



تحلیل و بررسی یک سیستم جدید تولید همزمان انرژی توسط زیست توده به منظور بکارگیری در یک ساختمان با مصرف انرژی صفر

فاضل محمدی خواه، کورش جواهرده*، جواد محمودی مهر

دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۳۹۷/۰۵/۱۳
بازنگری: ۱۳۹۷/۰۷/۰۷
پذیرش: ۱۳۹۷/۰۸/۱۹
ارائه آنلاین: ۱۳۹۷/۰۸/۳۰

کلمات کلیدی:

زیست توده
ساختمان انرژی صفر
تحلیل اقتصادی
تحلیل حساسیت

خلاصه: هدف از تحقیق حاضر پیشنهاد و ارزیابی یک سیستم تولید همزمان جدید برای ساختمان های با مصرف انرژی صفر می باشد. سیستم ارائه شده شامل گازی ساز زیست توده، موتور احتراق داخلی، چیلر جذبی دو اثره لیتیوم بروماید و آب، بویلر پشتیبان تولید آب گرم، تانک ذخیره گاز، تانک ذخیره آب گرم مصرفی و مبدل های حرارتی می باشد. در کار حاضر ضمن ارائه یک استراتژی عملکردی برای سیستم پیشنهادی، حساسیت دستیابی به اهداف سیستم (سود خالص سالیانه، میزان تأمین تقاضاهای بار الکتریکی، سرمایه، گرمایش و آب گرم مصرفی ساختمان) به متغیرهایی نظیر ظرفیت موتور، چیلر و بویلر آب گرم، ساعت روشن شدن موتور و حجم منبع ذخیره آب گرم، ارزیابی می گردد. نتایج نشان داد که افزایش توان ورودی موتور سبب کاهش تابع توازن الکتریسیته خواهد شد که می تواند به دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر کمک کند. با افزایش توان سرمایه چیلر جذبی در نزدیکی تقاضاهای گرمایشی، سرمایه ساختمان، می توان به بیشترین سود خالص سالیانه (۴۰۰۰ دلار) دست یافت. با افزایش توان گرمایشی بویلر و حجم منبع ذخیره آب گرم تقاضاهای سرمایه، گرمایشی و آب گرم مصرفی ساختمان به کلی تأمین شده است. همچنین، با تغییر در ساعت روشن شدن موتور در ساعات افزایش تقاضای الکتریسیته (۹ تا ۱۱)، میزان سود سالیانه سیستم تا ۴۰۰۰ دلار افزایش یافت.

۱- مقدمه

با استفاده از چهار استراتژی کنترلی مورد تحلیل قرار گرفتند. لو و همکاران [۲] بیان کردند که به دلیل رفتار تناوبی و غیرقابل کنترل منابع انرژی تجدیدپذیر، مقدار بازده خانه های انرژی صفر می تواند غیرقابل پیش بینی باشد. به این منظور، با استفاده از الگوریتم ژنتیک به بررسی و بهینه سازی چهار نوع طراحی سیستم، با استفاده از سلول های خورشیدی، توربین بادی، ژنراتور بیودیزل، برای این ساختمان ها پرداختند. سپس، با استفاده از تحلیل حساسیت روی یکی از سیستم های بهینه شده، تأثیر تغییرات ورودی های طراحی را روی بازده ساختمان (نظیر هزینه عملکردی، آلودگی CO₂ و تأثیرات شبکه) مورد بررسی قرار دادند.

گود و همکاران [۳] به بررسی سیستم های مختلف انرژی خورشیدی برای یک ساختمان مسکونی مدل در نروژ و تبدیل این ساختمان به ساختمان نزدیک به مصرف انرژی صفر^۱ پرداختند. در این مطالعه سیستم های همزمان سلول و کلکتور خورشیدی^۲ با سلول خورشیدی تنها و کلکتور خورشیدی تنها مقایسه شد. نتایج حاصل

با استفاده از مفهوم خانه های انرژی صفر، می توان شبکه توزیع را به عنوان یک منبع ذخیره برای انرژی تولیدی اضافی توسط منبع تجدیدپذیر تلقی نمود. این خانه ها مقدار زیادی انرژی با شبکه توزیع تبادل می کنند و با استفاده از این تبادل می توان به موازنه سالانه انرژی صفر دست یافت. در سال های اخیر ساختمان های با مصرف انرژی صفر به صورت گسترده ای در سراسر جهان در حال ساخت و بکارگیری هستند. اتحادیه اروپا اعضای خود را موظف کرده است که از سال ۲۰۲۰ به بعد تمامی خانه های جدید باید از نوع ساختمان های دارای مصرف انرژی صفر یا حداقل نزدیک به صفر باشند. به همین منظور تحقیقات در مورد این ساختمان ها نیز در حال افزایش است، به گونه ای که ساخت و تأمین انرژی این ساختمان ها به یکی از موضوعات جذاب برای محققین، مبدل شده است.

ایجازدار و همکاران [۱] به معرفی دو نوع سیستم انرژی با استفاده از پمپ حرارتی و ذخیره ساز گرمایی پرداختند. این سیستم ها

1 Nearly Zero-Energy Building (nZEB)

2 PhotoVoltaic Thermal (PV/T)

* نویسنده عهده دار مکاتبات: javaherdeh@guilan.ac.ir



ترموالکتریکی بهره گرفته شد. به این منظور به جایگزینی سیستم تهویه مطبوع هوای مرسوم با سیستم تشعشی سقفی ترموالکتریک و سیستم جابجایی هوای ترموالکتریکی به منظور تولید هوای تازه و مطبوع، پرداخته شد. همچنین، از خاصیت ترموالکتریکی برای بهبود عملکرد تولید الکتریسیته توسط انرژی خورشیدی استفاده شد.

سیلوا و همکاران [۹] بازده انواع طرح‌های بازسازی را برای خانه‌های چندخانواره در پرتغال مورد بررسی قرار دادند. در این تحقیق، طراحی ساختمان نزدیک به مصرف انرژی صفر و ساختمان دارای مصرف انرژی صفر با استفاده از سلول‌ها و کلکتورهای خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان داد، که در آب و هوای پرتغال برای یک ساختمان چندخانواره می‌توان ۱۰۰٪ انرژی مورد نیاز خانه را با استفاده از انرژی تجدیدپذیر تأمین کرد. بوجیچ و همکاران [۱۰] به بررسی بکارگیری سلول‌های خورشیدی در ساختمان مسکونی در آب و هوای صربستان پرداختند. در این تحقیق از الکتریسیته تولیدی توسط انرژی خورشیدی و همچنین از برق شبکه در مواقع ضروری به منظور گرمایش، روشنایی و وسایل الکتریکی و تولیدی آبگرم مصرفی ساختمان استفاده شده است. آلمیدا و همکاران [۱۱] با استفاده از نرم‌افزار انرژی پلاس به بررسی یک ساختمان مدل^۵ در چهار شهر برزیل پرداختند. تحلیل انجام شده شامل پارامترهای فتوولتائیک و تطبیق تقاضای انرژی و تعاملات شبکه توزیع بود. در این تحقیق، شاخص جدیدی معرفی شده تا تأثیر تولید پراکنده بر شبکه توزیع مورد بررسی قرار گیرد.

امروزه مفهوم ساختمان‌های دارای مصرف انرژی صفر در محافل علمی به خوبی شناخته شده است، اما چگونگی استفاده عملی از این مفهوم در ساخت خانه‌ها بسیار فراگیر نشده است. برای این منظور، اوولا و همکاران [۱۲] به بررسی راهکارهای عملی و پربازده به منظور طراحی ساختمان‌های کم ارتفاع در کشورهای مدیترانه‌ای پرداختند. در این مطالعه به بررسی خانه‌های کوچک پرداخته شده که بیشترین تعداد خانه‌ها را در جنوب اروپا شامل می‌شوند.

حدود ۹۵٪ خانوارهای آمریکایی حداقل یک اتومبیل دارند، که این امر باعث تعریف فناوری "اتومبیل به خانه" شده است. این فناوری امکان کارکرد خانه‌ها، اتومبیل‌ها و منابع انرژی تجدیدپذیر را باهمدیگر فراهم می‌کند. با استفاده از کاربرد همزمان این موارد

نشان داد که ساختمان مدل در صورت استفاده از سلول خورشیدی تنها با بازده بالا می‌تواند به موازنه ساختمان دارای مصرف انرژی صفر دست پیدا کند. سوتھی و همکاران [۴] به بررسی امکان استفاده از سیستم ترکیبی سلول خورشیدی به همراه کلکتور خورشیدی، به منظور دستیابی به ساختمان دارای مصرف انرژی صفر و همچنین آب سالم پرداختند. یک نمونه از این سیستم در شهر ورقله^۱ نصب گردید تا اهمیت استفاده از ساختار غیر فعال خورشیدی مشخص گردد. با استفاده از این سیستم تمامی انرژی مورد نیاز ساختمان مورد نظر پوشش داده شد.

الاجمی و همکاران [۵] به امکان‌پذیری تغییر یک ساختمان معمولی به یک ساختمان دارای مصرف انرژی صفر پرداختند. در این طرح از انرژی خورشیدی بهره گرفته شد. سه طرح مختلف با مقدار سطح مقطع یکسان سقف جهت بهره‌گیری از انرژی خورشیدی مورد بررسی قرار گرفت. در طرح اول از سلول خورشیدی به همراه چیلر الکتریکی متداول، در طرح دوم از سلول خورشیدی به همراه یک چیلر با بازده بیشتر و در طرح سوم از سلول خورشیدی به همراه سیستم سرمایش خورشیدی استفاده شد. هیروونن و همکاران [۶] به مطالعه درباره توجیه اقتصادی و همچنین مطابقت تولید انرژی توسط خورشید و نیاز انرژی برای یک ساختمان تک خانواری در فنلاند پرداختند. در این مطالعه سطح انرژی صفر^۲ تعریف شد که می‌تواند به عنوان یک ابزار مناسب جهت بهره‌گیری از انرژی‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار گیرد. به منظور تولید گرمایش از سه سیستم تولید حرارت ناحیه‌ای، پمپ حرارتی و حرارت الکتریکی استفاده شد.

مارتا و پاناو [۷] تابع جدیدی به نام نرخ کلی انرژی تجدیدپذیر^۳ را به منظور بکارگیری در تحلیل ساختمان‌های دارای مصرف انرژی صفر معرفی کردند. این تابع تعمیم یافته تابع نرخ انرژی مصرفی در محل^۴ می‌باشد و شامل انرژی تجدیدپذیر تولیدی دور از محل مصرف نیز می‌شود. مقدار انرژی تولیدی در محل که به شبکه توزیع صادر می‌شود با استفاده از ضرایب موازنه مختلف مورد بحث قرار گرفت.

شن و همکاران [۸] به بررسی کاربرد فناوری ترموالکتریک در ساختمان‌های دارای انرژی نزدیک به صفر پرداختند. در این تحقیق از خنک‌کن ترموالکتریکی و تولید الکتریسیته توسط خاصیت

- 1 Ouargla
- 2 Zero Energy Level (ZEL)
- 3 OREF
- 4 OEF

5 Net-Positive Energy Building (NPEB)

ممکن برسد. یو و همکاران [۱۸] به مطالعه در مورد دستیابی به اندازه مناسب سیستم انرژی مورد استفاده در ساختمان‌های نزدیک به مصرف انرژی صفر با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداختند. برای این منظور از پنج سیستم انرژی مختلف استفاده شد که عبارتند از: سیستم تهویه هوا، فتوولتائیک، توربین بادی، سیستم ذخیره‌ساز گرمایی و سیستم ذخیره‌ساز الکتریسیته. به منظور دستیابی به بازده بهینه سیستم از سه پارامتر اصلی انرژی صفر، آسایش حرارتی و عدم وابستگی به شبکه استفاده شد. حمدی و همکاران [۱۹] به مدلسازی و بهینه‌سازی یک ساختمان تک خانوار در فنلاند پرداختند. در این تحقیق به بررسی هزینه بهینه سیستم و بازده خانه با مصرف انرژی صفر پرداخته شد. پوشش‌های سطحی مختلفی برای دیوارهای ساختمان، سیستم‌های مختلف سرمایشی و گرمایشی و کلکتورها و سیستم‌های فتوولتائیک با اندازه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفتند. فرارا و همکاران [۲۰] به بررسی یک ساختمان تک خانواره در فرانسه پرداختند. هدف از این تحقیق دستیابی به هزینه بهینه برای ساختمان با مصرف انرژی صفر بود. برای این منظور مدلسازی‌های زیادی بر مبنای ترکیبات مختلف ساختمان (دیوارهای خارجی، عایق‌بندی ساختمان، سیستم‌های انرژی) صورت گرفت. در اروپا برای دیوارهای خارجی ساختمان‌های با مصرف انرژی صفر از دیوارهای سبک چندلایه ساخته شده از مواد با چگالی کم، عایق حرارتی، ضخامت زیاد، تجمع جرمی کم، انتقال حرارت پایای کم و وزن ویژه کم، استفاده می‌شود. باگلیوو و همکاران [۲۱] با استفاده از بهینه‌سازی چند هدفه به بررسی و انتخاب دیوار مناسب برای آب و هوای مدیترانه‌ای در کشور ایتالیا پرداختند.

