولید برق در نیمه‌ی دوم سال، نوسان زیاد در دمای هوای محیط، و به تبع آن نوسان زیاد در بار حرارتی ساختمان می‌باشد. به عنوان مثال در ساعت ۹ و ۱۸ آبان، کمترین میزان نیاز حرارتی وجود دارد. این امر بدان دلیل است که در این ساعات دمای هوای محیط به دمای آسایش (۲۱ درجه سانتی‌گراد) بسیار نزدیک است. اما در همین ماه در ساعت ۳ به دلیل برودت هوا و در ساعت ۱۲ به دلیل گرمای هوا، نیاز نسبتاً زیادی به تولید حرارت و به تبع آن عملکرد میکروتوربین‌ها احساس می‌شود.

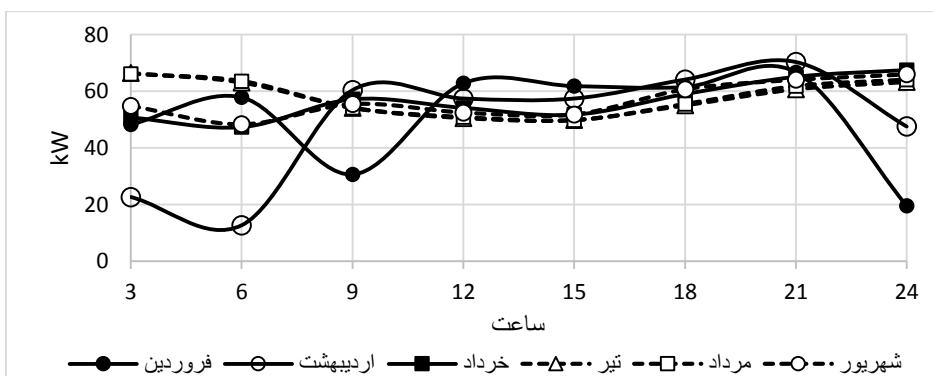
۴-۷-۲- نمودار ساعتی برق تولیدی یزد



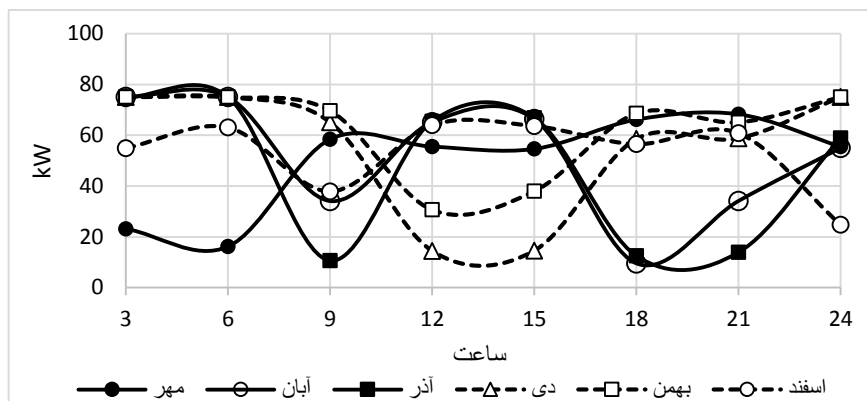
شکل ۴-۱۹: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد (N=3, A=0)



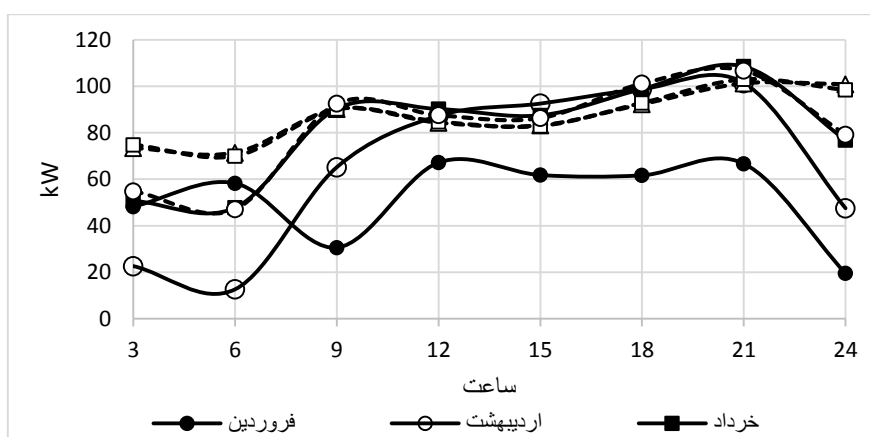
شکل ۴-۲۰: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد (N=3, A=0)



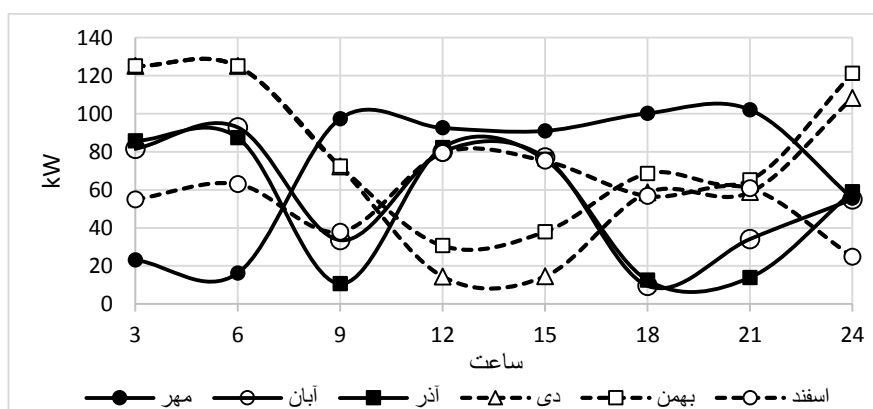
شکل ۴-۲۱: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد (N=3, A=1000)



شکل ۴-۲۲: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد (N=3, A=1000)



شکل ۴-۲۳: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، یزد (N=5, A=1500)



شکل ۴-۲۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، یزد (N=5, A=1500)

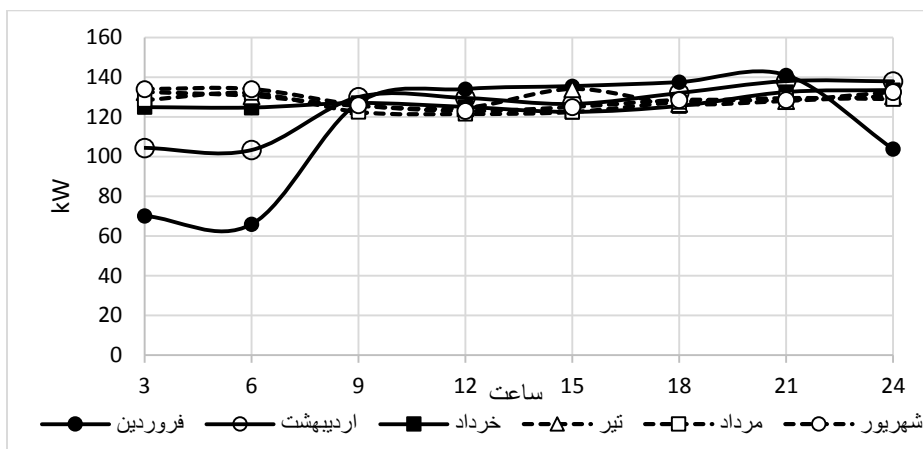
از بررسی شکل‌های (۱۹-۴) تا (۲۴-۴) که مربوط به شهر یزد می‌باشد نتایج مشابه نتایج شهر

تهران به شرح زیر به دست می‌آید:

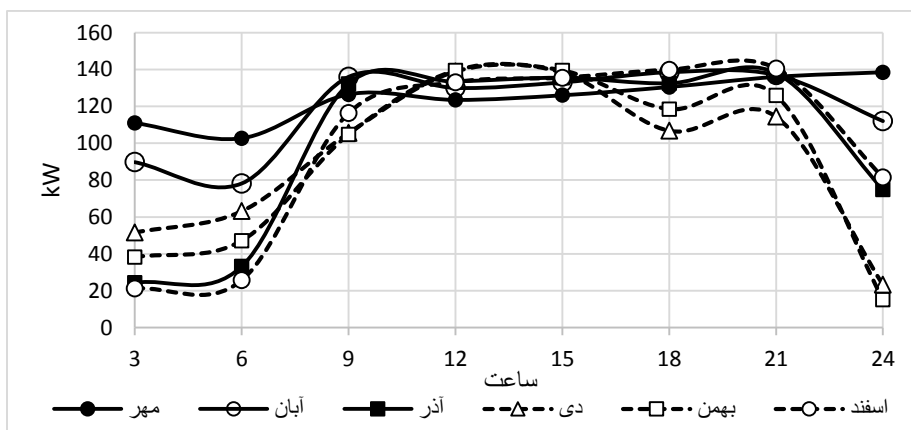
۱- در شش ماهه‌ی اول سال از ساعت ۱۲ تا ۲۱ دارای نوسان بسیار کمی بوده و میکروتوربین‌ها تقریباً با حداکثر ظرفیت خود کار می‌کنند.

۲- در شش ماهه‌ی دوم سال، نوسان زیاد می‌باشد که دلیل آن تغییرات زیاد دمای محیط می‌باشد.

