

امکان سنجی فنی - اقتصادی - زیست محیطی بهره‌برداری

بهینه از سیستم‌های تولید پراکنده، میکرو توربین -

فتوولتائیک، با به‌کارگیری الگوریتم PSO

امید رضا کاوسی نژاد

کارشناس ارشد مدیریت انرژی دانشگاه صنعتی امیرکبیر kavomid@yahoo.com

مرتضی محمدی اردهالی

دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر ardehali@aut.ac.ir

گئورگ قره پتیان

استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر grptian@aut.ac.ir

تاریخ دریافت: ۸۷/۱۱/۹ تاریخ پذیرش: ۸۸/۴/۱

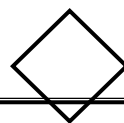
چکیده

در این مطالعه، یک سیستم ترکیبی متشکل از سیستم میکروتوربین، فتوولتائیک و مبدل DC/AC، برای تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی ساختمان‌ها طراحی شده است. به‌منظور دستیابی به حداقل هزینه‌ها، تابع هدف شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم ترکیبی، هزینه آلاینده‌های زیست محیطی، هزینه‌های پیک‌زدایی و هزینه‌های خرید و فروش انرژی الکتریکی از شبکه سراسری است. برای رسیدن به طرح بهینه با توجه به گستردگی متغیرها و بزرگی تابع هدف، از الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)، استفاده شده است. سیستم ترکیبی در این مطالعه، شامل ۱۰۰ متغیر است، که به تعیین ظرفیت‌های بهینه میکروتوربین، فتوولتائیک، اینورتر و زاویه نصب صفحات فتوولتائیک و همچنین نحوه بهره‌برداری بهینه به‌صورت ۲۴ ساعته برای هر فصل مربوط می‌شود. برای بهینه‌سازی سیستم، نرم افزاری در محیط برنامه‌نویسی MATLAB، آماده شده است. در پایان، نتایج حاصل شده برای بیمارستانی با پیک بار الکتریکی ۳۴۰ kW و بار حرارتی ۸۷۰ kW، نشان می‌دهد که در حالتی که تعرفه‌های انرژی واقعی و تعرفه پیک زدایی (پارانه‌ای) که دولت به ازای نصب هر کیلووات سیستم ترکیبی به بهره‌بردار می‌دهد) بالاتر از ۱۰۰۰ \$/kW باشد، در طول عمر پروژه سالیانه معادل ۶۴۳۶۱ دلار سودآوری دارد، همچنین ظرفیت‌های بهینه میکروتوربین، اینورتر جهت نصب، به ترتیب ۳۴۹ kW و ۳۱۵ kW انتخاب شده است.

طبقه‌بندی JEL : Q41, D61, C88, C63, C61, C53

کلید واژه‌ها: سیستم ترکیبی میکروتوربین - فتوولتائیک، هزینه اجتماعی آلاینده‌های

زیست محیطی، هزینه دیمانند، هزینه پیک زدایی، الگوریتم PSO، تولید پراکنده.



۱- مقدمه

به دلایل متعدد انرژی الکتریکی پرکاربردترین حامل انرژی در میان بشر است و این امر سبب افزایش فزاینده تقاضای انرژی الکتریکی شده است. در حال حاضر حل مشکل کمبود و پایان پذیری منابع انرژی‌های فسیلی مورد توجه قرار گرفته است و بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر انرژی و استفاده از روش‌های تولید انرژی با راندمان بیشتر، بیش از پیش مهم جلوه می‌کند به طوری که این عرصه موجب حضور فن‌آوری‌های مدرن شده است. در این میان توجه ویژه به تولید انرژی الکتریکی از منبع خورشیدی و تولید هم‌زمان برق و حرارت است.

پس از مقدمه، در بخش ۲، مروری بر ادبیات موضوع، تولید پراکنده در بخش ۳، تعریف و طرح مسأله در بخش ۴، مدل سازی فتوولتائیک خورشیدی در بخش ۵، بهینه سازی سیستم با استفاده از الگوریتم PSO در بخش ۶ و نتایج مدل و نتیجه گیری در بخش های پایانی ارائه می گردد.