ژائو و همکاران [۲۲] به بررسی کاربرد مبدل‌های زمین گرمایی در ساختمان مصرف انرژی صفر پرداختند. در این تحقیق از سیکل‌های شامل مبدل‌های زمین گرمایی به همراه کلکتورهای خورشیدی، برج خنک‌کن، دودکش خورشیدی به منظور دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی صفر استفاده شد. رزا و همکاران [۲۳] به بررسی ترکیب سلول خورشیدی، میکرو توربین بادی و باتری برای طراحی ساختمان با مصرف انرژی صفر پرداختند. در این تحقیق یک ساختمان مدل در پرتغال در نظر گرفته شد و اثرات تعرفه برق خریداری شده از شبکه و برق فروخته شده به شبکه مورد بررسی قرار گرفت.

مروری بر تحقیقات پیشین نشان می‌دهد که توجه این تحقیقات

می‌توان از این سیستم به منظور دستیابی به ساختمان دارای مصرف انرژی صفر استفاده نمود. این فناوری از باتری خودرو به عنوان ذخیره‌ساز انرژی در هنگام نوسانات الکتریسیته تولیدی توسط منبع انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کند و به عنوان یک منبع پشتیبان در مواقع ضروری بکار می‌رود. علیرضایی و همکاران [۱۳] به بررسی استفاده از این فناوری به منظور دستیابی به مفهوم ساختمان دارای مصرف انرژی صفر پرداختند.

یکی از اهداف راهبردی اتحادیه اروپا تا سال ۲۰۵۰ استفاده از فناوری خودروهای جدید در ساختمان‌های دارای مصرف انرژی صفر است. به همین منظور، کائو [۱۴] به بررسی بکارگیری خودروی هیدروژنی یا الکتریکی به همراه انرژی تجدیدپذیر در ساختمان پرداخته است. در این تحقیق از متغیرهای ظرفیت تولید برای انرژی تجدیدپذیر، سیستم بکارگرفته شده در خودرو، ظرفیت ذخیره‌سازی خودرو به منظور تأمین نیازهای خانه و استراتژی شارژ دوباره سیستم استفاده شده است.

فیورنتیتی و همکاران [۱۵] به بررسی سیستم جدید تهویه مطبوع خورشیدی پرداختند. این سیستم شامل یک فتوولتائیک حرارتی، پایه هوا، یک ماده دارای قابلیت تغییر فاز^۱، ذخیره‌ساز حرارت و یک پمپ حرارتی می‌شد. این سیستم برای کاربرد در فصول تابستان و زمستان طراحی شده که با استفاده از تابش خورشیدی در روز و تشعشع آسمان در شب، اقدام به تولید سرمایش و گرمایش مورد نیاز برای ساختمان می‌کند.

محمد و همکاران [۱۶] به بررسی یک ساختمان با مصرف انرژی صفر با استفاده از چهار نوع موازنه انرژی اولیه^۲، انرژی محل، تولید CO₂ و هزینه انرژی بر اساس شاخص‌های موازنه بین‌المللی پرداختند. در این مطالعه به بررسی پنج نوع سیستم انرژی مرسوم و هفت نوع سیستم انرژی بر پایه زیست‌توده و سیستم تولید ترکیبی حرارت و توان^۳ پرداختند. حسان و دینسر [۱۷] به مقایسه سیستم‌های مختلف تولید انرژی به منظور دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی صفر برای کشور لبنان پرداختند. این سیستم می‌بایست تمامی انرژی الکتریکی مورد نیاز ساختمان را تأمین کند به گونه‌ای که استفاده از انرژی تجدیدپذیر در آن حداکثر شود و تولید گازهای گلخانه‌ای به حداقل

1 Phase Change Material (PCM)

2 Primary Energy (PE)

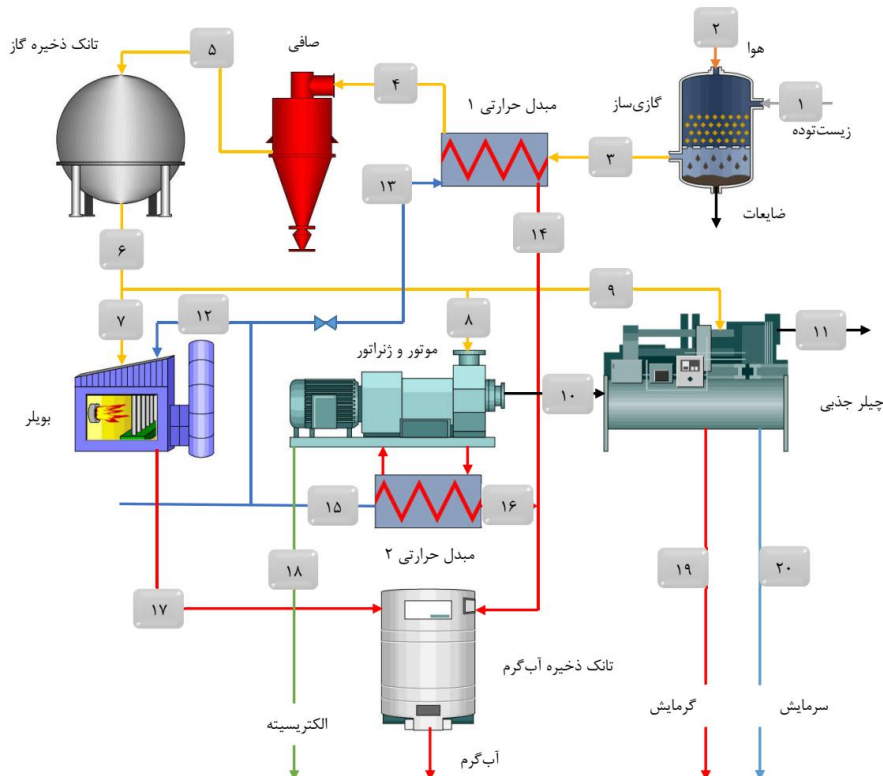
3 Combined Heat and Power (CHP)

گرمایش و آب گرم تشریح می‌گردد. با توجه به عدم بکارگیری از انرژی تجدیدپذیر زیست توده در دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر در تحقیقات پیشین، ارائه یک سیستم ترکیبی جدید بر پایه زیست توده، ارائه استراتژی عملکردی وابسته به زمان و آنالیز حساسیت سیستم به پارامترهای مختلف طراحی از جمله اهداف و نوآوری‌های تحقیق حاضر می‌باشد.

۲- معرفی سیستم و معادلات حاکم

در شکل ۱ سیستم ترکیبی سرمایش، حرارت و توان^۱ را همراه با گازی‌ساز زیست‌توده نشان داده می‌شود. این سیستم به دو زیر بخش تقسیم می‌شود: سیستم گازی‌ساز زیست توده و سیستم ترکیبی سرمایش، حرارت و توان. زیست‌توده در سیستم گازی‌ساز به گاز تبدیل می‌شود، سپس گاز تولیدی به عنوان سوخت به منظور تولید الکتریسیته، گرمایش و سرمایش به کار می‌رود. پس از فرآیند گازی‌سازی، سوخت تولیدی شامل گاز، قیر، بخار و گرد و غبار می‌باشد. دمای محصول تولیدی بین 573 K تا 673 K و حتی بیشتر می‌باشد. گاز تولیدی دما بالا ابتدا خالص‌سازی شده و خنک می‌گردد و سپس به محرک سیستم منتقل می‌شود. در هنگام خنک‌کاری گاز،

بیشتر معطوف به تولید توان الکتریکی توسط انرژی تجدیدپذیر است تا در طول یک بازه زمانی، که معمولاً یک سال در نظر گرفته می‌شود، با توان الکتریکی مورد نیاز ساختمان مطابقت داشته باشد. که این اصل به دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر می‌انجامد. در این مطالعات کمتر به استراتژی عملکردی سیستم توجه شده است؛ و عموماً یک سیستم تولید انرژی موجود در بازار (مانند سلول خورشیدی، توربین بادی) را در این‌گونه ساختمان‌ها بکار گرفته‌اند. این در حالی است که توجه به سیستم انرژی مورد استفاده در ساختمان مورد مطالعه، منجر به انتخاب مناسب و بهینه آن خواهد شد. انتخاب بهینه سیستم انرژی فوایدی از جمله کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و افزایش بازده سیستم را به دنبال خواهد داشت. با انتخاب مناسب سیستم انرژی برای هر ساختمان با توجه به نیازهای انرژی آن و منطقه آب و هوایی که ساختمان در آن قرار دارد، می‌توان وابستگی ساختمان به شبکه توزیع را نیز کاهش داد. در این تحقیق به معرفی یک سیستم تولید همزمان که توسط زیست توده کار می‌کند، جهت بکارگیری در یک ساختمان با هدف مصرف انرژی صفر معرفی می‌شود. سپس استراتژی عملکردی سیستم جهت تولید تمام تقاضاهای ساختمان شامل تقاضای الکتریسیته، سرمایش،



شکل ۱ سیستم تولید همزمان متصل به گازی‌ساز زیست‌توده

Fig. 1. Cogeneration system connected to biomass gasifier

مقدار کیلومول رطوبت نسبت به ماده خام است که از رابطه زیر قابل محاسبه است. b مقدار کیلومول اکسیژن نسبت به ماده خام می‌باشد. r_{N_2} و r_{H_2O} ، r_{CH_4} ، r_{CO_2} ، r_{H_2} ، r_{CO} ، δr_{tar} تعداد مول‌های فرآورده‌های گازی می‌باشند ($\delta=5\%$). در اینجا tar را به صورت CH_qO_p در نظر می‌گیریم ($p=1.03, q=1.03$) [۲۹]. بر مبنای تحقیقات انجام شده حداکثر مقدار tar موجود در فرآورده‌های ناشی از گازی‌سازی برابر $4/5\%$ جرم کلی زیست توده می‌باشد که می‌توان تعداد مول مربوط به آن را تعیین کرد [۳۰].

$$a = \frac{M_{Biomass} \times MC}{18(1-MC)} \quad (3)$$

که در آن MC درصد رطوبت زیست توده (نسبت جرم رطوبت موجود در زیست‌توده به جرم کلی زیست‌توده) و $M_{Biomass}$ جرم مولی زیست توده می‌باشد. در مرجع [۳۰] درصد جرمی عناصر تشکیل‌دهنده زیست توده آمده است.

۲-۲- موازنه جرم

رابطه‌های موازنه جرم عناصر تشکیل‌دهنده عبارتند از:

$$\text{Carbon: } 1 = \delta r_{tar} + r_{CO} + r_{CO_2} + r_{CH_4} \quad (4)$$

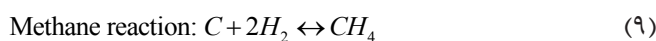
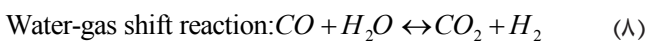
$$\text{Oxygen: } y + a + 2b = p \delta r_{tar} + r_{CO} + 2r_{CO_2} + r_{H_2O} + 2r_{SO_2} \quad (5)$$

$$\text{Hydrogen: } x + 2a = q \delta r_{tar} + 2r_{H_2} + 4r_{CH_4} + 2r_{H_2O} \quad (6)$$

$$\text{Nitrogen: } z + 2 \times 3.76b = 2r_{N_2} \quad (7)$$

۲-۳- تعادل ترموشیمیایی:

در ناحیه گازی‌سازی واکنش‌های زیر اتفاق می‌افتند:



تمامی گازها به صورت گاز ایده‌آل در نظر گرفته می‌شوند و تمامی واکنش‌ها در فشار ۱ atm رخ می‌دهند. ثابت‌های واکنش‌های بیان شده به ترتیب از روابط (۱۰) و (۱۱) محاسبه می‌شوند:

حرارت اضافی توسط آب خنک‌کن دفع می‌گردد.

اجزاء سیستم ترکیبی سرمایش، حرارت و توان طراحی شده عبارتند از: گازی‌ساز، مبدل‌های حرارتی، سیکلون، تانک ذخیره گاز، موتور احتراق داخلی، چیلر جذبی $Libr-H_2O$ ، بویلر پشتیبان آب گرم و تانک ذخیره آب گرم می‌باشد. در بخش سیستم ترکیبی سرمایش، حرارت و توان، موتور احتراق داخلی با استفاده از گاز تولیدی، الکتریسیته تولید می‌کند. آب خنک‌کن موتور به منظور تولید آب گرم مصرفی مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین گاز خروجی از موتور به چیلر جذبی دو اثره $Libr-H_2O$ فرستاده می‌شود تا به منظور تولید گرمایش در زمستان و سرمایش در تابستان مورد استفاده قرار گیرد. اگر مقدار گرمای تولیدی موتور کافی نباشد می‌توان گاز تولیدی را در ژنراتور دما بالای چیلر سوزاند و از انرژی حاصل جهت تولید گرمایش یا سرمایش استفاده نمود.

زیست‌توده با مخلوط هوا در گازی‌ساز به گاز تبدیل می‌شود و سپس گاز دما بالا در مبدل حرارتی خنک می‌شود. اگر گاز به زیر دمای $K473$ خنک شود، قیر موجود در آن به راحتی با آب و گرانول‌های کربن مخلوط می‌شود و می‌تواند به تجهیزات آسیب برساند. بنابراین، گاز را تا بالای دمای $K473$ خنک‌کاری می‌کنند. این گاز خنک شده در سیکلون خالص‌سازی می‌شود و توسط اسپری خنک‌کاری می‌شود. سپس گاز تولیدی در مخزن ذخیره می‌گردد.