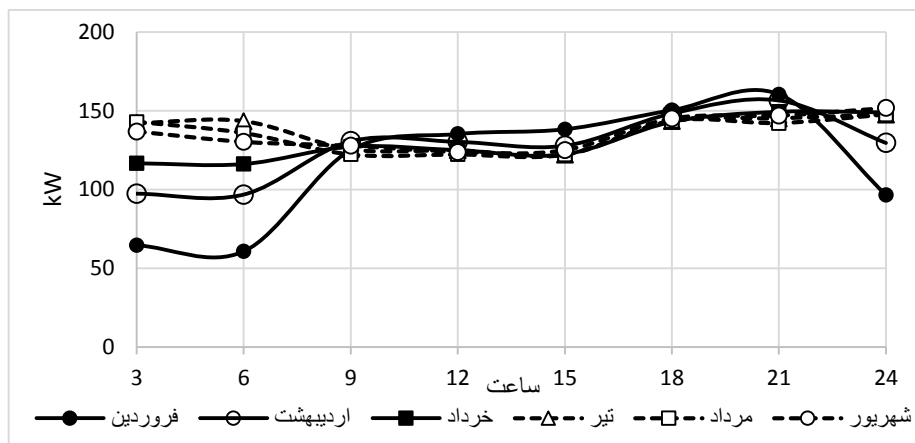
۳-۷-۴- نمودار ساعتی برق تولیدی بندرعباس



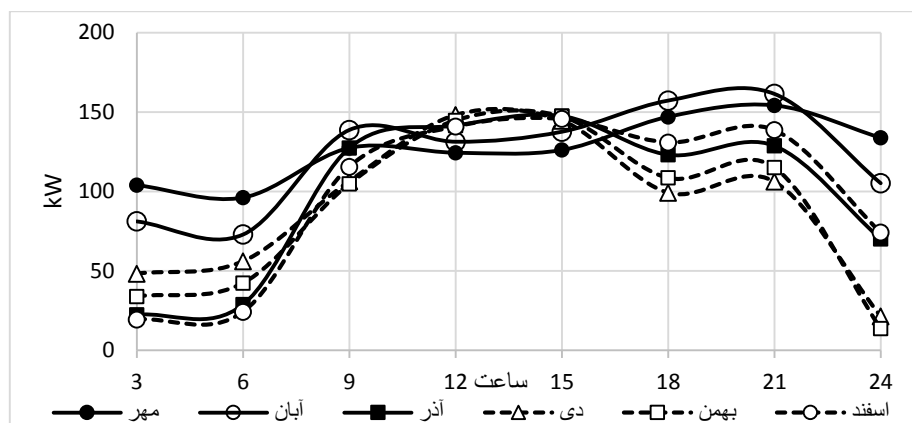
شکل ۲۵-۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس (N=5, A=0)



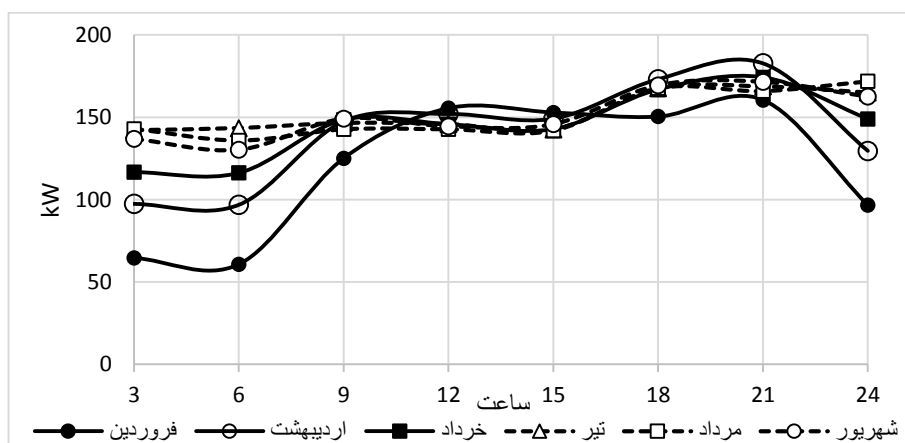
شکل ۲۶-۴: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس (N=5, A=0)



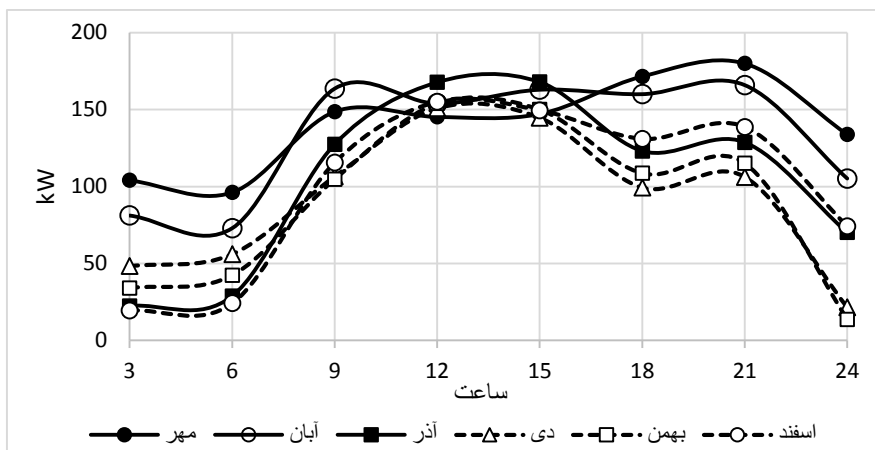
شکل ۴-۲۷: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس (N=6, A=2000)



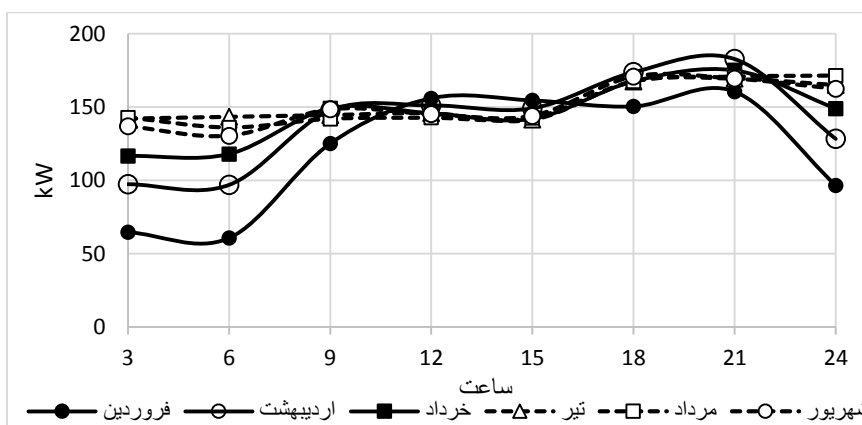
شکل ۴-۲۸: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس (N=6, A=2000)



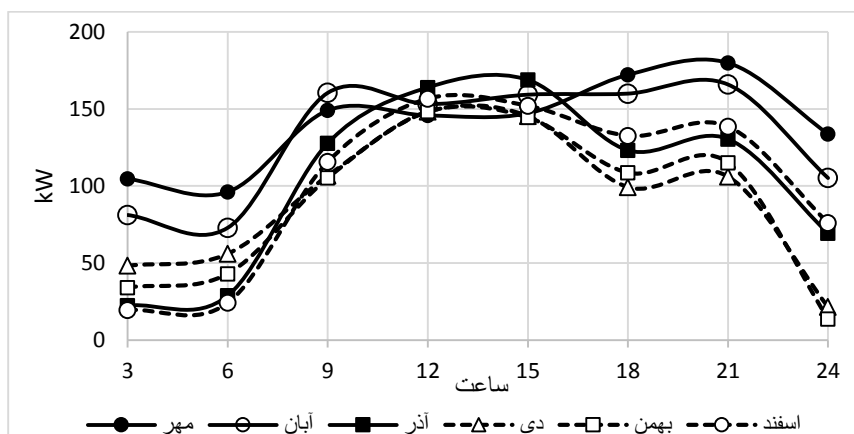
شکل ۴-۲۹: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس (N=7, A=2000)



شکل ۴-۳۰: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس (N=7, A=2000)



شکل ۴-۳۱: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه اول سال، بندرعباس (N=7, A=2500)



شکل ۴-۳۲: نمودار ساعتی برق تولیدی برای شش ماهه دوم سال، بندرعباس (N=7, A=2500)

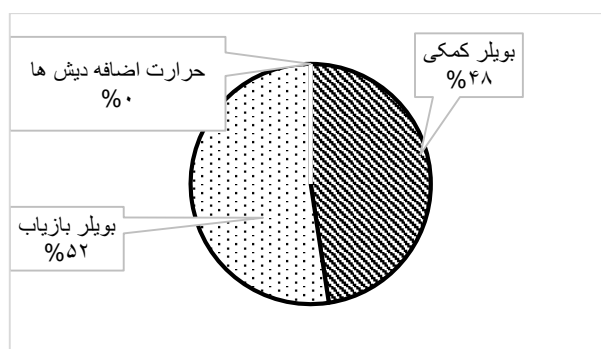
مقایسه شکل های (۴-۲۵) تا (۴-۳۲) که مربوط به شهر بندرعباس می باشد، با شکل های (۴-۱۳) تا (۴-۲۴) که مربوط به شهر یزد و تهران می باشد، نشان دهنده آن است که برق تولیدی در شهر

بندرعباس دارای پایداری و ثبات بیشتری می‌باشد. دلیل این مساله تغییرات کمتر دما در طول شبانه روز در شهر بندرعباس نسبت به یزد و تهران می‌باشد. پایداری دما سبب می‌شود تا نیاز به حرارت و به دنبال آن نیاز به کار میکروتوربین‌ها تقریباً ثابت بماند.

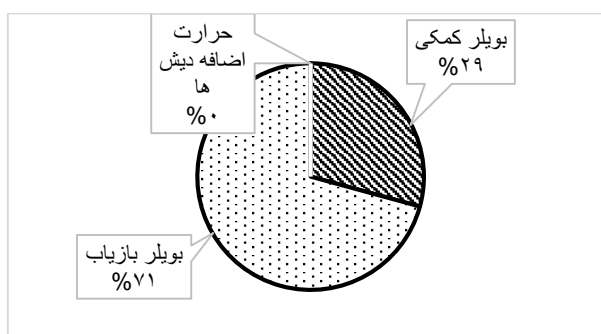
۴-۸- سهم هر کدام از اجزا در تامین حرارت سالانه مورد نیاز ساختمان

در شکل‌های (۴-۳۳) تا (۴-۴۲) سهم هر یک از اجزایی که حرارت مصرفی ساختمان را تولید می‌نمایند مشخص شده است.

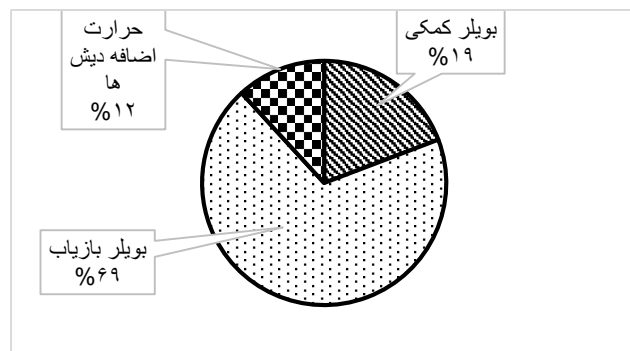
اهمیت این نمودارها از آن جهت است که میزان موفقیت سیستم تولید همزمان را به وضوح نشان می‌دهد. بدیهی است که هرچه سهم بویلر کمکی نسبت به دو جزء دیگر کمتر باشد، نشان دهنده‌ی کارایی بهتر و طراحی بهینه‌تر سیکل تولید همزمان می‌باشد.