۲- مروری بر ادبیات موضوع

مسئله بهینه‌سازی سیستم‌های ترکیبی به روش‌های مختلفی از قبیل روش‌های هوشمند مانند الگوریتم ژنتیک (GA) (یانگ و زو^۱، ۲۰۰۸؛ کوترولیس و همکاران^۲، ۲۰۰۶؛ هوف و همکاران^۳، ۱۹۹۷؛ وانگ و سینگ^۴، ۲۰۰۸؛ ملیت و همکاران^۵، ۲۰۰۴)، الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) (کیتاموری و همکاران^۶، ۲۰۰۶؛ وانگ و سینگ، ۲۰۰۸)، هم‌چنین روش‌های دیگری مانند برنامه‌ریزی خطی (LP) (وانگ و سینگ، ۲۰۰۸)،

- 1 - Genetic Algorithm.
- 2 - Yang & Zhou.
- 3 - Koutroulis et al.
- 4 - Hoff et al.
- 5 - Wang & Singh.
- 6 - Mellit et al.
- 7 - Particle Swarm Optimization.
- 8 - Kitamura et al.
- 9 - Linear Programming.

روش لاگرانژ (LR) (وانگ و سینگ، ۲۰۰۸)، روش حداقل مربعات (LSM) (کیم و همکاران^۳، ۱۹۹۷) حل شده است.

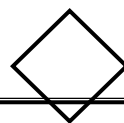
در مطالعه یانگ و زو (۲۰۰۸)، به منظور دستیابی به بهینه ترین پیکربندی سیستم ترکیبی، شامل تعداد پانل فتوولتائیک، تعداد توربین بادی، تعداد باتری، زاویه نصب صفحات فتوولتائیک و ارتفاع تجهیزات توربین بادی، از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. نکته جالب این مطالعه، بهینه‌سازی برای پیدا کردن بهترین نقطه تعادل بین دو هدف احتمال قطع برق (LPSP) و هزینه سالیانه سیستم (ACS) است. در مطالعه کیتاموری و همکاران (۲۰۰۶)، برای بهینه کردن مدیریت انرژی (EMS) کارخانجات، با در نظر گرفتن کاهش هزینه‌های انرژی و کاهش انتشار CO₂، از الگوریتم PSO استفاده شده است. در مطالعه کوترولیس و همکاران (۲۰۰۶)، هدف، تعیین اندازه اجزای سیستم ترکیبی بادی - فتوولتائیک است، به طوری که هزینه سیستم کمینه و بار منطقه تأمین شود، هم‌چنین قیود سیستم نیز برآورده شوند.

در این مطالعه ملیت و همکاران (۲۰۰۴)، اندازه بهینه اجزای یک سیستم مختلط تولید توان، متشکل از آرایه‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی، با استفاده از شبکه مویک بررسی شده است.

۳- تولید پراکنده

تولید پراکنده (DG)، عبارت است از تولید انرژی در محل مصرف، اما گاهی نیز به تکنولوژی‌هایی اطلاق می‌شود که از منابع تجدیدپذیر برای تولید انرژی استفاده می‌کنند، اما نکته مورد توجه این است که این مولدها صرف‌نظر از نحوه تولید توان، آن‌ها، ظرفیت نسبتاً کوچکی داشته و در حدود ۳۰۰ MW است و به‌طور مستقیم به شبکه توزیع وصل می‌شوند (ال خاتم و سالامه^۹، ۲۰۰۴). بالا رفتن هزینه انتقال و

- 1 - Lagrangian Relaxation.
- 2 -Least Square Method.
- 3 - Kim et al.
- 4 - Loss Power Supply Probablitiy.
- 5 - Annualized Cost of System.
- 6 - Energy Management System.
- 7 - Wavenet.
- 8 - Distributed Generation.
- 9 - El-Khattam & Salama.