۲-۱- گازی‌سازی زیست توده

مدلسازی گازی‌سازی به منظور پیش‌بینی خواص فرآورده‌ها، مانند ترکیب آن‌ها و همچنین ارزش حرارتی آن‌ها به کار گرفته می‌شود. مدلسازی‌های مختلفی در این زمینه انجام شده که شامل تعادل ترموشیمیایی و همچنین استفاده از شبکه‌های عصبی می‌شود. فرمول شیمیایی ماده خام به صورت $CH_xO_yN_z$ بیان می‌شود. واکنش کلی آن را می‌توان توسط رابطه (۱) بیان کرد [۲۸-۲۴].

در این معادله x ، y و z به ترتیب نسبت تعداد اتم‌های هیدروژن، اکسیژن و نیتروژن به تعداد اتم‌های کربن در ماده خام هستند. a

$$x = \frac{HM_C}{CM_H} \quad y = \frac{OM_C}{CM_O} \quad z = \frac{NM_C}{CM_N} \quad (2)$$

اکسیژن و نیتروژن به تعداد اتم‌های کربن در ماده خام هستند. a

کامل زیست توده و LHV_b ارزش حرارتی پایینی زیست توده می‌باشد. برای به دست آوردن LHV گاز ابتدا باید مقدار HHV گاز محاسبه شود که مقدار آن از رابطه زیر قابل محاسبه است [۳۳].

$$HHV_b = 0.3491z_C + 1.1783z_H - 0.1034z_O - 0.0151z_N + 0.1005z_S - 0.021z_A \quad (16)$$

که پس از محاسبه HHV مقدار LHV از رابطه (۱۷) قابل محاسبه است [۳۴].

$$LHV_b = HHV_b - 21.978z_H \quad (17)$$

که در رابطه بالا مقادیر ارزش‌های حرارتی بر حسب (MJ/kg) می‌باشند. همچنین z_C ، z_H ، z_O ، z_N و z_S و z_A به ترتیب درصدهای وزنی کربن، هیدروژن، اکسیژن، نیتروژن، سولفور و خاکستر را بیان می‌کنند. برای محاسبه C_p برای هر کدام از اجزاء گاز تولیدی از رابطه زیر استفاده می‌شود [۳۳]. که در آن ثابت‌های a ، b ، c و d در مرجع [۳۴] آمده است.

$$C_p = a + bT_i + cT_i^2 + dT_i^3 \quad (18)$$

$$\int_{298}^{T_i} C_p(T_i) dT_i = \left[aT_i + b \frac{T_i^2}{2} + c \frac{T_i^3}{3} + d \frac{T_i^4}{4} \right]_{298}^{T_i} \quad (19)$$

برای به دست آوردن مقدار T_G باید از سعی و خطا استفاده شود. برای این منظور ابتدا یک دما برای گازی‌سازی در نظر گرفته می‌شود. سپس با استفاده از روابط بالا تعداد مول فرآورده‌ها محاسبه می‌گردد. با استفاده از این اطلاعات از رابطه (۲۰) مقدار ΔH محاسبه می‌گردد، اگر این مقدار به صفر میل کند دمای حدس زده شده همان دمای گازی‌سازی است در غیر این صورت باید حدس اولیه را اصلاح نمود و این روند را ادامه داد تا به جواب مدنظر دست یافت.

$$\Delta H = |H_{prod}(T_G) + Q_{out} - (H_{react} + Q_{in})| \quad (20)$$

بر مبنای الگوریتم بیان شده کدی نوشته شده و با داده‌های آزمایشگاهی صحت‌سنجی شده است که در جدول ۱ آمده است.

$$K_1 = \prod_i (x_i)^{v_i} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\sum_i v_i} = \frac{r_{CO_2} r_{H_2}}{r_{CO} r_{H_2O}} \quad (10)$$

$$K_2 = \prod_i (x_i)^{v_i} \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\sum_i v_i} = \frac{r_{CH_4} r_{total}}{r_{H_2}^2} \quad (11)$$

که در این روابط x_i کسر مولی جزء نام در مخلوط گاز ایده‌آل، عدد استوکیومتری، P و P_0 به ترتیب فشار استاندارد و فشار واکنش، و r_{total} کل مول‌های فرآورده‌ها می‌باشند. به منظور محاسبه مقادیر K_1 و K_2 محققان مختلف روش‌های گوناگونی ارائه داده‌اند که در مراجع [۳۱ و ۳۲] آمده است.

۲-۴- موازنه انرژی:

موازنه انرژی در سیستم گازی‌ساز در روابط (۱۲) تا (۱۴) بیان شده است [۳۰ و ۳۱].

$$H_{prod}(T_G) + Q_{out} = H_{react} + Q_{in} \quad (12)$$

$$H_{react}(T_i) = \sum_{i=react} r_i (\bar{h}_{T_a,i}^0 + \Delta \bar{h}_{T_i,i}^0) = \sum_{i=react} r_i (\bar{h}_{T_a,i}^0 + \int_{T_a}^{T_i} C_{p,i} dT) \quad (13)$$

$$H_{prod}(T_G) = \sum_{i=prod} r_i (\bar{h}_{T_a,i}^0 + \Delta \bar{h}_{T_G,i}^0) = \sum_{i=prod} r_i (\bar{h}_{T_a,i}^0 + \int_{T_a}^{T_G} C_{p,i} dT) \quad (14)$$

در اینجا H_{react} و H_{prod} به ترتیب بیانگر آنتالپی فرآورده‌ها و واکنش‌دهنده‌ها می‌باشد (kJ). همچنین، Q_{in} و Q_{out} به ترتیب نشان‌دهنده پیش‌گرمایش و هدر رفت حرارتی در فرآیند گازی‌سازی می‌باشند (kJ). T_a بیانگر دمای مرجع برحسب کلوین ($T_i = T_a$)، بیانگر آنتالپی تشکیل در حالت مرجع (۲۹۸ K و ۱ atm) بر حسب $\bar{h}_{T_a,i}^0$ ، $\Delta \bar{h}_T^0$ اختلاف آنتالپی نسبت به حالت مرجع (kJ/kmol) و C_p گرمای ویژه در فشار ثابت (kJ/kmol K) می‌باشد. آنتالپی تشکیل زیست توده را می‌توان از رابطه (۱۵) محاسبه کرد [۳۳].

$$\bar{h}_{f,b}^0 = LHV_b + \sum_{k=prod} r_k (\bar{h}_f^0)_k \quad (15)$$

که در این رابطه $(\bar{h}_f^0)_k$ آنتالپی تشکیل فرآورده k م تحت احتراق

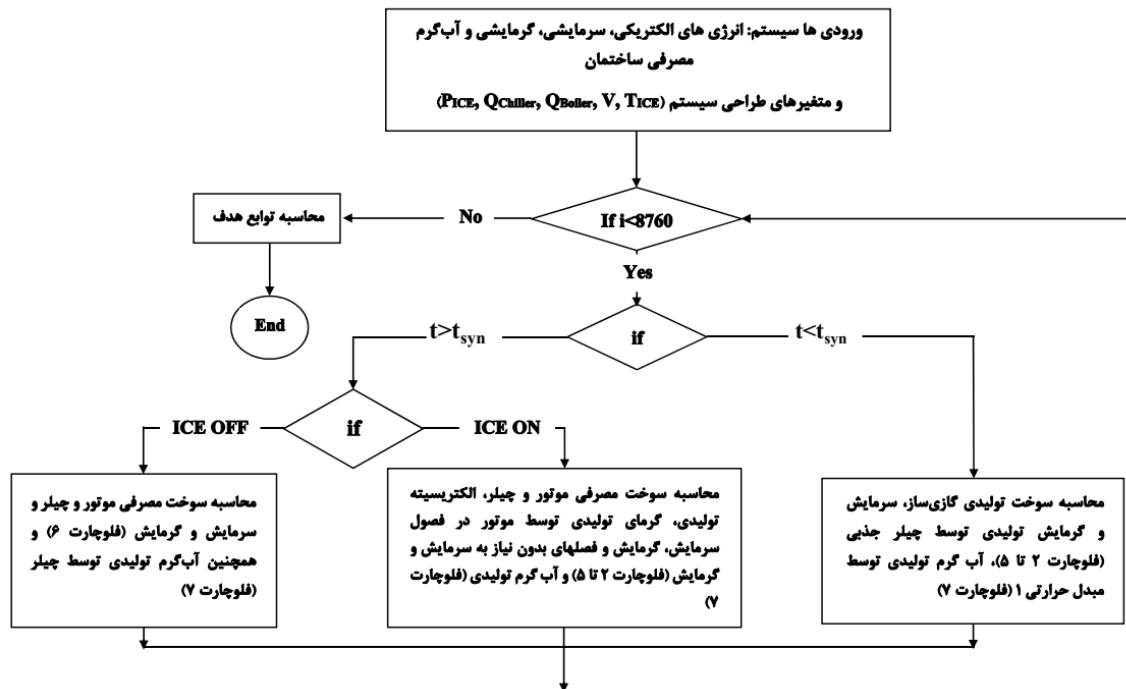
جدول ۱- صحت‌سنجی مدل‌سازی گازی‌سازی زیست توده به ازای رطوبت ۱۶٪.
Table 1. Biomass gasification modeling verification for 16% moisture

ترکیبات	مدل حاضر	[۳۶]	درصد خطا	[۳۴]	درصد خطا	[۳۵]	درصد خطا
H ₂	۱۶/۹۴	۱۶/۸۱	۰/۸	۱۶/۱۶	۴/۸	۱۷	-۰/۳
CO	۱۷/۴۸	۱۷/۸۶	-۲/۱	۱۷/۳۳	۲/۵	۱۸/۴	-۵
CH ₄	۱/۰۱	۱/۰۵	-۳/۸	۱/۰۶	-۴/۷	۱/۳	-۲/۲
CO ₂	۱۲/۳۵	۱۲/۱۰	-۲	۱۲/۳۲	۰/۲	۱۰/۰۶	۲/۲
N ₂	۵۲/۲۲	۵۲/۱۸	۰/۰۷	۵۳/۱۳	۱/۷	۵۲/۷	-۰/۹

۳- استراتژی عملکردی سیستم

در این قسمت به معرفی استراتژی عملکردی سیستم پرداخته می‌شود. برای این منظور یک سال به سه بازه زمانی سرمایه‌گذاری، گرمایش و فصول بدون سرمایه‌گذاری و گرمایش تقسیم بندی می‌گردد. در تمامی این فصول گازی‌ساز در زمان‌های اولیه صبح که تقاضای ساختمان کم می‌شود به تولید گاز می‌پردازد و موتور پس از روشن شدن در بازه زمانی مشخص شده، الکتروسیسته تولید می‌کند. موتور علاوه بر تولید الکتروسیسته به تولید آب گرم نیز می‌پردازد. همچنین گازهای خروجی از موتور نیز به منظور تولید سرمایه‌گذاری یا گرمایش در چیلر جذبی مورد استفاده قرار می‌گیرند. این نوع چیلر دارای دو ژنراتور دما بالا و دما پایین است. در ژنراتور دما بالا که به صورت یک مبدل حرارتی عمل می‌کند گرمای حاصل از گازهای داغ خروجی موتور سبب افزایش دمای محلول لیتیوم بروماید و آب شده و بخار آب و

محلول غلیظ لیتیوم بروماید و آب تولید می‌گردد. از بخار آب تولیدی جهت افزایش دمای محلول لیتیوم بروماید و آب غلیظ شده در ژنراتور دما پایین استفاده می‌شود. این فرآیندها در فصول تولید سرمایه‌گذاری استفاده می‌گردد. اما در فصول تولید گرمایش تمامی شیرهای ورودی چیلر بسته خواهد شد و تنها از ژنراتور دما بالای آن به عنوان یک مبدل حرارتی، جهت افزایش دمای آب مورد نیاز در رادیاتورهای مجتمع مسکونی استفاده خواهد شد. در واقع در فصول سرد ژنراتور دما بالای چیلر به عنوان یک مبدل حرارتی عمل کرده و با ورود آب از یک طرف و گاز تولیدی توسط موتور از طرف دیگر، آب گرم مورد نیاز جهت گرمایش ساختمان تولید خواهد شد. شکل ۲ استراتژی عملکردی سیستم را نشان می‌دهد. در ادامه به تشریح سیستم در فصول مختلف پرداخته می‌شود.