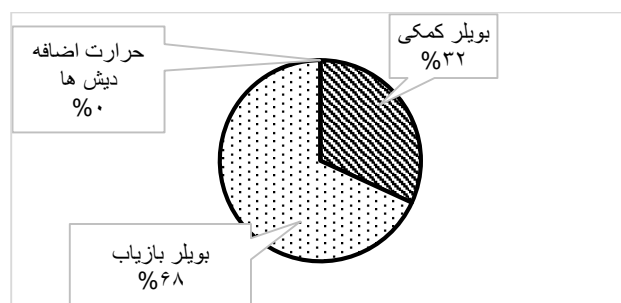
شکل ۴-۳۳: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران (N=2, A=0)



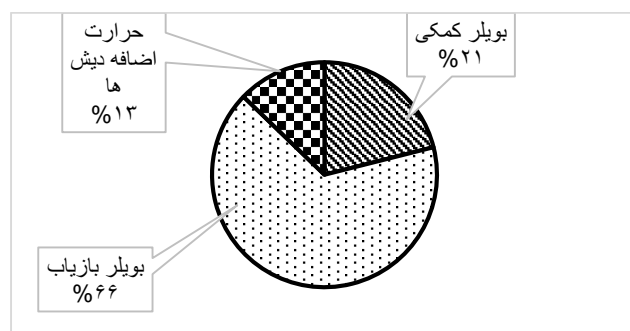
شکل ۴-۳۴: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران (N=3, A=0)



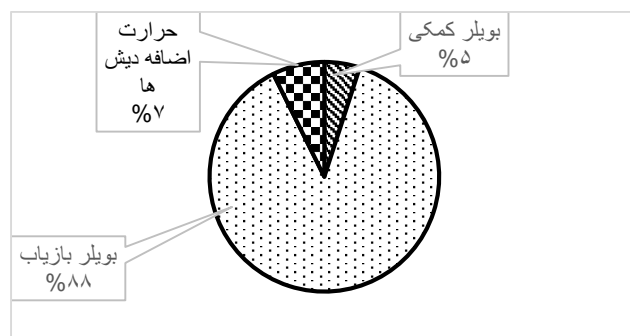
شکل ۴-۳۵: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، تهران (N=3, A=1000)



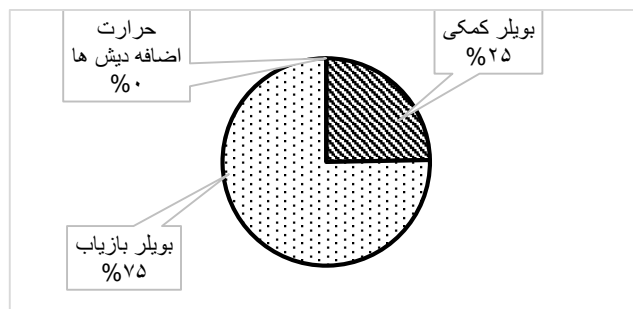
شکل ۴-۳۶: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد (N=3, A=0)



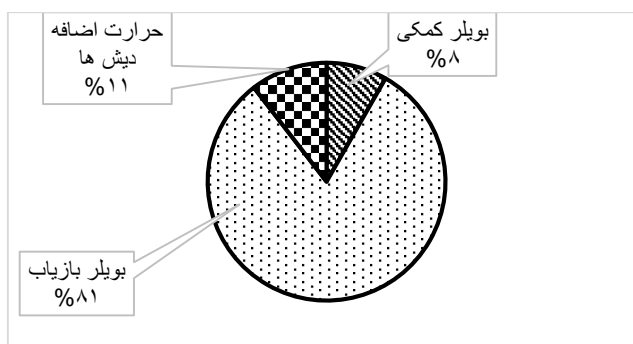
شکل ۴-۳۷: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد (N=3, A=1000)



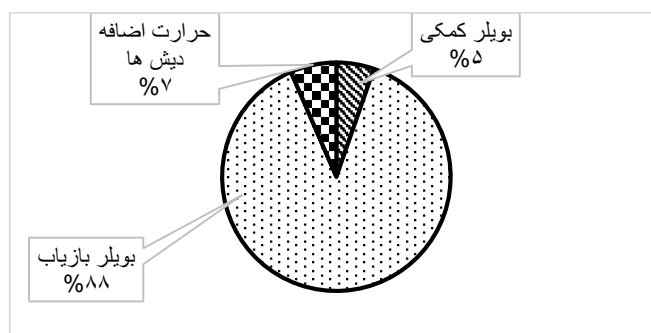
شکل ۴-۳۸: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، یزد (N=5, A=1500)



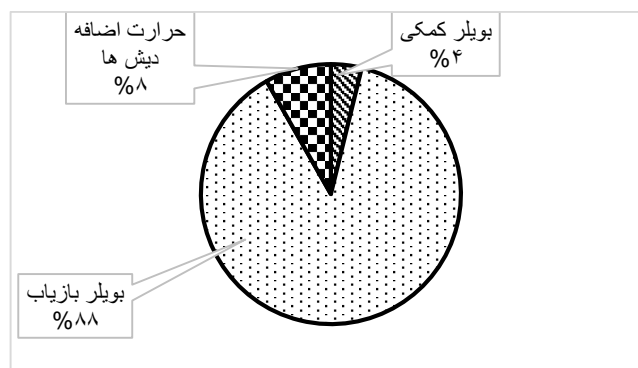
شکل ۴-۳۹: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=5, A=0)



شکل ۴-۴۰: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=6, A=2000)



شکل ۴-۴۱: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=7, A=2000)



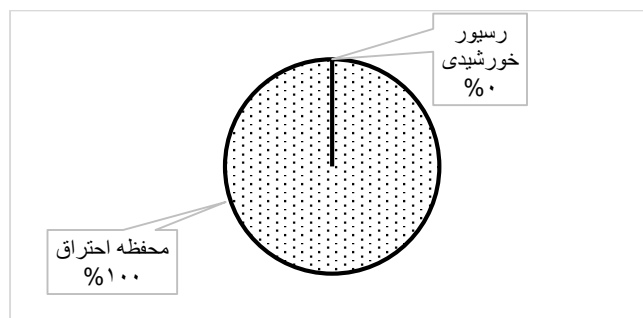
شکل ۴-۴۲: سهم تجهیزات در تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، بندرعباس (N=7, A=2500)

مقایسه نمودارهای (۴-۳۳) تا (۴-۴۲) نشان دهنده‌ی آن است که سهم بویلر کمکی از تامین حرارت مورد نیاز ساختمان، به طور متوسط، کمتر از ۰.۲۵٪ می‌باشد. این امر نشان دهنده‌ی آن است که ۷۵٪ از کل حرارت مورد نیاز، توسط بویلر بازیاب و همچنین حرارت مازاد بر نیاز دیش‌های سهموی تامین می‌شود. و از عملکرد مطلوب سیکل تولید همزمان حکایت دارد.

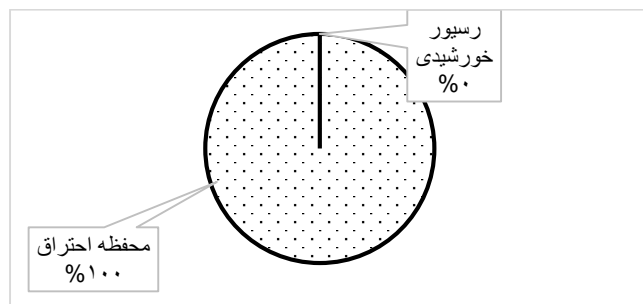
۴-۹- سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد

نیاز میکروتوربین

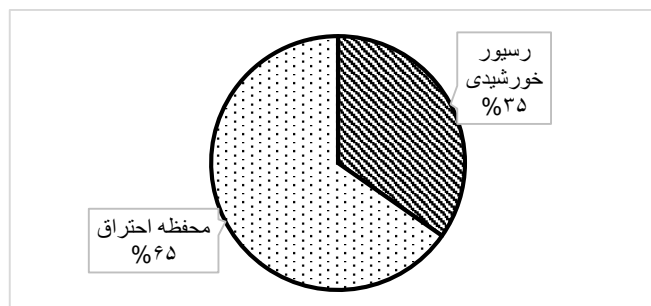
بررسی سهم این دو تجهیز در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، از آن جهت اهمیت دارد که مشخص میکند که تا چه حد سیکل مذکور، انتظارات را در زمینه‌ی توسعه‌ی استفاده از انرژی خورشیدی برآورده است. از سوی دیگر نشان می‌دهد که با قطع شدن یکی از منابع انرژی میکروتوربین (انرژی خورشیدی و سوخت فسیلی) تا چه حد می‌توان به عملکرد بدون وقفه‌ی میکروتوربین (تنها با یک حامل انرژی) خوشبین بود.



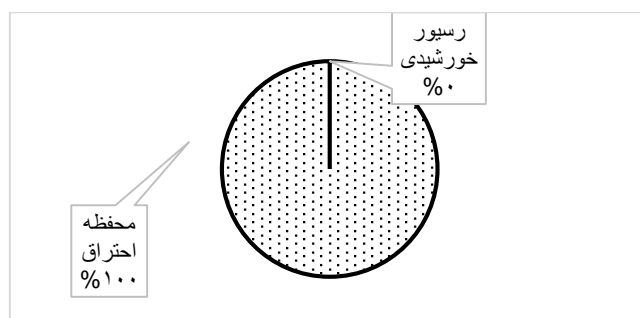
شکل ۴-۴۳: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=2, A=0)



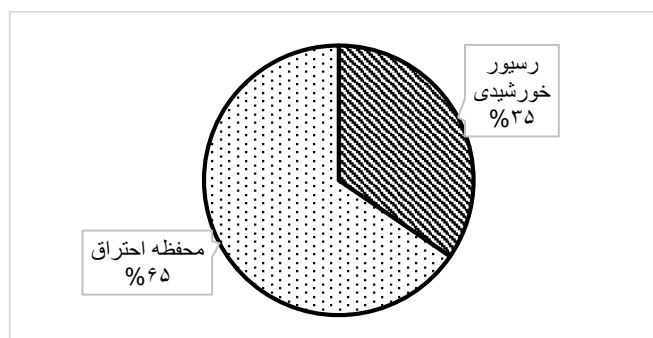
شکل ۴-۴۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=3, A=0)



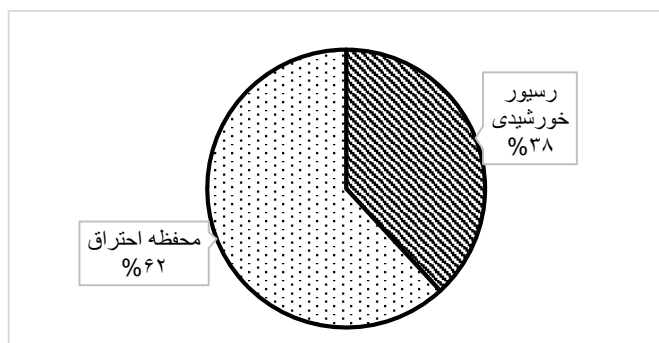
شکل ۴-۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، تهران (N=3, A=1000)



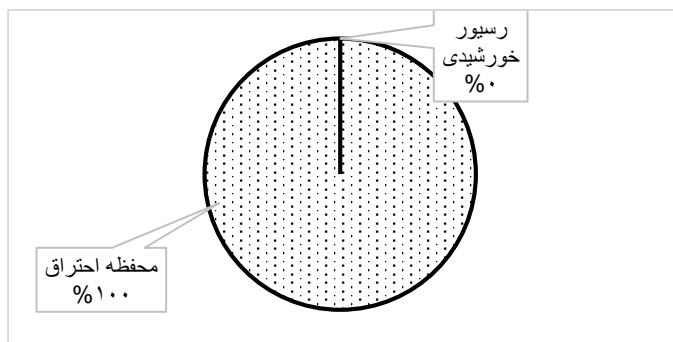
شکل ۴-۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=3, A=0)



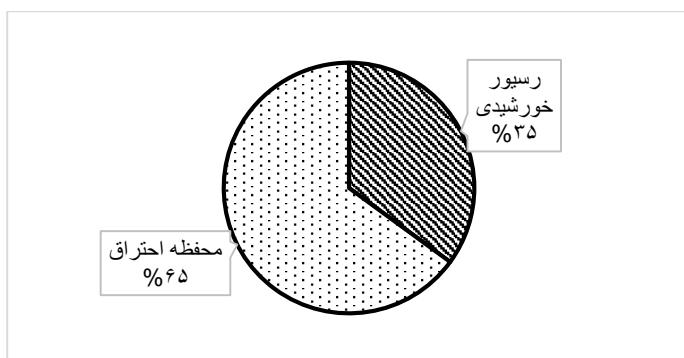
شکل ۴-۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=3, A=1000)



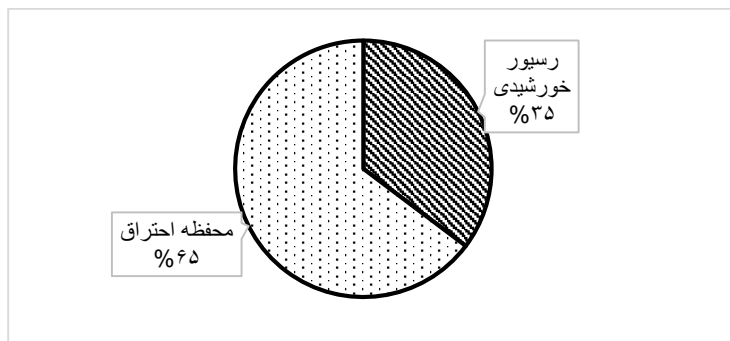
شکل ۴-۴: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، یزد (N=5, A=1500)



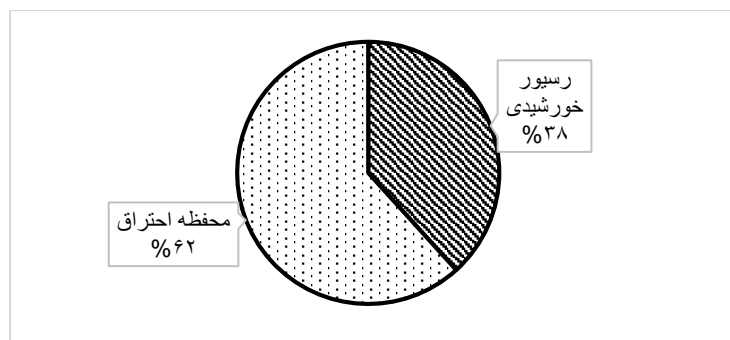
شکل ۴-۴۹: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=5, A=0)



شکل ۴-۵۰: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=6, A=2000)



شکل ۴-۵۱: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=7, A=2000)



شکل ۴-۵۲: سهم رسیور خورشیدی و محفظه احتراق در تامین حرارت مورد نیاز میکروتوربین، بندرعباس (N=7, A=2500)

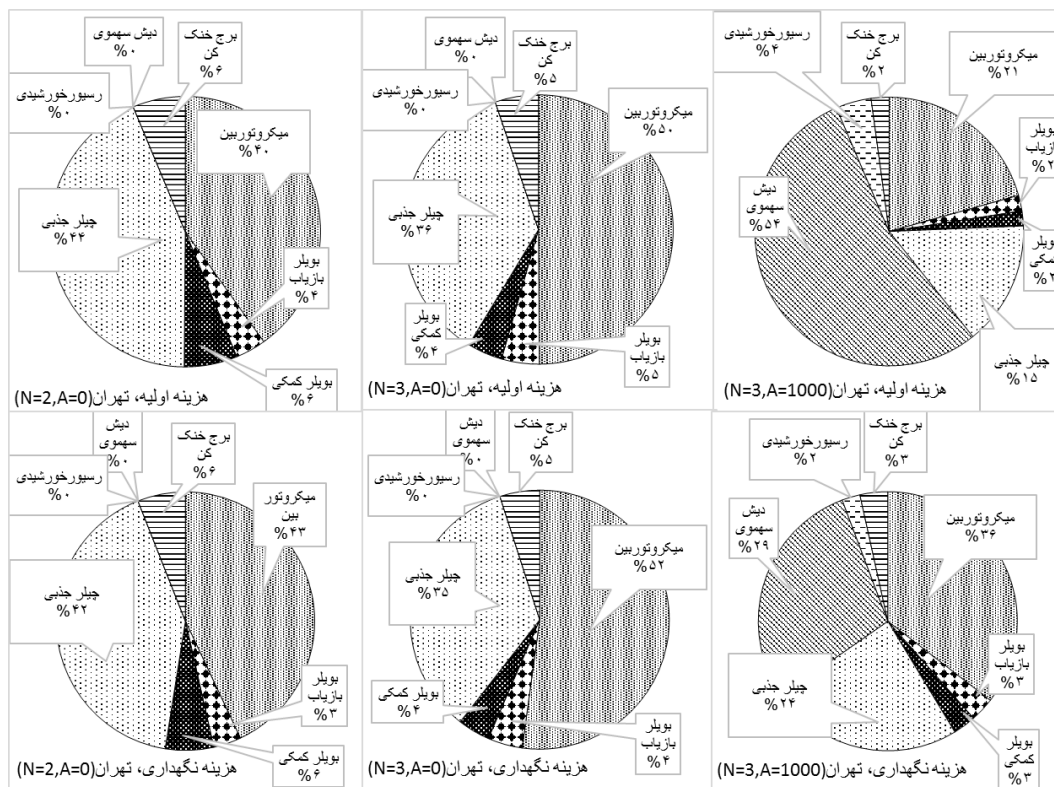
بررسی نمودارهای (۴-۴۳) تا (۴-۵۲) نشان دهنده‌ی آن است که به طور متوسط حدود ۳۰٪ از انرژی سالانه مورد نیاز میکروتوربین‌ها توسط خورشید، و ۷۰٪ توسط سوخت فسیلی تامین می‌شود. لذا می‌توان انتظار داشت که در صورتی که در یک بازه‌ی زمانی بلندمدت (مثلاً چند ماه) سوخت فسیلی در اختیار میکروتوربین‌ها نباشد، میکروتوربین‌ها فقط قادر به تولید ۳۰٪ از برق و حرارت (نسبت به حالت معمول) خواهند بود.

نکته‌ی مهمی که در اینجا باید مورد اشاره قرار گیرد این است که در برخی از نمودارها سهم رسیور خورشیدی برابر صفر می‌باشد. علت این امر آن است که در آن نمودار مساحت دیش‌های سهموی معادل صفر بوده است. و میکروتوربین‌ها فقط از سوخت فسیلی استفاده کرده‌اند.

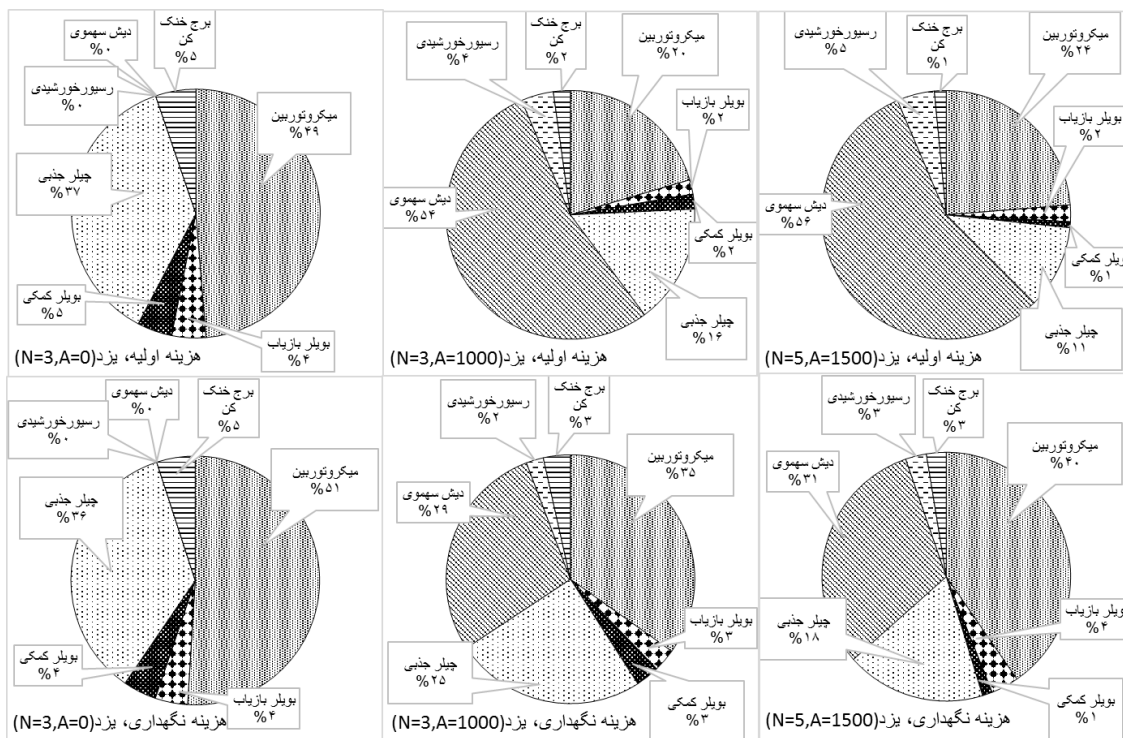
۴-۱۰- سهم هر یک از تجهیزات از هزینه‌ی اولیه و هزینه‌ی نگهداری