شکل ۲ استراتژی عملکردی سیستم طراحی شده
Fig. 2. Performance strategy of the designed system

۱-۳- فصول سرمایه‌ش

۱-۱-۳- زمان روشن بودن موتور

ابتدا مقدار حرارت تولیدی توسط گاز خروجی موتور احتراق داخلی در زمانی که موتور روشن می‌باشد (Q_{Exgas}) و سرمایه‌ش قابل تولید توسط چیلر جذبی، محاسبه می‌گردد. فلوچارت ۲ تمامی مراحل محاسبه سرمایه‌ش تولیدی توسط سیستم را نشان می‌دهد.

$$Q_{Evagas} = COP \times Q_{ExGas} \quad (21)$$

$$Q_{ExGas} = \dot{m}_{gas,ex} (h_{10} - h_{11}) \quad (22)$$

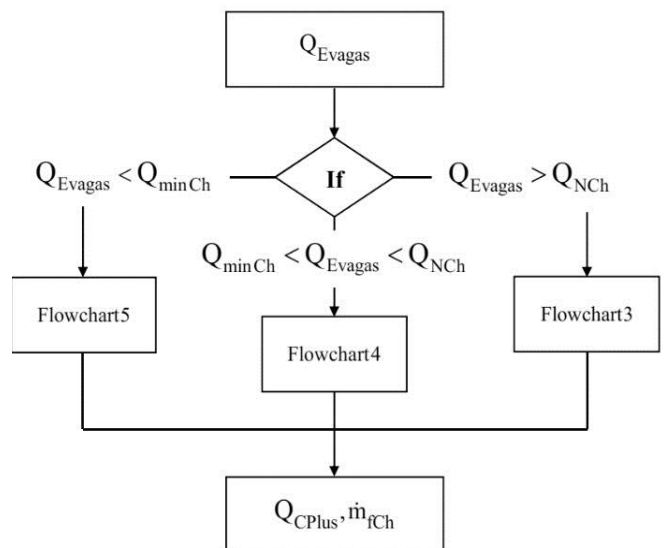
سیس با توجه به توان نامی چیلر و گرمای مورد نیاز آن برحسب این توان نامی داریم:

۱. اگر حرارت تولیدی از حرارت نامی چیلر (Q_{NCh}) بیشتر باشد:

• اگر سرمایه‌ش مورد نیاز در محل ($Q_{Cooling}$) بیشتر از توان نامی چیلر باشد، چیلر با استفاده از حرارت تولیدی توسط موتور تا توان نامی خود سرمایه‌ش تولید می‌کند. در این حالت سرمایه‌ش کمتر از نیاز تولید می‌شود و سرمایه‌ش مازاد (Q_{CPlus}) مورد نیاز است.

$$Q_{CPlus} = Q_{Cooling} - Q_{NCh} \quad (23)$$

• اگر سرمایه‌ش مورد نیاز در محل، کمتر از توان نامی چیلر و بیشتر از کمترین سرمایه‌ش قابل تولید توسط چیلر (Q_{minCh}) باشد،



شکل ۳ فلوچارت ۲، محاسبه سرمایه‌ش تولیدی توسط سیستم
Fig. 3. Flowchart 2, calculation of cooling generated by the system

تمامی سرمایه‌ش مورد نیاز توسط حرارت تولیدی توسط موتور تأمین می‌گردد [۳۷].

$$Q_{minCh} = 0.4Q_{NCh} \quad (24)$$

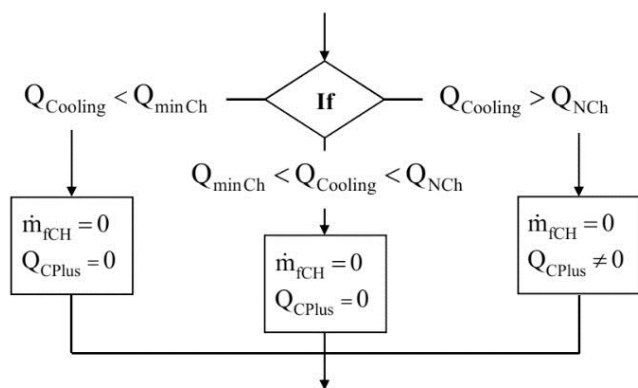
• اگر سرمایه‌ش مورد نیاز در محل، کمتر از کمترین سرمایه‌ش قابل تولید توسط چیلر باشد، چیلر تا کمترین توان خود به تولید سرمایه‌ش می‌پردازد. در واقع در این حالت، بیشتر از سرمایه‌ش مورد نیاز، تولید می‌شود.

۲. اگر حرارت تولیدی توسط موتور بین حرارت نامی چیلر و کمترین حرارت مورد نیاز آن باشد:

اگر سرمایه‌ش مورد نیاز در محل بیشتر از توان نامی چیلر باشد، چیلر مقداری از سرمایه‌ش تولیدی خود را از گرمای موتور تأمین می‌کند و مابقی را تا توان نامی خود از سوخت تولیدی توسط گازی‌ساز می‌گیرد. در این حالت سرمایه‌ش کمتر از نیاز تولید می‌شود.

$$\dot{m}_{fCh} = \frac{Q_{fCh}}{LHV_f} \quad (25)$$

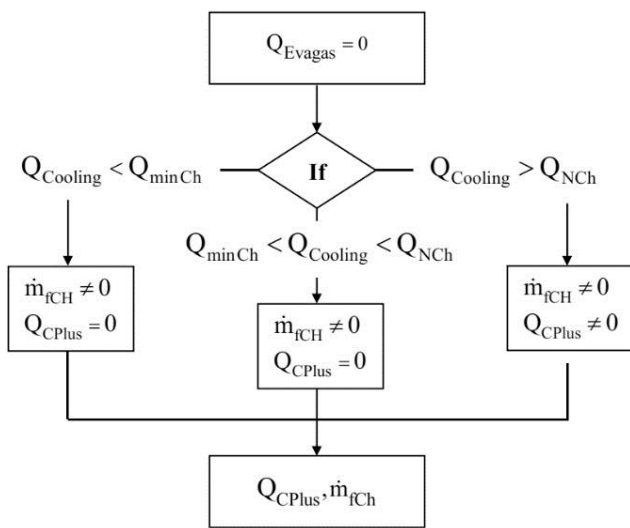
• اگر سرمایه‌ش مورد نیاز در محل، کمتر از توان نامی چیلر و بیشتر از کمترین سرمایه‌ش قابل تولید توسط چیلر باشد، دو حالت ممکن است اتفاق افتد. حالت اول زمانی است که سرمایه‌ش مورد نیاز بیشتر از سرمایه‌ش تولیدی توسط گرمای موتور باشد که در این حالت چیلر حتماً مقداری سوخت از مخزن گاز دریافت می‌کند. حالت دوم نیز زمانی است که سرمایه‌ش مورد نیاز کمتر از سرمایه‌ش تولیدی توسط موتور باشد که در این حالت تمامی سرمایه‌ش مورد نیاز توسط گرمای موتور تأمین می‌گردد.



شکل ۴: فلوچارت ۳
Fig. 4. Flowchart 3

سوخت تولیدی تأمین می‌گردد. در فلوجارت ۶ این استراتژی نشان داده شده است.

به منظور تولید آب‌گرم مصرفی در این فصل، در زمان تولید گاز که موتور خاموش می‌باشد، آب‌گرم تنها توسط مبدل حرارتی ۱ (Q_{HW1}) تولید می‌شود. در زمانی که موتور روشن می‌شود از آب خنک‌کن موتور، توسط مبدل حرارتی ۲ (Q_{HW2}) برای تولید آب‌گرم استفاده می‌گردد. و در زمان خاموشی سیستم تولید گاز و موتور، آب‌گرم توسط بویلری (Q_{HW3}) که از سوخت تولیدی سیستم تغذیه می‌کند تولید می‌شود (فلوجارت ۷).



شکل ۷. تولید سرمایش هنگام خاموش بودن موتور
Fig. 7. Generation of cooling when the engine turns off

۲-۳- فصول گرمایش

۱-۲-۳- زمان روشن بودن موتور

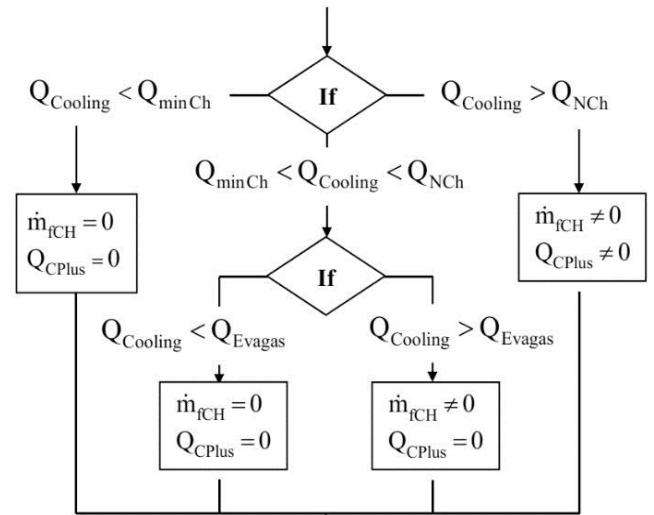
ابتدا مقدار حرارت تولیدی توسط گاز خروجی موتور احتراق داخلی در زمانی که موتور روشن می‌باشد، محاسبه می‌گردد. تمامی مراحل تولید گرمایش توسط چیلر به مانند تولید سرمایش است که در شکل ۳ نشان داده شده است.

با توجه به توان نامی چیلر و گرمای مورد نیاز آن برحسب این توان نامی داریم:

۱. اگر حرارت تولیدی از حرارت نامی چیلر بیشتر باشد:

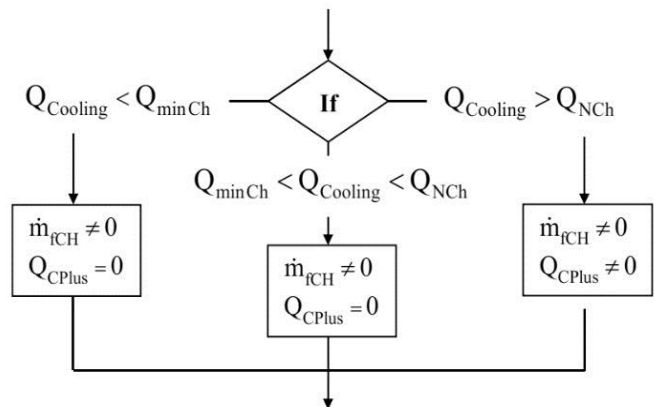
• اگر گرمایش مورد نیاز در محل بیشتر از گرمایش نامی چیلر باشد، به اندازه توان نامی چیلر، گرمایش توسط گرمای موتور ورودی به چیلر تأمین می‌گردد. در این حالت گرمای تولیدی از گرمای مورد

• اگر سرمایش مورد نیاز در محل، کمتر از کمترین سرمایش قابل تولید توسط چیلر باشد، چیلر تا کمترین توان خود توسط گرمای موتور تولید سرمایش می‌کند که در این حالت سرمایش تولیدی مازاد بر نیاز است.



شکل ۵: فلوجارت ۴
Fig. 5. Flowchart 4

۳. اگر حرارت تولیدی توسط موتور از کمترین حرارت مورد نیاز چیلر کمتر باشد موتور نمی‌تواند چیلر را روشن نماید. بنابراین تمام حرارت مورد نیاز چیلر توسط گاز تولیدی تأمین می‌گردد.



شکل ۶: فلوجارت ۵
Fig. 6. Flowchart 5

۲-۱-۳- زمان خاموش بودن موتور

در حالتی که موتور خاموش باشد، چه در زمان تولید گاز و چه در زمان عدم تولید گاز، به مانند حالت ۳، موتور نقشی در تأمین حرارت مورد نیاز چیلر ندارد و تمامی توان مورد نیاز چیلر توسط

نیاز از موتور گرما دریافت می‌کند.

• اگر گرمایش مورد نیاز در محل کمتر از کمترین گرمای قابل تولید توسط چیلر باشد، چیلر به اندازه این کمترین مقدار گرما تولید خواهد کرد. در واقع در این حالت گرمایش تولیدی مازاد بر نیاز خواهد بود.

۳. اگر حرارت تولیدی توسط موتور از کمترین حرارت مورد نیاز چیلر کمتر باشد موتور نمی‌تواند چیلر را روشن نماید. بنابراین تمام حرارت مورد نیاز چیلر توسط گاز تولیدی تأمین می‌گردد.

۳-۲-۲- زمان خاموش بودن موتور

در حالتی که موتور خاموش باشد، چه در زمان تولید گاز و چه در زمان عدم تولید گاز، به مانند حالت ۳، موتور نقشی در تأمین حرارت مورد نیاز چیلر ندارد و تمامی توان مورد نیاز چیلر توسط سوخت تولیدی تأمین می‌گردد.

در این فصل نیز به مانند فصل سرمایش می‌توان آب گرم را جهت مصرف ساختمان تولید نمود.

۳-۳- فصول بدون نیاز به سرمایش و گرمایش

در زمان‌هایی که ساختمان نیاز سرمایشی و گرمایشی نداشته باشد، سیستم تنها به تولید آب گرم می‌پردازد. در این زمان‌ها، هنگام روشن بودن سیستم تولید گاز علاوه بر مبدل حرارتی ۱، آب گرم توسط بویلر نیز تأمین می‌گردد. در این حالت بویلر با سوزاندن مقداری از گاز

نیاز در محل کمتر خواهد بود و گرمای مازاد مورد نیاز است.