سالانه

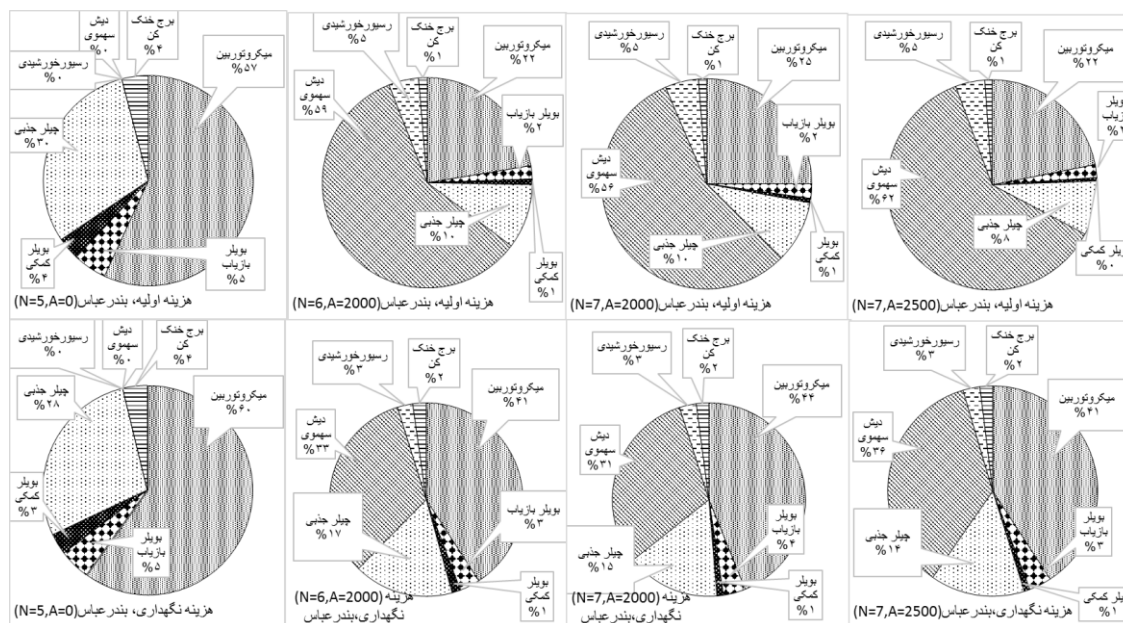
هزینه‌ی اولیه‌ی بالای اجرای سیستم مورد بررسی، یکی از موانع اصلی توسعه این تکنولوژی می‌باشد. لذا محاسبه‌ی سهم هر یک از تجهیزات در این هزینه می‌تواند راهنمای محققین و سیاستگذاران برای کاهش هزینه‌ها باشد. در شکل‌های (۴-۵۳) تا (۴-۵۵) سهم هر کدام از تجهیزات اصلی از هزینه‌ی اولیه و هزینه‌ی تعمیر و نگهداری نشان داده شده است. هزینه‌ها فقط برای ترکیبات موجود در جدول (۴-۴) ارائه شده است.



شکل ۴-۵۳: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سالیانه (تهران)



شکل ۴-۵: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سالیانه (یزد)



شکل ۴-۵: سهم هر یک از تجهیزات اصلی از هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه و تعمیر و نگهداری سالیانه (بندرعباس)

همان‌گونه که از شکل‌های (۴-۵۳) تا (۴-۵۵) پیداست؛ حدود ۹۰٪ هزینه اولیه و هزینه تعمیر و نگهداری مربوط به سه تجهیز گران‌قیمت یعنی دیش‌های سهموی، میکروتوربین‌ها و چیلر جذبی می‌باشد. این در حالی است که بویلر کمکی، بویلر بازیاب، رسیور خورشیدی و برج خنک‌کننده تنها ۱۰٪

سهم هزینه‌ها را به خود اختصاص داده‌اند. این مساله نشان‌دهنده‌ی آن است که هر پیشرفتی در جهت کاهش هزینه و یا افزایش بهره‌وری تجهیزات مذکور می‌تواند تاثیر زیادی بر روی توجیه اقتصادی طرح مورد مطالعه داشته باشد.

۴-۱۱- نتایج شبیه‌سازی‌های اقتصادی در حالت دارای مخزن ذخیره

حرارتی

برای انجام شبیه‌سازی در حالت دارای مخزن ذخیره‌ی حرارتی نیز مشابه حالت فاقد مخزن ذخیره عمل شده است. تنها تفاوت حالت دارای مخزن، با حالت فاقد مخزن در میزان سوخت مصرفی بویلر کمکی می‌باشد.

در حالت فاقد مخزن ذخیره حرارتی؛ حرارت تولیدی دیش‌های سهموی ابتدا به مصرف رسیور خورشیدی رسیده و مقدار مازاد آن به بویلر کمکی هدایت می‌شود تا به جای مصرف گاز در بویلر از آن استفاده شود. اما اگر حرارت تولیدی دیش‌ها از حرارت مورد نیاز رسیور و بویلر کمکی بیشتر باشد، مازاد حرارت دیش‌ها به اتمسفر تخلیه می‌شود.

در حالت دارای مخزن ذخیره حرارتی؛ حرارت تولیدی دیش‌های سهموی ابتدا به مصرف رسیور خورشیدی رسیده و مقدار مازاد آن به بویلر کمکی هدایت می‌شود تا به جای مصرف گاز در بویلر از آن استفاده شود. اما اگر حرارت تولیدی دیش‌ها از حرارت مورد نیاز رسیور و بویلر کمکی بیشتر باشد، مازاد حرارت دیش‌ها به جای تخلیه به اتمسفر به مخزن ذخیره هدایت می‌شود.

نحوه‌ی تخلیه مخزن؛ به این صورت است که در ساعاتی که نیاز به کار بویلر کمکی باشد، حرارت مخزن ذخیره، جایگزین بویلر کمکی شده و از این طریق در مصرف گاز بویلر کمکی صرفه جویی می‌شود. مجدداً یادآور می‌شود که به کارگیری مخزن ذخیره حرارتی هیچ تاثیری بر عملکرد میکروتوربین‌ها ندارد.

جدول ۴-۵: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر تهران

سناریو	N	A	Q	LCoE ۲۰ ساله	LCoE ۵ ساله	تعارف الکتریسیته	اختلاف ۲۰ ساله %	اختلاف ۵ ساله %
۱	۱	۱۰۰۰	۳	۰/۱۸۷	۰/۵	۰/۱۲	۵۵	۳۱۷
۲	۳	۰	۰	۰/۰۹۷۵	۰/۱۶۵	۰/۰۸	۲۲	۱۰۷
۳	۳	۰	۰	۰/۰۶۹	۰/۱۴۷	۰/۰۳۱	۱۲۲	۳۷۴
۴	۲	۱۰۰۰	۳	۰/۱۱۳	۰/۳۲۱	۰/۰۳۱	۲۶۵	۹۳۵
۵	۲	۰	۰	۰/۰۵۵	۰/۱۱۴	۰/۰۳۱	۷۷	۲۶۸
۶	۲	۱۰۰۰	۳	۰/۰۹۴	۰/۳۰۱	۰/۰۳۱	۲۰۳	۸۷۱
۷	۲	۱۰۰۰	۲	۰/۲۳	۰/۷	۰/۲	۱۵	۲۵۰
۸	۱	۱۰۰۰	۳	۰/۲۹۸	۰/۹۴۴	۰/۲	۴۹	۳۷۲
۹	۳	۱۰۰۰	۱	۰/۲۱۱	۰/۶۱۸	۰/۲	۵	۲۰۹
۱۰	۱	۱۰۰۰	۳	۰/۲۶	۰/۹۱	۰/۲	۳۰	۳۵۵

جدول ۴-۶: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر یزد

سناریو	N	A	Q	LCoE ۲۰ ساله	LCoE ۵ ساله	تعارف الکتریسیته	اختلاف ۲۰ ساله %	اختلاف ۵ ساله %
۱	۳	۱۵۰۰	۳	۰/۲۱۳	۰/۴۳۱	۰/۱۲	۷۷	۲۵۹
۲	۲	۰	۰	۰/۱۰۲	۰/۱۷۱	۰/۰۸	۲۷	۱۱۴
۳	۳	۰	۰	۰/۰۷۱	۰/۱۵۲	۰/۰۳۱	۱۳۰	۳۹۰
۴	۳	۱۵۰۰	۳	۰/۱۲۵	۰/۳۵	۰/۰۳۱	۳۰۳	۱۰۲۹
۵	۳	۰	۰	۰/۰۵۷	۰/۱۲۱	۰/۰۳۱	۸۴	۲۹۰
۶	۲	۱۰۰۰	۳	۰/۱۰۸	۰/۳۱۸	۰/۰۳۱	۲۴۸	۹۲۶
۷	۳	۱۰۰۰	۱	۰/۲۴۲	۰/۶۷۷	۰/۲	۲۱	۲۳۹
۸	۳	۱۵۰۰	۳	۰/۳۵	۰/۸۱۵	۰/۲	۷۵	۳۰۸
۹	۳	۱۰۰۰	۱	۰/۲۱۸	۰/۶۳۶	۰/۲	۹	۲۱۸
۱۰	۳	۱۵۰۰	۳	۰/۳۱۵	۰/۷۸۱	۰/۲	۵۷	۲۹۱

جدول ۴-۷: نتایج بررسی پروژه در حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر بندرعباس

اختلاف ۵ ساله ٪	اختلاف ۲۰ ساله ٪	تعرفه الکتریسیته	LCoE ۵ ساله	LCoE ۲۰ ساله	Q	A	N	سناریو
۲۱۸	۷۶	۰/۱۲	۰/۳۸۲	۰/۲۱۲	۲	۲۵۰۰	۷	۱
۸۵	۱۱	۰/۰۸	۰/۱۴۸	۰/۰۸۸۹	۰	۰	۴	۲
۳۷۱	۱۲۰	۰/۰۳۱	۰/۱۴۶	۰/۰۶۶	۰	۰	۵	۳
۸۲۳	۳۰۳	۰/۰۳۱	۰/۲۸۶	۰/۱۲۵	۳	۲۰۰۰	۶	۴
۲۶۱	۶۶	۰/۰۳۱	۰/۱۱۲	۰/۰۵۱۵	۰	۰	۵	۵
۷۴۸	۲۳۸	۰/۰۳۱	۰/۲۶۳	۰/۱۰۵	۳	۲۰۰۰	۶	۶
۲۰۶	۷	۰/۲	۰/۶۱۱	۰/۲۱۵	۲	۲۰۰۰	۶	۷
۲۴۲	۶۸	۰/۲	۰/۶۸۳	۰/۳۳۷	۲	۲۵۰۰	۷	۸
۱۸۳	-۵	۰/۲	۰/۵۶۶	۰/۱۹	۱	۲۰۰۰	۶	۹
۲۲۰	۵۰	۰/۲	۰/۶۳۹	۰/۳۰۲	۲	۲۵۰۰	۷	۱۰

۴-۱۲- مقایسه LCoE در حالت دارای مخزن و فاقد مخزن ذخیره حرارتی

در جداول (۴-۸) تا (۴-۱۰) نتایج شبیه‌سازی‌ها برای حالت فاقد مخزن و حالت دارای مخزن ذخیره

حرارت با یکدیگر مقایسه شده است.

۴-۱۲-۱- مقایسه برای شهر تهران

جدول ۴-۸: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر تهران

سناریو	N(فاقد مخزن)	N(دارای مخزن)	A(فاقد مخزن)	A(دارای مخزن)	Q(دارای مخزن)	LCoE(فاقد مخزن)	LCoE(دارای مخزن)
۱	۳	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۲۱	۰/۱۸۷
۲	۳	۳	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۰۹۷۵
۳	۳	۳	۰	۰	۰	۰/۰۷	۰/۰۶۹
۴	۳	۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۱۲	۰/۱۱۳
۵	۲	۲	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۵۵
۶	۳	۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۱	۰/۰۹۴
۷	۳	۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۲	۰/۲۴	۰/۲۳
۸	۳	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۳۷	۰/۲۹۸
۹	۳	۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱	۰/۲۱	۰/۲۱۱
۱۰	۳	۱	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۳۲	۰/۲۶

از مقایسه مقادیر N که مربوط به تعداد بهینه میکروتوربین است، مشخص است که در برخی از سناریوها تعداد بهینه میکروتوربین متفاوت است. اما در مورد مساحت دیشهای سهموی این گونه نیست و مساحت بهینه تغییری نیافته است. در مورد LCoE که مهمترین محور مقایسه می‌باشد، مشاهده می‌شود که در تمام سناریوهای اقتصادی، به کارگیری مخزن ذخیره حرارتی توجیه اقتصادی طرح را افزایش می‌دهد.

۴-۱۲-۲- مقایسه برای شهر یزد

جدول ۴-۹: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر یزد

سناریو	N(فاقد مخزن)	N(دارای مخزن)	A(فاقد مخزن)	A(دارای مخزن)	Q(دارای مخزن)	LCOE(فاقد مخزن)	LCOE(دارای مخزن)
۱	۵	۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳	۰/۲۳	۰/۱۲
۲	۳	۲	۰	۰	۰	۰/۱	۰/۰۸
۳	۳	۳	۰	۰	۰	۰/۰۷	۰/۰۳۱
۴	۳	۳	۱۰۰۰	۱۵۰۰	۳	۰/۱۳	۰/۰۳۱
۵	۳	۳	۰	۰	۰	۰/۰۶	۰/۰۳۱
۶	۳	۲	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۳	۰/۱۱	۰/۰۳۱
۷	۳	۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱	۰/۲۵	۰/۲
۸	۵	۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳	۰/۳۸	۰/۲
۹	۳	۳	۱۰۰۰	۱۰۰۰	۱	۰/۲۲	۰/۲
۱۰	۵	۳	۱۵۰۰	۱۵۰۰	۳	۰/۳۴	۰/۲

مشابه آنچه در مورد تهران روی داده است، از مقایسه مقادیر N که مربوط به تعداد بهینه میکروتوربین است، مشخص است که در برخی از سناریوها تعداد بهینه میکروتوربین متفاوت است. اما در مورد مساحت دیشهای سهموی این گونه نیست و مساحت بهینه تغییری نیافته است. در مورد LCOE نیز، مشاهده می‌شود که در تمام سناریوهای اقتصادی، به کارگیری مخزن ذخیره حرارتی توجیه اقتصادی طرح را افزایش می‌دهد.

۴-۱۲-۳- مقایسه برای شهر بندرعباس

جدول ۴-۱۰: مقایسه نتایج حالت فاقد مخزن ذخیره با حالت دارای مخزن ذخیره برای شهر بندرعباس

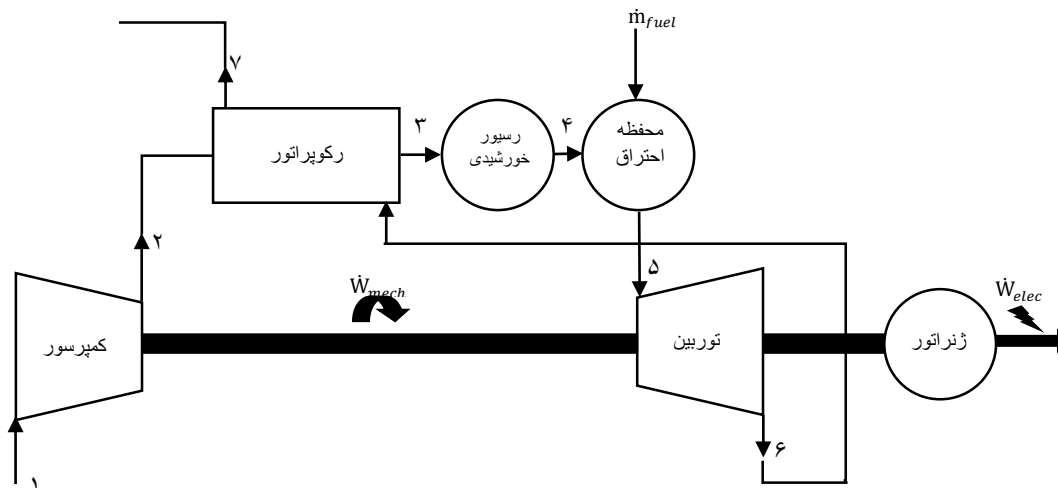
سناریو	N(فاقد مخزن)	N(دارای مخزن)	A(فاقد مخزن)	A(دارای مخزن)	Q(دارای مخزن)	LCoE(فاقد مخزن)	LCoE(دارای مخزن)
۱	۷	۷	۲۰۰۰	۲۵۰۰	۲	۰/۲۱	۰/۲۱۲
۲	۵	۴	۰	۰	۰	۰/۰۹	۰/۰۸۸۹
۳	۵	۵	۰	۰	۰	۰/۰۷	۰/۰۶۶
۴	۷	۶	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳	۰/۱۳	۰/۱۲۵
۵	۵	۵	۰	۰	۰	۰/۰۵	۰/۰۵۱۵
۶	۷	۶	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۳	۰/۱۱	۰/۱۰۵
۷	۶	۶	۲۰۰۰	۲۰۰	۲	۰/۲۲	۰/۲۱۵
۸	۷	۷	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲	۰/۳۵	۰/۳۳۷
۹	۶	۶	۲۰۰۰	۲۰۰۰	۱	۰/۱۹	۰/۱۹
۱۰	۷	۷	۲۵۰۰	۲۵۰۰	۲	۰/۳۱	۰/۳۰۲

مقایسه داده‌ها برای شهر بندرعباس نیز مشابه آنچه در مورد تهران و یزد توضیح داده شد می‌باشد. از مقایسه مقادیر N که مربوط به تعداد بهینه میکروتوربین است، مشخص است که در برخی از سناریوها تعداد بهینه میکروتوربین متفاوت است. اما در مورد مساحت دیشهای سهموی این گونه نیست و مساحت بهینه تغییری نیافته است. در مورد LCoE، اما مساله کمی با تهران و یزد متفاوت می‌باشد. برای شهر تهران و یزد مشاهده شد که به کارگیری مخزن ذخیره حرارتی سبب افزایش بهره‌وری اقتصادی طرح می‌شود. حال آنکه در مورد بندرعباس نه تنها تاثیر چندانی در بهبود وضعیت اقتصادی ندارد بلکه در برخی از سناریوها سبب کاهش بهره‌وری اقتصادی و به دنبال آن افزایش هزینه تولید برق می‌شود. علت این اختلاف در بین یزد و تهران با بندرعباس از مقایسه‌ی شکل‌های (۴-۳۳) تا (۴-۴۲) قابل فهم می‌باشد. شکل‌های مذکور نشان می‌دهد که در شهر تهران و یزد بخش زیادی از حرارت توسط بویلر کمکی تامین می‌شود. اما در شهر بندرعباس، تنها بخش کوچکی از حرارت توسط بویلر کمکی تامین

شده است. همین مساله سبب شده است که استفاده از مخزن ذخیره حرارت تاثیر چندانی در بهبود وضعیت اقتصادی پروژه نداشته باشد.

۴-۱۳- مشخصات سیال عامل در سیکل میکروتوربین

در هر یک از حالت‌های مورد بررسی، مشخصات سیال عامل در نقاط مختلف میکروتوربین، با تغییرات دمای محیط، درصد بار و تابش خورشیدی تغییر می‌کند. در شکل (۴-۵۶) و جدول (۴-۱۱) دمای سیال عامل سیکل میکروتوربین (هوا) در نقاط مختلف سیکل برای یک حالت خاص ($N=3, A=1000$) برای شهر تهران در روز ۱۵ تیر و در ساعت‌های مختلف نشان داده شده است.