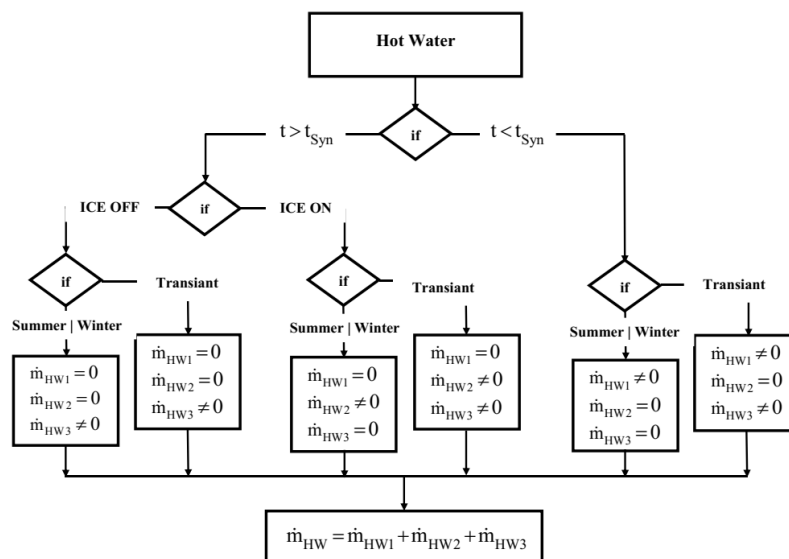
• اگر گرمایش مورد نیاز در محل کمتر از گرمایش نامی تولیدی توسط چیلر و بیشتر از کمترین گرمایش قابل تولید توسط چیلر باشد، تمام گرمایش مورد نیاز توسط چیلر از طریق گرمای تولیدی موتور تأمین می‌گردد.

• اگر گرمایش مورد نیاز در محل از مقدار کمترین گرمایش قابل تولید توسط چیلر کمتر باشد، چیلر به اندازه کمترین توان خود گرمایش تولید می‌کند. در این صورت گرمای مازاد بر نیاز، تولید خواهد شد.

۲. اگر حرارت تولیدی توسط موتور بین حرارت نامی چیلر و کمترین حرارت مورد نیاز آن باشد:

• اگر گرمایش مورد نیاز در محل از گرمایش نامی چیلر بیشتر باشد، مقدار از گرما توسط حرارت موتور تأمین خواهد شد و مابقی تا توان نامی چیلر توسط گاز تولیدی تأمین می‌گردد. در این حالت گرمایش تولیدی کمتر از گرمایش مورد نیاز خواهد بود.

• اگر گرمایش مورد نیاز در محل کمتر از گرمایش نامی تولیدی توسط چیلر و بیشتر از کمترین گرمایش قابل تولید توسط چیلر باشد، دو حالت رخ خواهد داد. حالت اول این است که گرمایش مورد نیاز در محل بیشتر از گرمایش قابل تأمین توسط موتور باشد که در این صورت مابقی گرمای مورد نیاز توسط سوخت تولیدی تأمین خواهد شد. حالت دوم این است که گرمایش مورد نیاز کمتر گرمای قابل تأمین توسط موتور باشد، در این حالت چیلر به اندازه گرمایش مورد



شکل ۸. فلوجارت تولید آب گرم مصرفی در فصول مختلف سال

Fig. 8. Flowchart for the generation of hot water used in different seasons of the year

$$m_{HWZ} = m_{HotWater} - m_{HWdemand} > 0 \quad (26)$$

۴- مطالعه موردی

به منظور بررسی سیستم انرژی معرفی شده و استراتژی عملکردی طراحی شده، یک مجتمع مسکونی ۱۰ واحد در نظر گرفته می‌شود. شکل ۱۰ نیازهای الکتریکی ساختمان در فصول سرد و گرم سال نشان می‌دهد. در این ساختمان تنها نیازهای الکتریکی تجهیزات برقی ساختمان در نمودار نشان داده است. زیرا سایر نیازهای ساختمان شامل نیازهای گرمایشی، سرمایشی و آب گرم مصرفی توسط چیلر جذبی، موتور احتراق داخلی و بویلر تأمین می‌شود. توان نامی موتور احتراق داخلی (E_{ICE})، توان نامی چیلر (Q_{NCh})، توان نامی بویلر پشتیبان تولید آب گرم (Q_{Boiler})، حجم مخزن ذخیره آب گرم (V) و ساعت روشن شدن موتور احتراق داخلی (T_{ICE}) به عنوان متغیرهای طراحی در نظر گرفته می‌شود. جدول ۲ و ۳ محدوده تغییرات این متغیرها را

جدول ۲: متغیرهای طراحی سیستم

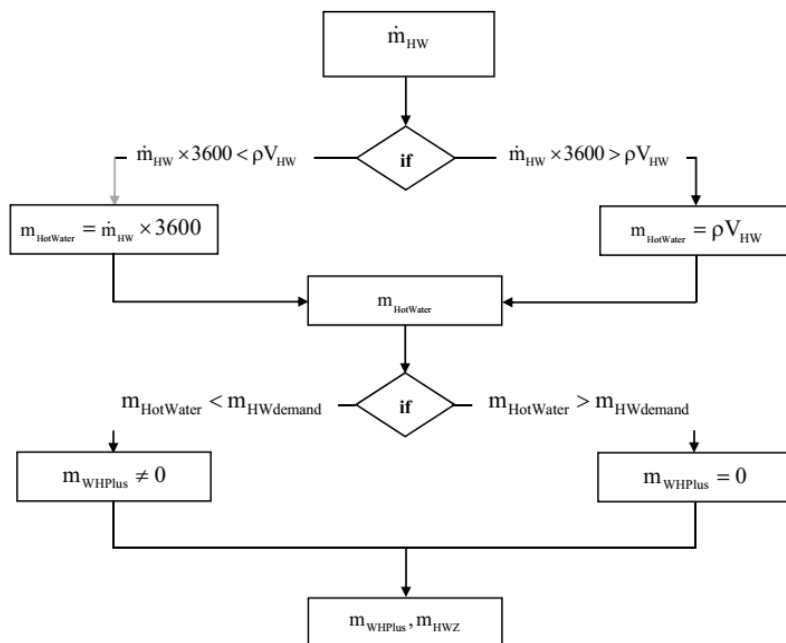
Table 2. Design variables of the system

متغیر (واحد)	بازه
توان موتور (کیلووات)	۱۰-۱۰۰
توان سرمایشی چیلر جذبی (کیلووات)	۱۰-۱۰۰
توان گرمایشی بویلر (کیلووات)	۱۰-۱۰۰
حجم منبع ذخیره آب گرم (مترمکعب)	۱-۱۰
حجم منبع ذخیره آب گرم (مترمکعب)	۷-۱۹

تولیدی اقدام به تولید آب گرم می‌کند. هنگامی که هم گازی تولید نمی‌گردد و هم موتور خاموش است، بویلر توسط گاز تولیدی توسط سیستم گازی‌ساز تا بیشترین توان خود به تولید آب گرم می‌پردازد. در هنگامی خاموشی سیستم تولید گاز و روشن بودن موتور علاوه بر آب گرم تولیدی توسط موتور و مبدل حرارتی ۲، آب گرم توسط بویلر تولید می‌شود. در زمانی که هم سیستم گاز و هم موتور خاموش هستند، بویلر توسط گاز ذخیره شده در منبع گاز و سوزاندن آن به تولید آب گرم می‌پردازد. شکل ۸ فلوجارت تولید آب گرم مصرفی را در فصول مختلف سال نشان می‌دهد.

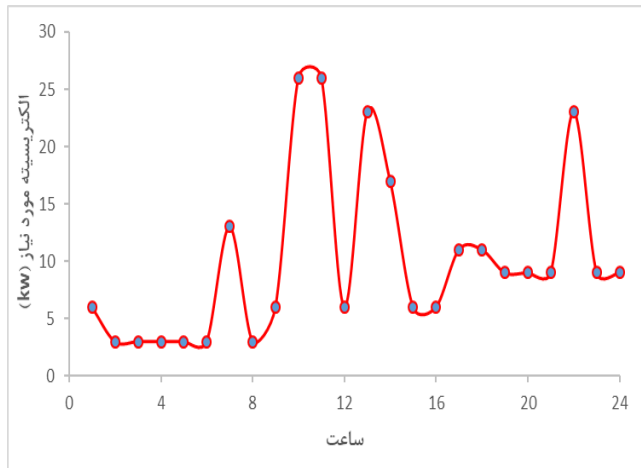
۳-۴- بررسی حجم منبع ذخیره

پس از محاسبه آب گرم تولیدی در هر ساعت ($\dot{m}_{HW} \times 3600$) در فصول مختلف باید مقدار آن را با حجم مخزن ذخیره آب مقایسه نمود، در صورتی که حجم این آب تولیدی از حجم منبع بیشتر باشد قدری از آب گرم تولیدی هدر خواهد رفت. در مرحله دیگر باید مقدار آب گرم ذخیره شده ($m_{HotWater}$) و مقدار آب گرم مورد نیاز در هر ساعت ($m_{HWdemand}$) باهم مقایسه گردد. اگر آب گرم ذخیره شده بیشتر از آب گرم مورد نیاز باشد مابقی آب گرم برای ساعت بعدی (m_{HWZ}) در مخزن باقی خواهد ماند. شکل ۹ فلوجارت این بررسی را نشان می‌دهد.

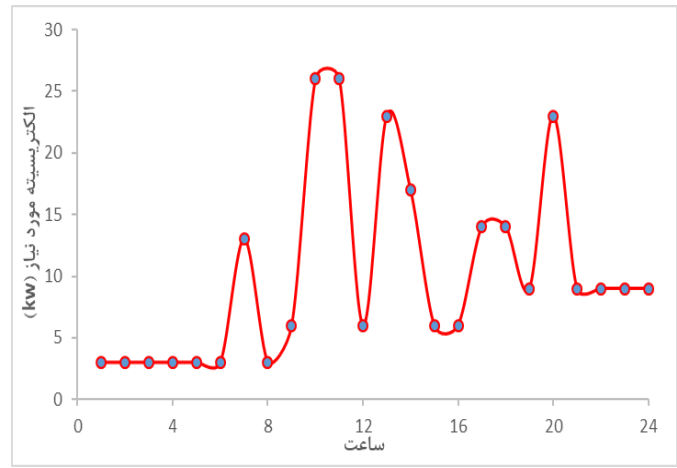


شکل ۹. بررسی حجم منبع ذخیره آب گرم و مقدار آب گرم تولیدی

Fig. 9. Examining the volume of hot water storage tank and the amount of hot water produced



(ب)



(الف)

شکل ۱۰. الکتریسیته مورد نیاز ساختمان الف) فصول سرد ب) فصول گرم.
Fig. 10. Electricity required for building a) cold seasons b) hot seasons

۵- تحلیل حساسیت سیستم

به منظور تحلیل حساسیت سیستم ابتدا باید توابع هدفی برای آن معرفی شود. در اینجا توابع هدف توازن توان خروجی و ورودی سالیانه $(P_{Balance})$ ، سود خالص سالیانه (AAB) و عدم سرمایه‌گذاری، گرمایش و آب‌گرم تولیدی $(LCHWSP)$ مورد بررسی قرار می‌گیرند. تابع توازن انرژی الکتریکی تفاوت بین انرژی الکتریکی ورودی سالیانه به ساختمان از طریق شبکه توزیع برق (P_{Import}) و انرژی صادر شده از سیستم انرژی به شبکه توزیع برق (P_{Export}) را نشان می‌دهد.

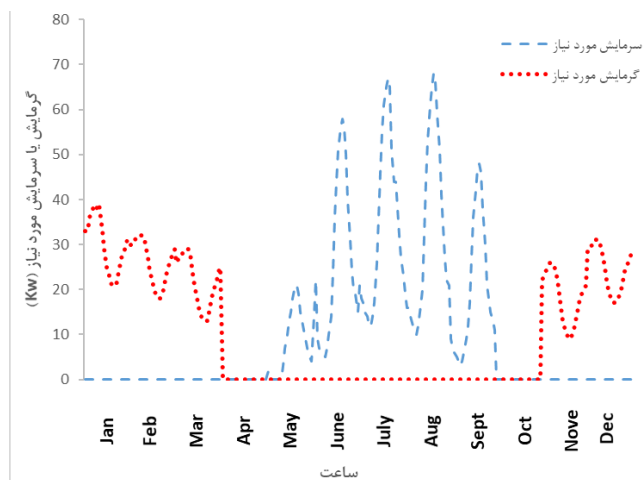
$$P_{Balance} = P_{Import} - P_{Export} \quad (27)$$

تابع سود خالص سالیانه سیستم در واقع تفاوت بین هزینه‌های مثبت سیستم مانند الکتریسیته تولیدی (E_{ICE}) ، گرمایش (H_{Cycle})

نشان می‌دهد. در ادامه به بررسی تغییرات این متغیرها بر روی توابع هدف پرداخته شده است. شکل ۱۱ نیازهای گرمایشی و سرمایشی را در ساعات در طول یک سال را نشان می‌دهد. لازم به ذکر است از هر ماه یک روز به عنوان نماینده در نظر گرفته شده است که اطلاعات آن حاصل از متوسط‌گیری در طول آن ماه می‌باشد.