شکل ۴-۵۶: دیاگرام میکروتوربین هیبرید (خورشیدی - گازی)

جدول ۴-۱۱: دمای سیال عامل در نقاط مختلف میکروتوربین بر حسب درجه سانتی گراد برای روز ۱۵ تیر، شهر تهران، در حالت ($N=3, A=1000$)

ماه	ساعت	محیط	۱	۲	۳	۴	۵	۶	۷
تیر	۳	۲۶	۳۳	۲۰۲	۵۴۲	۵۴۲	۸۱۰	۵۹۵	۲۷۹
	۶	۲۸	۳۴	۲۰۵	۵۴۲	۶۴۷	۸۱۲	۵۹۵	۲۷۵
	۹	۳۲	۳۷	۲۱۰	۵۴۳	۸۱۳	۸۱۳	۵۹۵	۲۶۷
	۱۲	۳۵	۴۰	۲۱۳	۵۴۴	۸۱۱	۸۱۱	۵۹۵	۲۶۸
	۱۵	۳۷	۴۲	۲۱۴	۵۴۴	۸۰۹	۸۰۹	۵۹۵	۲۶۹
	۱۸	۳۷	۴۳	۲۱۲	۵۴۴	۶۶۶	۸۰۶	۵۹۵	۲۷۸
	۲۱	۳۳	۳۹	۲۰۸	۵۴۴	۵۴۴	۸۰۶	۵۹۵	۲۸۳
	۲۴	۳۲	۳۸	۲۰۶	۵۴۳	۵۴۳	۸۰۶	۵۹۵	۲۸۲

فصل پنجم: نتیجه گیری، جمع بندی و پیشنهادات

در این مطالعه به بررسی توجیه فنی و اقتصادی تولید همزمان برودت، حرارت و قدرت بر پایه‌ی محرک اولیه‌ی میکروتوربین خورشیدی هیبرید پرداخته شد. به منظور به دست آوردن بهترین ترکیب (از تعداد میکروتوربین، مساحت دیش‌های سهموی و ظرفیت مخزن ذخیره حرارت)، ۱۹۶۰ حالت مختلف در قالب ۱۰ سناریوی اقتصادی، مورد بررسی قرار گرفت. در هر حالت با تغییر در تعداد میکروتوربین، مساحت دیش‌های سهموی و ظرفیت مخزن ذخیره حرارتی هزینه‌ی تولید برق به دست آمد. سپس هزینه‌ی به دست آمده، با تعرفه‌ی فروش برق به شبکه سراسری و همچنین هزینه‌ی تولید برق توسط سیستم‌های فتوولتائیک مقایسه شد.

مهمترین نتایج تحقیق را در موارد زیر می‌توان خلاصه نمود:

- ۱- با توجه به قیمت‌های فعلی انرژی، تولید همزمان بر پایه‌ی میکروتوربین خورشیدی هیبرید، در هیچ‌کدام از سناریوهای اقتصادی مقرون به صرفه نمی‌باشد. دلیل این امر آن است که در تمام سناریوها، هزینه‌ی تولید برق توسط سیستم مذکور، از تعرفه‌ی فروش برق به شبکه سراسری بیشتر می‌باشد (جداول ۱-۴ تا ۳-۴ و ۴-۵ تا ۷-۴).
- ۲- در بسیاری از سناریوها، هزینه‌ی تولید برق توسط سیستم مورد مطالعه، از هزینه‌ی تولید برق توسط سیستم‌های فتوولتائیک کمتر می‌باشد. از سوی دیگر با توجه به نوپا بودن تکنولوژی میکروتوربین خورشیدی هیبرید در مقایسه با تکنولوژی فتوولتائیک، می‌توان امیدوار بود که در آینده و با رشد این تکنولوژی، بتواند بخشی از بازار تجدیدپذیرها را به خود اختصاص دهد.
- ۳- حدود ۹۰٪ از هزینه‌ی اولیه و تعمیرات و نگهداری سیستم مورد بررسی، مربوط به میکروتوربین‌ها، دیش‌های سهموی، و چیلر جذبی می‌باشد (شکل‌های ۴-۵۳ تا ۴-۵۷). لذا هر گونه پیشرفتی در مورد افزایش بازده و یا کاهش قیمت این سه تجهیز، می‌تواند کمک موثری به توسعه‌ی این سیستم نماید.
- ۴- تعداد بهینه‌ی میکروتوربین، مساحت بهینه‌ی دیش‌های سهموی و ظرفیت بهینه‌ی مخزن ذخیره حرارتی، در اثر تغییر سناریوی اقتصادی به شدت تغییر می‌کند. این مطلب نشان‌دهنده‌ی آن است که

هرگونه اظهار نظر در مورد توجیه و یا عدم توجیه و همچنین ترکیب بهینه‌ی طرح مورد نظر (از منظر اقتصادی) به شدت وابسته به قیمت حامل‌های انرژی می‌باشد.

۵- در اغلب سناریوها، افزودن مخزن ذخیره حرارتی، سبب کاهش هزینه‌ی چرخه‌ی عمر سیکل می‌شود. دلیل این امر آن است که مخزن ذخیره‌ی حرارتی سبب کاهش مصرف گاز در بویلر کمکی می‌شود.

۶- برق تولیدی توسط سیکل مذکور در ماههای سرد سال دارای نوسان نسبتاً زیاد و در ماههای گرم دارای نوسان کمتری (به ویژه در طول روز) می‌باشد. علت این امر آن است که در ماههای گرم سال سیکل با حداکثر توان کار می‌کند، اما در ماههای سرد سال معمولاً سیکل به صورت پاره‌بار کار کرده و همین عامل سبب نوسان در برق تولیدی می‌شود.

۷- بیشترین حرارت مصرفی ساختمان مربوط به سیکل تبرید جذبی می‌باشد (شکل‌های ۴-۵ تا ۴-۷). لذا برای افزایش بهره‌وری، باید هر چه بیشتر در زمینه‌ی کاهش بار برودتی ساختمان و همچنین افزایش کارایی سیکل تبرید جذبی کار کرد.

۸- اقلیم، تاثیر زیادی بر عملکرد سیکل مذکور دارد. لذا بدون در نظر گرفتن اقلیم نمی‌توان نظری در مورد استفاده یا عدم استفاده از سیکل مذکور داد.

پیشنهادات

با توجه به روش و نتایج کار حاضر پیشنهادات زیر برای تحقیقات آتی ارائه می‌گردد:

۱- در این تحقیق از میکروتوربین ۳۰ کیلووات شرکت کپستون برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. لازم است که عملکرد میکروتوربین‌های با ظرفیت‌های بالاتر و ساخت سایر شرکت‌ها نیز مورد مطالعه قرار گیرد.

۲- در این مطالعه از دیش‌های سهموی برای شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. می‌توان عملکرد سایر متمرکز کننده‌ها مانند لنز فرزنل را نیز مورد مطالعه قرار داد.

۳- در مطالعه‌ی حاضر ۳ شهر تهران، یزد و بندرعباس مورد بررسی قرار گرفته‌اند. سایر اقلیم‌ها نیز بایستی مورد مطالعه قرار گیرند.

- ۴- در این مطالعه فرض شده است که کنترل مجموعه‌ی میکروتوربین‌ها بر اساس تامین نیاز حرارتی ساختمان صورت پذیرد. لازم است تا عملکرد مجموعه، بر مبنای تامین نیاز الکتریکی ساختمان نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۵- در این مطالعه چیلر جذبی تک اثره‌ی لیتیوم بروماید و آب برای تامین سرمایش مورد نیاز ساختمان به کار رفته است. بایستی عملکرد سیکل با سایر سیستم‌های جذبی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۶- در این مطالعه از گاز طبیعی به عنوان سوخت پشتیبان استفاده شده است. لذا لازم است عملکرد سیکل در حالت استفاده از سایر سوخت‌های فسیلی نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۷- در این مطالعه یک مجتمع مسکونی جهت انجام شبیه‌سازی‌ها مورد استفاده قرار گرفته است. لذا لازم است عملکرد سیکل در سایر انواع ساختمان و همچنین عملکرد سیکل در صنایع مختلف نیز مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۸- توجیه اقتصادی استفاده از این سیکل در مناطق دور از شبکه‌ی برق و گاز نیز بایستی مورد مطالعه و ارزیابی قرار گیرد.
- ۹- استفاده از سیکل مذکور در کاربری‌های دیگری مانند سردخانه نیز باید مورد ارزیابی قرار گیرد.
- ۱۰- امکان استفاده از سیکل مذکور در تولید همزمان برودت، حرارت، قدرت و آب شیرین نیز می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

- [1] K. Voss, M. Riley, A. Athienitis, C. Boonstra, D. Crawley, M. Donn, et al (2009) "IEA Joint Project: Towards Net Zero Energy Solar Buildings (NZEBs)" **SHC TASK**, vol. 40,.
- [2] D. Zhao, A. P. McCoy, J. Du, Ph. Agee, Y. Lu, (2016) "Interaction effects of building technology and resident behavior on energy consumption in residential buildings", **Energy & Build, InPress**
- [3] M. Jradi, S. Riffat,(2014) "Tri-generation systems: Energy policies, prime movers, cooling technologies, configurations and operation strategies", **renew & Sustainable Energy rev**, 32, pp.396-415
- [4] Aoun B. (2008), Ph.D. thesis,. "Micro combined heat and power operating on renewable energy or residential building Center for Energy and Processes", Mines Paris Tech;.
- [5] J. J. Lee, D. W. Kang, T. S. Kim, (2011), "Development of a gas turbine performance analysis program and its application", **Energy**, 36, pp. 5274-5285
- [6] A. Poullikkas, (2005), "An overview of current and future sustainable gas turbine technologies", **renew & Sustainable Energy rev**, 9, pp. 409-443
- [7] W. Wang, R. Cai, N. Zhang,(2004) " General characteristics of single shaft microturbine set at variable speed operation and its optimization", **Appl therm Eng**, 24, pp. 1851- 1863
- [8] L. Malinowski, M. Lewandowska, (2013) "Analytical model-based energy and exergy analysis of a gas microturbine at part-load operation", ", **Appl therm Eng**, 57, pp. 125-132
- [9] <https://www.capstoneturbine.com/services>
- [10] G. Xu, Y. Wang, Y. Quan, H. Li, S. Li, G. Song, W. Gao, (2015) "Design and characteristics of a novel tapered tube bundle receiver for high-temperature solar dish system", **Appl therm Eng**, 91, pp. 791-799
- [11] L.A. Andrade, M.A.S. Barrozo, L.G.M. Vieira, (2016) "A study on dynamic heating in solar dish concentrators", **Renew Energy**, 87, pp. 501-508
- [12] W. Wang, G. Ragnolo, L. Aichmayer, T. Strand, B. Laumert, (2015), "Integrated design of a hybrid gas turbine-receiver unit for a solar dish system", **Energy Proc**, 69, pp. 583 – 592
- [13] A. Arroyo, M. McLorn, M. Fabian, M. White, A. I. Sayma, (2016)"Rotor dynamics of different shaft configurations for A 6 kW micro gas turbine for concentrated solar power", **Turbomachinery Technical Conference and Exposition**, Seoul, South Korea