جدول ۳: دمای نقاط مختلف سیستم (پارامتر ورودی)
Table 3. Temperature of different parts of the system (input parameter)

۴۷۳ (نقطه ۴)	گاز خروجی مبدل حرارتی ۱ (K)
۲۸۰ (نقطه ۲۰)	آب سرد (K)
۳۳۳ (نقطه ۱۹)	آب گرم (K)
۲۹۸-۳۳۳ (نقطه ۱۳ و ۱۴)	آب ورودی و خروجی مبدل ۱ (K)
۲۹۸-۳۳۳ (نقطه ۱۵ و ۱۶)	آب ورودی و خروجی مبدل ۲ (K)
۳۹۳ (نقطه ۱۱)	گاز خروجی از چیلر (K)



شکل ۱۱. تگرمایش و سرمایش مورد نیاز ساختمان در ماه‌های مختلف سال
Fig. 11. Heating and cooling required for buildings in different months of the year

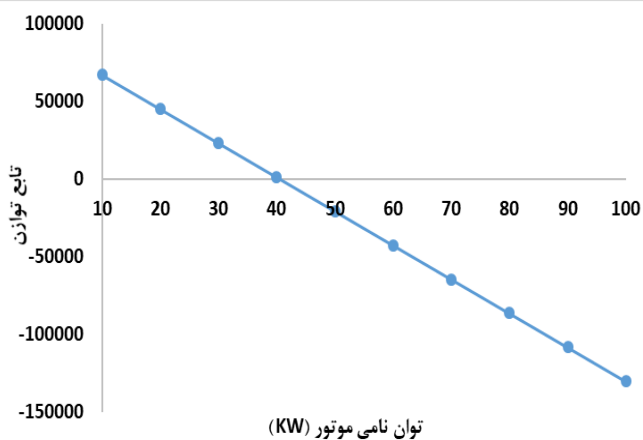
جدول ۴ متغیرهای اقتصادی سیستم
Table 4. Economic variables of the system

متغیر (واحد)	بازه
فروش الکتریسیته $\varphi_{e,b}$ (\$ / kW.h)	۰/۰۶
خرید الکتریسیته $\varphi_{e,s}$ (\$ / kW.h)	۰/۱
الکتریسیته تولیدی φ_e (\$ / kW.h)	۰/۰۶
گرمایش تولیدی φ_h (\$ / kW.h)	۰/۰۴
سرمایش تولیدی φ_c (\$ / kW.h)	۰/۰۴
هزینه سوخت φ_f (\$ / kg)	۰/۰۴
نرخ بهره (%)	۱۲
طول عمر (سال)	۲۰

نظر گرفته می‌شود و تحلیل حساسیت بر اساس این مقدار انجام شده است. این مقدار پیش فرض برای توان نامی موتور، توان نامی چیلر و توان بویلر ۵۰ کیلووات، برای حجم مخزن ذخیره آب گرم ۵ مترمکعب و برای ساعت روشن شدن موتور، ساعت ۱۹ در نظر گرفته می‌شود.

۶-۱- تغییر توان نامی موتور

شکل ۱۲ تغییرات تابع توازن را بر حسب تغییرات توان نامی موتور نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان نامی موتور این تابع کاهش خواهد یافت. این امر به این دلیل است که با افزایش توان تولیدی موتور، میزان الکتریسیته مازاد بر نیاز ساختمان افزایش خواهد یافت بنابراین الکتریسیته انتقال یافته به خطوط توزیع نیز افزایش می‌یابد که باعث کاهش تابع توازن خواهد شد.



شکل ۱۲. تغییر تابع توازن بر حسب تغییر در توان نامی موتور
Fig. 12. Changing the balance function in terms of change in engine nominal power

سرمایش (C_{Cycle}) ، آب گرم تولیدی سیستم (HW_{Cycle}) ، الکتریسیته فروخته شده (E_s) و هزینه‌های منفی سیستم مانند برق دریافتی از شبکه (E_b) ، هزینه سوخت، هزینه خریداری $(EUAC)$ و تعمیر و نگهداری (M) تجهیزات سیستم می‌باشد.

$$AAB = \sum_{n=1}^N \left[\begin{array}{l} E_{ICE} \times \varphi_e + C_{Cycle} \times \varphi_c + H_{Cycle} \times \varphi_h \\ + HW_{Cycle} \times \varphi_{HW} - E_b \times \varphi_{e,b} + E_s \times \varphi_{e,s} \\ - \dot{m}_f \times LHV_f \times \varphi_f \end{array} \right] \times \tau_n \quad (28)$$

$$-(M+EUAC)_{ICE} \times E_{ICE} - (M+EUAC)_{Chiller} \times C_{Chiller} - (M+EUAC)_{Boiler} \times H_{Boiler} - 1.06\beta \times C_{Gasifier}$$

در تابع AAB مقدار هزینه معادل سالیانه $(EUAC)$ از رابطه (۲۹) به دست می‌آید. که در آن R هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سالیانه، C هزینه خرید تجهیزات سیستم، β ضریب بازگشت سرمایه، ny طول عمر، i ضریب بهره و SV ارزش اسقاطی سیستم می‌باشد. برای محاسبه این پارامترهای از مراجع [۳۸ و ۳۹] استفاده می‌شود.

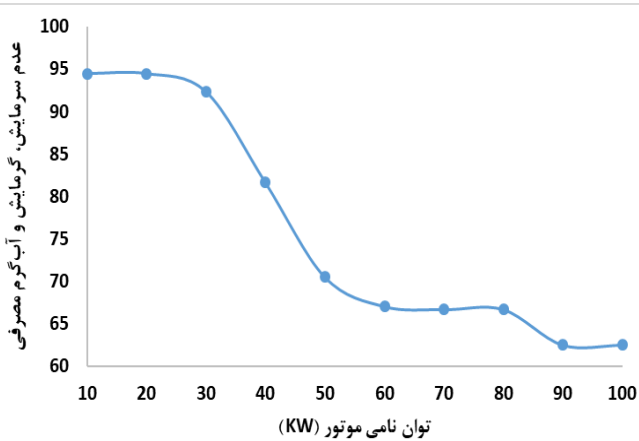
$$EUAC = \beta \times C - SV \times \frac{i}{(1+i)^{ny} - 1} \quad (29)$$

تابع عدم سرمایش، گرمایش و آب گرم تولیدی در واقع بیانگر درصد ساعاتی از سال است که سیستم توانایی تولید تقاضاهای سرمایش، گرمایش و آب گرم مصرفی و یا حداقل یکی از این موارد را ندارد. در این تابع C_{Supply} ، H_{Supply} و HW_{Supply} به ترتیب سرمایش، گرمایش و آب گرم تولیدی توسط سیستم می‌باشد. همچنین C_{dem} ، H_{dem} و HW_{dem} به ترتیب سرمایش، گرمایش و آب گرم مورد تقاضای خانه می‌باشد. N نیز تعداد ساعات سال را نشان می‌دهد. جدول ۴ متغیرهای اقتصادی سیستم را نشان می‌دهد.

$$LCHWSP = \frac{\sum_{n=1}^N \text{hours} \left[\begin{array}{l} C_{supply}(n) < C_{dem}(n) \text{ or } \\ H_{supply}(n) < H_{dem}(n) \text{ or } \\ HW_{supply}(n) < HW_{dem}(n) \end{array} \right]}{N} \times 100 \quad (30)$$

۶- نتایج تحلیل سیستم مورد مطالعه

به منظور تحلیل حساسیت سیستم با تغییر در متغیرهای طراحی معرفی شده، نتایجی حاصل شد که در ادامه به بررسی آن‌ها پرداخته شده است. برای هر یک از متغیرهای طراحی یک مقدار پیش فرض در



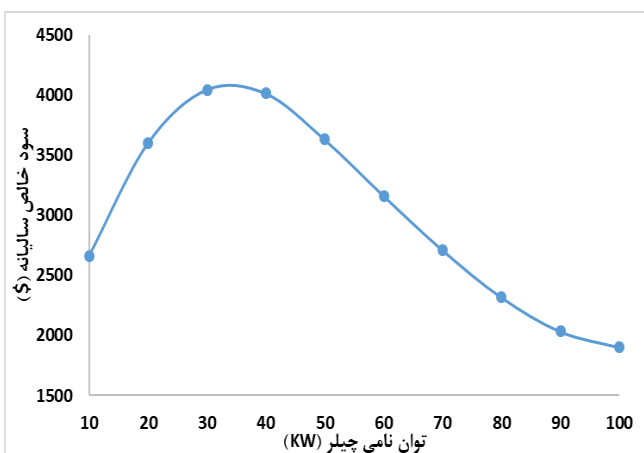
شکل ۱۴. تغییرات تابع عدم سرمایه‌ش، گرمایش و آب گرم مصرفی برحسب توان نامی موتور

Fig. 14. Changes in the loss of cooling, heating and hot water supply probability in terms of engine nominal power

افزایش خواهد یافت.

۲-۶- تغییر توان نامی سرمایه‌ش چیلر

تغییر در توان نامی چیلر تأثیری روی تابع توازن ندارد، زیرا تابع توازن رابطه مستقیم با توان تولیدی مازاد و توان دریافتی از شبکه دارد که تغییر در توان چیلر هیچ تأثیری روی این دو پارامتر نخواهد داشت. شکل ۱۴ تأثیر تغییرات سرمایه‌ش چیلر جذبی بر تابع سود خالص سالیانه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود. ابتدا این تابع افزایش می‌یابد و سپس کاهش خواهد یافت. این به دلیل آن است که تا رسیدن به سرمایه‌ش یا گرمایش مورد نیاز ساختمان، با افزایش توان نامی چیلر میزان سرمایه‌ش تولیدی افزایش می‌یابد و به سبب آن سود سیستم افزایش خواهد یافت. اما اگر توان چیلر از

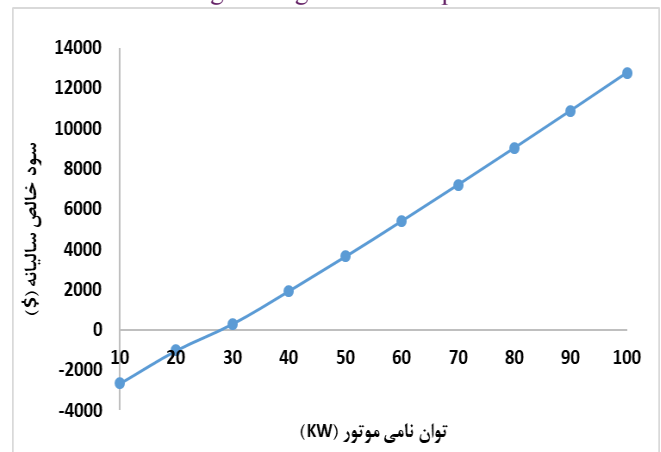


شکل ۱۵. تغییرات سود خالص سالیانه سیستم برحسب توان نامی چیلر

Fig. 15. Changes in annual actual benefit of the system in terms of chiller nominal power

شکل ۱۳ تأثیر تغییر توان نامی موتور بر سود خالص سالیانه را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان نامی مقدار سود خالص ماهیانه افزایش یافته است. این امر به دلیل افزایش تولید الکتریسیته، سرمایه‌ش تولیدی به وسیله گاز داغ خروجی از موتور در فصول گرم و همچنین افزایش تولید آب گرم در مبدل‌های ۱ و ۲ می‌باشد. با افزایش توان نامی موتور میزان تقاضای سوخت آن افزایش خواهد یافت. با افزایش سوخت ورودی به موتور میزان تولید گاز در گازی‌ساز نیز افزایش خواهد یافت که این امر سبب افزایش تولید آب گرم در مبدل حرارتی ۱ خواهد شد. همچنین با افزایش توان نامی موتور میزان آب گرم تولیدی در مبدل حرارتی ۲ به دلیل افزایش گرمای تولیدی توسط موتور افزایش خواهد یافت.

شکل ۱۳. تغییر سود خالص سالیانه بر حسب تغییر در توان نامی موتور
Fig. 13. Changing the annual actual benefit in terms of change in engine nominal power



در شکل ۱۴ تغییرات تابع هدف عدم سرمایه‌ش، گرمایش و آب گرم مصرفی، بر حسب توان نامی موتور نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش توان نامی موتور، این تابع کاهش می‌یابد. دلیل این امر آن است که با افزایش توان نامی مقدار سرمایه‌ش تولیدی در فصول گرم افزایش می‌یابد به همین دلیل کمبود سرمایه‌ش در این فصول کاهش خواهد یافت. همچنین با افزایش توان تولیدی موتور میزان آب گرم تولیدی توسط آن در مبدل حرارتی افزایش خواهد یافت. علاوه بر این، با افزایش توان نامی موتور میزان سوخت درخواستی موتور افزایش می‌یابد. با افزایش سوخت درخواستی، سوخت تولیدی توسط گازی‌ساز نیز افزایش خواهد یافت که با افزایش سوخت تولیدی گازی‌ساز میزان آب گرم تولیدی در مبدل حرارتی ۱

سود خالص سالیانه ایجاد نخواهد شد. زیرا حجم مخزن رابطه‌ای با تولید الکتریسیته سیستم ندارد و از طرفی هزینه خرید مخزن نسبت به هزینه سایر تجهیزات سیستم بسیار کمتر می‌باشد و قابل چشم پوشی است، بنابراین تأثیری رو تابع سود خالص سالیانه ندارد. به مانند شکل ۱۴ با افزایش حجم مخزن ذخیره آب گرم میزان کمبود آب گرم مصرفی در ساختمان کاهش می‌یابد و به دنبال آن این تابع هدف کاهش خواهد یافت.