- [14] A. Giotri, E. Macchi, (2016) "An advanced solution to boost sun-to-electricity efficiency of parabolic dish", **Sol Energy**, 139, pp. 337–354
- [15] L. Aichmayer, J. Spelling, B. Laumert, (2015), "Preliminary design and analysis of a novel solar receiver for a micro gas-turbine based solar dish system", **Sol Energy**, 114, pp.378–396
- [16] W.G. Le Roux, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, (2011), "Maximum net Power output of the recuperative open and direct solar thermal Brayton cycle", **International Conference on Energy Sustainabilit, Washington, DC, USA**
- [17] W.G. Le Roux, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, (2012) "optimum small-scale open and direct solar thermal Brayton cycle for Pretoria, South Africa", **International Conference on Energy Sustainabilit, San Diego, , CA, USA**
- [18] W.G. Le Roux, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, (2012), "Optimum performance of the small-scale open and direct solar thermal Brayton cycle at various environmental conditions and constraints", **Energy**, 46, pp. 42-50
- [19] W.G. Le Roux, T. Bello-Ochende, J.P. Meyer, (2014) The efficiency of an open cavity tubular solar receiver for a small-scale solar thermal Brayton cycle, **Energy Conv & Manag**, 84 pp. 457–470
- [20] G. Gavagnin, D. Sánchez, G. S. Martínez, J. M. Rodríguez, A. Muñoz, (2017) "Cost analysis of solar thermal power generators based on parabolic dish and micro gas turbine: Manufacturing, transportation and installation", **Appl Energy**, 194, pp. 108–122
- [21] D. Sánchez, A. Bortkiewicz, J. M. Rodríguez, G. S. Martínez, G. Gavagnin, T. Sánchez, (2016) "A methodology to identify potential markets for small-scale solar thermal power generators", **Appl Energy**, 169, pp. 287–300
- [22] S. Semprini, D. Sánchez, A. De. Pascale, (2016), "Performance analysis of a micro gas turbine and solar dish integrated system under different solar-only and hybrid operating conditions", **Sol Energy**, 132, pp. 279–293
- [23] L. Aichmayer, J. Spelling, B. Laumert, (2015), "Thermoeconomic analysis of a solar dish micro gas turbine combined-cycle power plant", **Energy Proc**, 69, pp.1089 – 1099
- [24] L. Aichmayer, J. Spelling, B. Laumert, (2014), " Small Scale Hybrid Solar Power Plants for Polygeneration in Rural Areas", **Energy Proc**, 57, pp. 1536 – 1545
- [25] P. Ahmadi, I. Dincer, (2010), "Exergoenvironmental analysis and optimization of a cogeneration plant system using Multimodal Genetic Algorithm (MGA)", **Energy**, 35, pp. 5161-5172

[26] شریفی ح. باباپور ش. شرکتی ش، "بررسی مشکلات ناشی از کاهش ارزش حرارتی گاز مصرفی در نیروگاههای حرارتی ایران" هجدهمین کنفرانس بین المللی برق، ایران

[27] زرگر آ. رضوی ا. پیروزیناه و، (۱۳۸۸) "تاثیر ترکیبات گازهای طبیعی موجود در ایران بر عملکرد و آلاینده‌گی موتور گازسوز ^{135}Ti "، نشریه انرژی ایران، شماره ۳۰، صفحه ۶۱

[28] گزارش فنی شرکت Capston در مورد عملکرد میکروتوربین مدل C30: www.microturbine.com

[29] J. A. Duffie, W. A. Beckman, (2013), "**Solar Engineering of Thermal Processes**", Fourth Edition, Wiley, New Jersey

[30] <http://www.iranhydrology.net/meteo.asp>

[31] Final Technical Report, Capstone Turbine Corporation, March 31, 2008

[32] Ragnolo .G, (2014), Master of science thesis "A techno-economic comparison of a Micro Gas-Turbine and a Stirling Engine for Solar Dish application", Energy Technology Depart, KTH University

[33] <http://news.moe.gov.ir/Detail?anwid=17472>

[34] American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc, (2004), "Energy Standard for Buildings Except Low-Rise Residential Buildings, ASHRAEE STANDARD

[35] A. C. Ferreira et al, (2016), "Thermodynamic and economic optimization of a solar-powered Stirling engine for micro-cogeneration purposes", **Energy**, 111, pp. 1-17

[36] <http://www.solartronenergy.com>

[37] S. Edalati, et al, (2016), "Technical and economic assessments of grid-connected photovoltaic power plants: Iran case study", **Energy**, 114, pp. 923-934

[38] <http://www.moe.gov.ir>

[39] <http://wamp.tavanir.org.ir/getFile/?id=CA3D3B930D2423920CC8B73172DE0E30>

[40] http://privatesectors.sun.org.ir/suna_content/media/image/2016/05/4575_orig.pdf

[41] http://www.tavanir.org.ir/ren_dg/

[42] J. Wang, Y-Yin Jing, Ch-Fa Zhang, (2010) "Optimization of capacity and operation for CCHP system by genetic algorithm", **Appl Energy**, 87, pp.1325-1335

[43] [کاتالوگهای شرکت Broad](http://www.broadusa.net/en/wp-content/uploads/2015/03/Broad-X-chiller-Model-selection-design-manual-C.pdf)

<http://www.broadusa.net/en/wp-content/uploads/2015/03/Broad-X-chiller-Model-selection-design-manual-C.pdf>

- [44] W Somcharoenwattana, (2011), "Study of operational parameters improvement of natural-gas cogeneration plant in public buildings in Thailand", **Energy and Build**, 43, pp. 925–934
- [45] <http://www.iies.ac.ir/Data/BulletinFiles/TH1.pdf>
- [46] http://mgd.nigc.ir/MGD2/_Documents/dir_2/_Download/tarefeh94.pdf
- [47] http://bahaye_bargh.tavanir.org.ir/
- [48] http://abfayazd.ir/uploaded_files/DCMS/Download_files/%D8%AA%D8%B9%D%B1%D9%81%9%87%20%D9%87%D8%A7.pdf
- [49] A. Sencan, et al, (2005), "Exergy analysis of lithium bromide/water absorption systems", **Ren Energy**, 30, pp. 645–657
- [50] [:Trane کاتالوگهای شرکت](https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment chillers/compr-chillers/rlc-prc029-en_02012010.pdf)
- https://www.trane.com/content/dam/Trane/Commercial/global/products-systems/equipment chillers/compr-chillers/rlc-prc029-en_02012010.pdf
- [51] L. Miró, J. Gasia, L. F. Cabeza, (2016) "Thermal energy storage (TES) for industrial waste heat (IWH) recovery: A review", **Appl Energy**, 179, pp. 284–301
- [52] F. Bai, Y. Wang, Z. Wang, Y. Sun, A. Beath, (2015), "Economic evaluation of shell-and-tube latent heat thermal energy storage for concentrating solar power applications", **Energy Proc**, 69, pp. 737 – 747

ABSTRACT

One of the ways to increase the energy conversion efficiency and reduce the production of pollutants in the building sector is use of cogeneration production of cooling, heat and power. These systems have different types of primitive mover. One of these prime mover is a gas micro turbine. By adding a solar receiver to the market micro-turbines, it is possible to use solar energy to provide part of the heat needed for the cycle. The components of this cycle include gas micro turbine, parabolic dishes, solar receiver, absorption chiller, auxiliary boiler, recovery boiler and heat storage tank. In this study, the cogeneration cycle of cooling, heat and power based on the hybrid solar micro turbines prime mover are simulated in a software environment. The annual cycle performance is evaluated in real terms for a residential building in three cities of Tehran, Yazd and Bandar Abbas. The effect of changing the number of micro turbines, changing the area of parabolic dishes and changing the volume of the thermal storage tank has been investigated. The cost of the generated electricity of the cycle is calculated in the form of different price scenarios, and best case proposed. These scenarios include international tariffs and internal energy tariffs. . The role of the Iranian government's energy policies (including targeting subsidies and support for renewable energies) has been examined in several scenarios. The most economically advantageous situations have been introduced and some of its technical features have been evaluated. The most economically advantageous situations have been introduced and some of its technical features have been evaluated. The share of each equipment at the initial cost and maintenance cost is specified. There is also an annualized, monthly and hourly electricity and fuel consumption charts. Finally, the Levelized cost of electricity produced by the cycle is compared to the Levelized cost of electricity produced by photovoltaic systems as well as the electricity purchase tariff by the national network. The results indicate that, in many scenarios, the cost of electricity produced by the system is lower than the cost of electricity produced by photovoltaic systems, but is higher than the electricity sales tariff to the network. As the cost of electricity produced in this cycle in most scenarios is between 10% and 80% higher than the tariff for electricity sales to the global network. Compared to the electricity produced by photovoltaic systems, it is between 5% and 20% less than in some scenarios, and in other scenarios it is higher than photovoltaic electricity prices. Also, the cost of the produced power in the storage tank is 2 to 20% less than in the case of no storage tank. Therefore, considering that this technology is still in the first stages of development and is not as photovoltaic as it is, it seems to be able to take part in the energy market in the future.

Keywords: Cogeneration, Micro Gas Turbine, parabolic Dish, Solar Energy, Distributed Generation



Shahrood University of Technology
Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering
M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

**Technical – Economic analysis of Combined Cooling,
Heating, and Power, (CCHP) based on hybrid
microturbine Prime mover (solar- gaseous)
For a residential building**

Amir Ali Baghaee

Supervisors:

Dr. Mahmood Chahartaghi

Dr. Ali Sarreshtehdari

September 2017