۶-۵- تغییر در زمان روشن شدن موتور

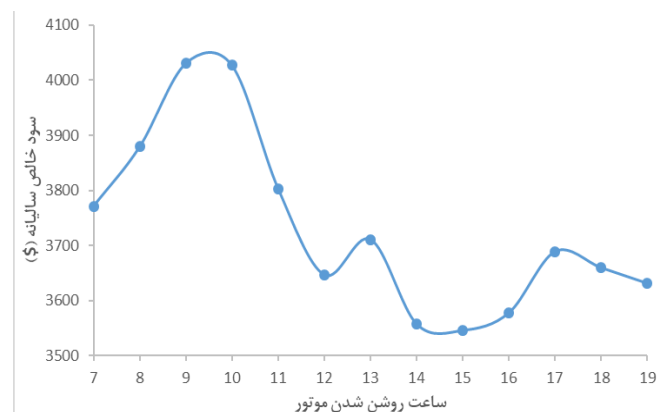
تغییرات در زمان روشن شدن سیستم تأثیری بر تابع توازن الکتریسیته ندارد. زیرا با توجه مستقل بودن الکتریسیته مورد نیاز ساختمان از ساعت روشن و خاموش شدن موتور، الکتریسیته ورودی و خروجی از سیستم در کل سال ثابت می‌ماند. شکل ۱۶ تغییرات سود خالص سالیانه سیستم را بر حسب ساعت روشن شدن موتور را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین سود سالیانه سیستم هنگامی اتفاق می‌افتد که موتور در ساعت ۹ یا ۱۰ روشن شود. این امر به دلیل افزایش تقاضای ساختمان در این ساعات از روز می‌باشد. بنابراین با روشن شدن سیستم در این ساعات تقاضاهای خانه توسط سیستم انرژی تأمین می‌گردد و الکتریسیته دریافتی از شبکه توزیع به کمترین مقدار خود می‌رسد و سود خالص سیستم افزایش می‌یابد. تغییر در ساعت روشن شدن موتور تأثیر چندانی در تابع هدف عدم سرمایه‌ش، گرمایش و آب گرم مصرفی ندارد، زیرا این تابع با الکتریسیته تولیدی سیستم هیچ رابطه‌ای ندارد بنابراین ساعت روشن یا خاموش بودن موتور تأثیری بر روی آن نخواهد داشت.

با توجه به نتایج به دست آمده می‌توان نتیجه گرفت، با افزایش توان ورودی موتور روشن کردن موتور در نزدیکی ساعات اوج مصرف علاوه بر کاهش تابع توازن می‌توان به افزایش سود خالص سالیانه نیز دست یافت. افزایش توان نامی چیلر تا نزدیکی تقاضای سرمایه‌ش و گرمایشی خانه می‌توان به سود خالص بالاتری دست یافت. افزایش توان نامی بویلر و حجم مخزن ذخیره آب گرم سبب افزایش تولید آب گرم سیستم خواهد شد که به سبب آن تابع هدف عدم سرمایه‌ش، گرمایش و آب گرم مصرفی کاهش چشمگیری خواهد داشت. بنابراین با افزایش توان موتور، روشن شدن موتور در نزدیکی ساعات اوج مصرف، استفاده از چیلر جذبی با توانی در نزدیکی توان سرمایه‌ش

محدوده سرمایه‌ش تولیدی سیستم خارج شود و بیشتر گردد به دلیل تحمیل هزینه اضافی به سیستم ناشی از افزایش توان چیلر میزان سود سیستم کاهش خواهد یافت و سرمایه‌ش تولیدی اضافی هر خواهد رفت. به مانند تغییر در توان نامی موتور با افزایش توان نامی چیلر میزان این تابع عدم سرمایه‌ش، گرمایش و آب گرم مصرفی، کاهش خواهد یافت. دلیل این امر افزایش سرمایه‌ش و گرمایش تولیدی توسط چیلر می‌باشد که باعث کاهش تعداد ساعاتی خواهد شد که سیستم توانایی پاسخ به تقاضای سرمایه‌ش و گرمایشی ساختمان را ندارد.

۶-۳- تغییر توان نامی بویلر

با تغییر در توان گرمایشی بویلر تغییری در تابع توازن الکتریسیته ایجاد نمی‌شود، زیرا تابع توازن تنها به الکتریسیته دریافتی و صادر شده بستگی دارد. به مانند شکل ۱۳ با افزایش توان نامی بویلر مقدار تابع سود سالیانه افزایش یافته است. دلیل این امر، افزایش مقدار آب گرم تولیدی است که سبب افزایش تابع سود خواهد شد. بکارگیری بویلر باعث می‌شود که در زمان‌های خاموشی موتور و گازی‌ساز که مبدل‌های حرارتی ۱ و ۲ هیچ آب گرمی تولید نمی‌کنند نیز آب گرم همچنان تولید شود و سیستم با مشکل کمبود آب گرم مواجه نگردد. به مانند شکل ۱۴ با افزایش توان بویلر، مقدار این تابع کاهش خواهد یافت. دلیل این امر افزایش مقدار آب گرم تولیدی و کاهش کمبود آن در سیستم است.



شکل ۱۶. تغییرات سود خالص سالیانه سیستم بر حسب ساعت روشن شدن موتور
Fig. 16. Changes in annual actual benefit of the system in terms of engine turning on time

۶-۴- تغییر در حجم منبع ذخیره آب

با افزایش حجم مخزن ذخیره آب گرم تغییری در توابع توازن و

فهرست علائم

علائم انگلیسی

AAB	سود خالص سالیانه، \$
C	هزینه خرید تجهیزات، \$
COP	ضریب عملکرد چیلر
E	الکتريسيته، W
H	آنتالپی، kJ / kg
i	ضریب بهره، %
LHV	ارزش حرارتی، MJ/kg
M	جرم مولی، g / mol
MC	درصد رطوبت، %
M	دبی جرمی، kg / s
SV	هزینه اسقاطی، \$
ny	طول عمر
R	تعداد مول
V	حجم، m ³
P	توان، W
Q	گرما، J
زیر نویس	
Biomass	زیست توده
balance	توازن
Cooling	خنک کاری
CPlus	خنک کردن اضافی مورد نیاز
Export	صادر شده
exgas	گاز خروجی
minCh	کمترین توان چیلر
NCh	توان نامی چیلر
fCh	سوخت چیلر
HW	آب گرم
HWdemand	آب گرم مورد نیاز
HWz	آب گرم مازاد
Import	دریافتی
prod	فرآورده
react	واکنش دهنده

مراجع

- [1] U. Ijaz Dar, I. Sartori, L. Georges, V. Nov, Advanced control of heat pumps for improved flexibility of Net-ZEB towards the grid, *Energy and Buildings*, 69 (2014) 74-84.
- [2] Y. Lu, S. Wang, C. Yan, K. Shan, Impacts of renewable energy system design inputs on the performance robustness of net zero energy buildings, *Energy*, 93 (2015) 1595-1606.
- [3] C. Good, I. Andresen, A. Grete Hestnes, Solar

و گرمایشی مورد نیاز ساختمان و افزایش توان بویلر و حجم مخزن ذخیره آب گرم، علاوه به دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر به سود سالیانه بالایی نیز دست یافت.

۷- نتیجه گیری

در این تحقیق یک سیستم تولید همزمانی با هدف دستیابی به ساختمان با مصرف انرژی صفر طراحی شده است. با تعریف متغیرهای طراحی شامل توان موتور احتراق داخلی، توان چیلر جذبی، توان بویلر پشتیبان آب گرم، حجم منبع ذخیره آب گرم و ساعت روشن شدن موتور، حساسیت سیستم با تغییر این متغیرها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده نشان داد که با افزایش توان ورودی موتور تابع توازن الکتريسيته کاهش خواهد یافت که می تواند به دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر کمک کند. مقدار این تابع در توان نامی ۴۰ kW به صفر خواهد رسید که بیانگر دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر در نزدیکی این توان است. علاوه بر این با افزایش توان نامی موتور، میزان کمبود تولید سرمایه، گرمایش و آب گرم مصرفی از ۹۵٪ به حدود ۶۲٪ خواهد رسید که کاهش قابل ملاحظه ای را نشان می دهد. همچنین با رساندن توان سرمایه چیلر جذبی به نزدیکی تقاضاهای انرژی گرمایشی و سرمایه ساختمان (۳۰ kW تا ۴۰ kW)، می توان به بیشترین سود خالص سالیانه در حدود ۴۰۰۰ دلار دست یافت. علاوه بر این، با تغییر در ساعت روشن شدن موتور، در ساعات افزایش تقاضای الکتريسيته (ساعات ۹ تا ۱۱ صبح) میزان سود خالص سالیانه سیستم تا ۴۰۰۰ دلار افزایش خواهد یافت. در تحقیقات آینده می توان از چیلر تک اثره در سیستم پیشنهادی استفاده نمود تا تفاوت بکارگیری چیلر تک اثره و دو اثره از نظر کارایی و هزینه مشخص گردد. همچنین، می توان در تحقیقات آینده از زیست توده های مختلف موجود در شهرهای مختلف مانند زباله ها و فاضلاب های شهری، استفاده نمود و با بکارگیری از سیستم طراحی شده برای یک ساختمان ویلایی در آن محل و بررسی پارامترهای اقتصادی مهم برای این سیستم، بهترین مکان برای بکارگیری از سوخت زیست توده به منظور دستیابی به هدف ساختمان با مصرف انرژی صفر را شناسایی و معرفی نمود.

- [13] M. Alirezaei, M. Noori, O. Tatari, Getting to net zero energy building: investigating the role of vehicle to home technology, *Energy and Buildings*, 13 (2013) 74-85.
- [14] S. Cao, Comparison of the energy and environmental impact by integrating a H2 vehicle and an electric vehicle into a zero-energy building, *Energy Conversion and Management*, 123 (2016) 153 -173.
- [15] M. Fiorentini, P. Cooper, Z. Ma, Development and Optimization of an Innovative HVAC System with Integrated PVT and PCM Thermal Storage for a Net-Zero Energy Retrofitted House, *Energy and Buildings*, 94 (2015) 21-32.
- [16] A. Mohamed, A. Hasan, K. Sirén, Fulfillment of net-zero energy building (NZEB) with four metrics in a single family house with different heating alternatives, *Applied Energy*, 114 (2014) 385-399.
- [17] A. Hassoun, I. Dincer, Development of power system designs for a net zero energy house, *Energy and Buildings*, 73 (2014) 120-129.
- [18] Z. Yu, J. Chen, Y. Sun, G. Zhang, A GA-based system sizing method for net-zero energy buildings considering multi-criteria performance requirements under parameter uncertainties, *Energy and Buildings*, 129 (2016) 524-534.
- [19] M. Hamdy, A. Hasan, K. Siren, A multi-stage optimization method for cost-optimal and nearly-zero-energy building solutions in line with the EPBD-recast 2010, *Energy and Buildings*, 56 (2013) 189–203
- [20] M. Ferrara, E. Fabrizio, J. Virgone, M. Filippi, A simulation-based optimization method for cost-optimal analysis of nearly Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings*, 84 (2014) 442-457.
- [21] C. Baglivo, P. Maria Congedo, A. Fazio, D. Laforgia, Multi-objective optimization analysis for high efficiency external walls of zero energy buildings (ZEB) in the Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 84 (2014) 483-492.
- [22] J. Gao, A. Li, X. Xu, W. Gang, T. Yan, Ground heat exchangers: Applications, technology integration and potentials for zero energy buildings, *Renewable energy for net zero energy buildings – A comparison between solar thermal, PV and photovoltaic–thermal (PV/T) systems*, *Solar Energy*, 122 (2015) 986-996.
- [4] O. Sotehi, A. Chaker, C. Maalouf, Hybrid PV/T water solar collector for net zero energy building and freshwater production: A theoretical approach, *Desalination*, 385 (2016) 1–11.
- [5] A. AlAjmi, H. Abou-Ziyan, A. Ghoneim, Achieving annual and monthly net-zero energy of existing building in hot climate, *Applied Energy*, 165 (2016) 511-521.
- [6] J. Hirvonen, G. Kayo, A. Hasan, K. Sirén, Zero energy level and economic potential of small-scale building-integrated PV with different heating systems in Nordic conditions, *Applied Energy*, 167 (2016) 255-269.
- [7] J. N. Marta, O. Panao, The Overall Renewable Energy Fraction: an alternative performance indicator for evaluating Net Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings*, 127 (2016) 736-747.
- [8] L. Shen, X. Pu, Y. Sun, J. Chen, A study on thermoelectric technology application in net zero energy buildings, *Energy*, 113 (2016) 9-24.
- [9] S. Monteiro Silva, R. Mateus, L. Marques, M. Ramos, M. Almeida, Contribution of the solar systems to the nZEB and ZEB design concept in Portugal – Energy, economics and environmental life cycle analysis, *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 156 (2016) 59-74.
- [10] M. Bojic, N. Nikolic, D. Nikolic, J. Skerlic, I. Miletic, Toward a positive-net-energy residential building in Serbian conditions, *Applied Energy*, 88 (2011) 2407-2419.
- [11] G. Almeida Dávi, E. Caamano-Martín, R. Rüter, J. Solano, Energy performance evaluation of a net plus-energy residential building with grid-connected photovoltaic system in Brazil, *Energy and Buildings*, 120 (2016) 19-29.
- [12] G. Evola, G. Margani, L. Marletta, Cost-effective design solutions for low-rise residential Net ZEBs in Mediterranean climate, *Energy and Buildings*, 68 (2014) 7-18.

- using equilibrium modeling for different biomass materials. *Energy Convers Manag*, 42 (2001) 1499-1515.
- [33] J. Wang, T. Mao, J. Sui, H. Jin, Modeling and performance analysis of CCHP (combined cooling, heating and power) system based on co-firing of natural gas and biomass gasification gas, *Energy*, 93 (2015) 801-815.
- [34] N. Sekhar Barman, S. Ghosh, S.a De, Gasification of biomass in a fixed bed downdraft gasifier – A realistic model including tar, *Bioresource Technology*, 107 (2012) 505-511.
- [35] J. Wang, K. Yang, Z. Xu, C. Fu, Energy and exergy analyses of an integrated CCHP system with biomass air gasification, *Applied Energy*, 142 (2015) 317-327.
- [36] S. Khanmohammadi, K. Atashkari, R. Kouhikamali, Exergoeconomic multi-objective optimization of an externally fired gas turbine integrated with a biomass gasifier, *Applied Thermal Engineering*, 91 (2015) 848-859.
- [37] C. Woo Park, J. Hee Jeong, Y. Tae Kang, Energy consumption characteristics of an absorption chiller during the partial load operation, *International Journal of Refrigeration*, 27 (2004) 948–954.
- [38] S. Sanaye, M. Aghaei Meybodi, S. Shokrollahi, Selecting the prime movers and nominal powers in combined heat and power systems, *Applied Thermal Engineering*, 28 (2008) 1177–1188.
- [39] S. Sanaye, M. M. Ghafurian, F.e Tavakoli Dastjerd, Applying Relative Net Present or Relative Net Future Worth Benefit and exergy efficiency for optimum selection of a natural gas engine based CCHP system for a hotel building, *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 34 (2016) 305-317.
- Energy*, 128 (2018) 337-349.
- [23] R. Esperanza González Mahecha, A. F. P. Lucena, A. Szklo, P. Ferreira, A. Ismael F. Vaz, Optimization model for evaluating on-site renewable technologies with storage in zero/nearly Zero Energy Buildings, *Energy and Buildings*, 172 (2018) 505-516.
- [24] M. Puig-Arnavat, J.C. Bruno, A. Coronas. Modified thermodynamic equilibrium model for biomass gasification: a study of the influence of operating conditions. *Energy Fuels*, 26 (2012) 1385-1394.
- [25] S. Jarungthammachote, A. Dutta, Thermodynamic equilibrium model and second law analysis of a downdraft waste gasifier. *Energy*, 32 (2007) 1660-1669.
- [26] T.H. Jayah, L. Aye, R.J. Fuller, D.F. Stewart. Computer simulation of a downdraft wood gasifier for tea drying. *Biomass Bioenergy*, 25 (2003) 459-569.
- [27] Melgar A, Perrez JF, Laget H, Horillo A. Thermochemical equilibrium modelling of a gasifying process. *Energy Convers Manag*, 48 (2007) 59-67.
- [28] M. Borji, S. Ghorbani, K. Atashkari, A. Etemadi, Numerical investigation of integrated biomass gasification and planar solid oxide fuel cell power plant, *Amirkabir J. Mech. Eng*, 49(1) (2017) 219-230. (in Persian)
- [29] Anukam A, Mamphweli S, Meyer E, Okoh O. Computer simulation of the mass and energy balance during gasification of sugarcane bagasse. *Energy*, (2014) 1- 9.
- [30] S. Khanmohammadi, K. Atashkari, R. Kouhikamali, Performance assessment and multi-objective optimization of a trigeneration system with modified biomass gasification model, *Modares Mechanical Engineering*, 15 (2015) 209-222. (in Persian)
- [31] M. Puig-Arnavat, Performance modelling and validation of biomass gasifiers for trigeneration plants. Tarragona: Universitat Rovira i Virgili; 2011.
- [32] Z.A. Zainal, R. Ali, C.H. Lean, K.N. Seetharamu, Prediction of performance of a downdraft gasifier

پیوست

در این رابطه η_e^* بازده الکتریکی نامی موتور بر حسب درصد می‌باشد و N_e^* مقدار توان کلی موتور می‌باشد که شامل توان خالص خروجی و توان اصطکاکی یا توان اضافی می‌باشد که این توان اضافی می‌تواند در حدود ۱۰٪ توان نامی موتور باشد. با جایگزینی سوخت گاز طبیعی با سوخت زیست‌توده مقدار بازده الکتریکی موتور از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\eta_e = \frac{N_e}{Q_f} = \gamma_e \eta_e^* \quad (۵-پ)$$

که در آن η_e بازده الکتریکی (٪) و γ_e شاخص بازده نسبی می‌باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\gamma_e = 0.102 \frac{LHV_f}{LHV_{NG}} + 0.897 \quad (۶-پ)$$

به طور مشابه مقدار دمای گاز خروجی از موتور از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$T_{ex}^* = 2 \times 10^{-5} (N_e^*)^2 - 0.0707 N_e^* + 758.33 \quad (۷-پ)$$

برای سوخت‌های غیر از گاز طبیعی این دما از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$T_{ex} = \gamma_T T_{ex}^* = \left(0.025 \frac{LHV_f}{LHV_{NG}} + 0.974 \right) T_{ex}^* \quad (۸-پ)$$

که در آن γ_T شاخص دمای خروجی نسبی است.

مقدار دمای دریافتی توسط آب ورودی به موتور برابر است با:

$$Q_{jacket} = \dot{m}_w C_w (T_{w,out} - T_{w,in}) \quad (۹-پ)$$

$$\eta_{ql} = \frac{Q_{jacket}}{Q_f} = \eta_{ql}^* \quad (۱۰-پ)$$

که در روابط بالا \dot{m}_w مقدار دبی جرمی آب ورودی به موتور، C_w گرمای ویژه آب، $T_{w,in}$ و $T_{w,out}$ به ترتیب دماهای آب ورودی و خروجی از موتور هستند. همچنین، η_{ql} و η_{ql}^* به ترتیب بازده‌های حرارت دریافتی آب برای سوخت‌های دارای LHV پایین و در بار

به منظور تحلیل ترمودینامیکی سیستم معرفی شده، در ادامه تحلیل ترمودینامیکی اجزاء مختلف سیکل به اختصار بررسی شده است.

در موتورهای احتراق داخلی مرسوم که برای استفاده از سوخت گاز طبیعی طراحی شده‌اند، اگر از سوخت زیست‌توده استفاده گردد، مقدار بازده و تولید الکتریسیته آن کاهش پیدا خواهد کرد. روش‌های متعددی برای پیش‌بینی بازده این موتورها پیشنهاد شده است. اگر موتور احتراق داخلی را به عنوان یک حجم کنترل در نظر بگیریم، معادله قانون اول در حالت پایا برابر خواهد بود با:

$$Q_f + \dot{m}_a h_a = N_e + Q_{jacket} + \dot{m}_{gas,ex} h_{gas,ex} + Q_{misc} \quad (۱-پ)$$

که در این رابطه Q_f مقدار انرژی سوخت، N_e مقدار توان موتور، Q_{jacket} مقدار انرژی منتقل شده به آب، Q_{misc} مقدار حرارت اتلافی موتور، h_a و $h_{gas,ex}$ به ترتیب آنتالپی هوای ورودی و گاز خروجی از موتور و \dot{m}_a و $\dot{m}_{gas,ex}$ به ترتیب دبی جرمی هوای ورودی و گاز خروجی از موتور هستند.

مقدار انرژی ورودی توسط زیست‌توده به موتور برابر است با:

$$Q_f = \dot{m}_f LHV_f \quad (۲-پ)$$

که در رابطه بالا \dot{m}_f و LHV_f به ترتیب مقادیر دبی جرمی سوخت ورودی و مقدار ارزش حرارتی پایینی سوخت است که از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$LHV_f = \frac{(30[CO] + 25.7[H_2] + 85.4[CH_4]) \times 4.2}{1000} [\text{MJ/N.m}^3] \quad (۳-پ)$$

که در آن $[CO]$ ، $[H_2]$ و $[CH_4]$ به ترتیب برابر درصد‌های مولی گازهای مونواکسید کربن، هیدروژن و متان می‌باشند.

به منظور محاسبه مقدار سوخت ورودی به موتور ابتدا باید بازده الکتریکی آن محاسبه گردد. مقدار بازده الکتریکی نامی موتور احتراق داخلی گاز طبیعی، تابعی از بار نامی آن می‌باشد و برابر است با:

$$\eta_e^* = 28.08 (N_e^*)^{0.0563} \quad (۴-پ)$$

برای چیلر جذبی دو اثره از رابطه زیر می‌توان مقدار سرمایش تولید چیلر را در فصول گرم سال به دست آورد.

$$COP = \frac{Q_{Eva}}{Q_{HPG}} \quad (پ-۱۶)$$

به منظور محاسبه مقدار آب گرم تولیدی توسط مبدل حرارتی‌های ۱ و ۲ و همچنین بویلر پشتیبان به ترتیب می‌توان از روابط زیر استفاده نمود.

$$Q_{HW1} = \dot{m}_{Syn} (h_3 - h_4) \quad (پ-۱۷)$$

$$\dot{m}_{HW1} = \frac{Q_{HW1}}{h_{14} - h_{13}} \quad (پ-۱۸)$$

$$Q_{HW2} = Q_{jacket} \quad (پ-۱۹)$$

$$\dot{m}_{HW2} = \frac{Q_{HW2}}{h_{16} - h_{15}} \quad (پ-۲۰)$$

$$Q_{HW3} = Q_{Boiler} \quad (پ-۲۱)$$

$$\dot{m}_{HW3} = \frac{Q_{HW3}}{h_{17} - h_{12}} \quad (پ-۲۲)$$

جدول پ-۱ خصوصیات ترمودینامیکی سیالات عامل در نقاط مختلف سیکل را نشان می‌دهد. این مدلسازی به ازای توان نامی ۵۰ کیلووات برای موتور، چیلر و بویلر، حجم ۵ مترمکعب برای مخزن ذخیره آب گرم و ساعت ۱۹ برای زمان روشن شدن موتور انجام شده است. لازم به ذکر است در این ساعت گازی‌ساز خاموش است و گاز تولید نمی‌گردد، بنابراین از جریان سیالات وابسته به گازی‌ساز (۱ تا ۵ و همچنین ۱۳ و ۱۴) چشم‌پوشی شده است.

جدول پ ۱- تحلیل ترمودینامیکی سیستم مورد مطالعه
Table P-1

جریان سیال	دبی جرمی (kg/s)	دما (K)	آنتالپی (kJ/kg)
۶	۰/۰۵۶۳	۴۷۳	۲۱۹۷
۷	۰/۰۱۱۴	۴۷۳	۲۱۹۷
۸	۰/۰۳۵۸	۴۷۳	۲۱۹۷
۹	۰/۰۰۹۱	۴۷۳	۲۱۹۷
۱۰	۰/۰۷۳۵	۷۳۳	۹۹۰
۱۱	۰/۰۷۳۵	۳۹۳	۶۴۲
۱۲	۰/۲۷۲۸	۲۹۸	۱۰۴
۱۵	۰/۱۸۱۲	۲۹۸	۱۰۴
۱۶	۰/۱۸۱۲	۳۳۳	۲۵۰
۱۷	۰/۲۷۲۸	۳۳۳	۲۵۰
۲۰	۲/۴۵	۲۸۰	۲۹

نامی موتور هستند ($\eta_{ql}^* = 0/17$).

مقدار مول هوای مورد نیاز جهت احتراق کامل (مقدار m در معادله زیر) در موتور احتراق داخلی برابر اختلاف بین مقدار مول هوای مورد نیاز جهت احتراق کامل زیست توده و مقدار مول هوای بکار رفته در فرآیند گازی‌سازی می‌باشد. معادله احتراق در موتور و موازنه اجزاء حاصل از احتراق در زیر آمده است.

$$r_{CO}CO + r_{H_2}H_2 + r_{CO_2}CO_2 + r_{CH_4}CH_4 + r_{H_2O}H_2O + r_{N_2}N_2 + m(O_2 + 3.76N_2) \rightarrow \quad (پ-۱۱)$$

$$r_{CO_2}CO_2 + r_{H_2O}H_2O + r_{O_2}O_2 + r_{N_2}N_2$$

$$\text{Carbon: } r_{CO} + r_{CO_2} + r_{CH_4} = r_{CO_2} \quad (پ-۱۲)$$

$$\text{Oxygen: } r_{CO} + 2r_{CO_2} + r_{H_2O} + 2m = 2r_{CO_2} + r_{H_2O} + 2r_{O_2} \quad (پ-۱۳)$$

$$\text{Hydrogen: } 2r_{H_2} + 4r_{CH_4} + 2r_{H_2O} = 2r_{H_2O} \quad (پ-۱۴)$$

$$\text{Nitrogen: } 2r_{N_2} + 3.76 \times 2m = 2r_{N_2} \quad (پ-۱۵)$$

با فرض توان ورودی مشخص برای موتور می‌توان مقادیر دمای گازهای خروجی از موتور، گرمای هدررفته از موتور، گرمای داده شده به آب خنک‌کن موتور، مقدار دبی جرمی سوخت و هوای ورودی و همچنین مقدار دبی جرمی گازهای خروجی از آن را محاسبه نمود. با به دست آوردن مقدار دبی جرمی سوخت ورودی به موتور می‌توان مقدار دبی جرمی هوای ورودی مورد نیاز و سپس مقدار دبی جرمی گاز خروجی را محاسبه نمود. علاوه بر این با توجه به مقدار دبی جرمی سوخت مورد نیاز موتور می‌توان دبی جرمی زیست توده ورودی به سیستم گازی‌ساز را محاسبه نمود.