توزیع، به مولدهای تولید پراکنده این امکان را می‌دهد که انرژی تولیدی خود را به قیمتی ارزان‌تر در اختیار مصرف‌کنندگان قرار دهند، تولید پراکنده به‌خصوص در سیستم‌های تجدید ساختار شده، می‌تواند در مناطقی که دارای قیمت نهایی منطقه‌ای (LMP)^۱ بالاتری هستند، توجیه اقتصادی داشته باشد. علاوه بر این، تولید پراکنده امکان استفاده از این منابع پاک برای تولید انرژی را ایجاد می‌کند (پپرمنز و همکاران^۲، ۲۰۰۳). تولید پراکنده (DG)، به علت افزایش اشتیاق به استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی و همچنین توسعه واحدهای تولید هم‌زمان، شاهد رشد فزاینده‌ای طی سالیان اخیر بوده است (گوران و لِنارت^۳، ۲۰۰۱؛ رحمان و همکاران^۴، ۲۰۰۴). بنابر گزارش منتشر شده از سوی CIGRE^۵، در نتیجه آزادسازی بازار برق در اروپا، در کشورهای دانمارک و هلند، سهم DG، به ترتیب به ۳۷ و ۴۰ درصد از کل تولید رسیده است (آچاروا و همکاران^۶، ۲۰۰۶). مطالعات مؤسسه مطالعات نیروی برق (EPRI) پیش‌بینی می‌کند که ۲۵ درصد از واحدهای جدید تولیدی تا سال ۲۰۱۰ را واحدهای تولید پراکنده تشکیل خواهند داد. در مطالعه مشابهی نیز که توسط بنیاد گاز طبیعی انجام گرفته، این میزان برابر با ۳۰ درصد به‌دست آمده است (آچاروا و همکاران، ۲۰۰۶). اعداد حاصل شده بنا به تعاریف متفاوت انجام گرفته از تولید پراکنده توسط مؤسسات مختلف، متفاوت‌اند. با توجه به مفاد پیمان کیوتو (Kyoto)، بازار مطلوبی برای واحدهای تولید پراکنده‌ایی که از فن‌آوری‌های سبز منشعب می‌شوند، متصور است. همچنین، سیاست‌گذاری‌های انجام گرفته نیز سبب گسترش واحدهای تولید پراکنده در سراسر جهان شده است، که افزایش شمار این دست واحدها را به همراه خواهد داشت (آچاروا و همکاران، ۲۰۰۶). لازم به ذکر است که تولید پراکنده می‌تواند هم به صورت جدا از

-
- 1 - Local Marginal Price.
 - 2 - Pepermans et al.
 - 3 - Goran & Lennart.
 - 4 - Rahman et al.
 - 5 - International Council on Large Electric Systems.
 - 6 - Liberalization.
 - 7 - Acharya et al.
 - 8 - Electric Power Research Institute.
 - 9 - Natural Gas Foundation.

شبکه، به تأمین نیاز مصرف‌کنندگان محلی بپردازد و هم می‌تواند به صورت یک پارچه با شبکه، بخشی از بار سیستم قدرت را تغذیه کند (بورگس و فالکائو^۱، ۲۰۰۶).

۱-۳- میکروتوربین

در حقیقت میکروتوربین‌ها توربین‌های گازی کوچکی هستند که معمولاً ظرفیت آن‌ها بین ۳۰ تا ۵۰۰ کیلووات است (هدمن و همکاران^۲، ۲۰۰۳). میکروتوربین‌ها به‌طور معمول دارای یک بخش بازیافت انرژی هستند که سبب افزایش راندمان این نوع تولید پراکنده می‌شود (نیکولاس و لووینگ^۴، ۲۰۰۳). اجزای اصلی یک میکروتوربین در شکل ۱ نشان داده شده است. در یک میکروتوربین، هوا توسط یک کمپرسور جریان شعاعی (سانتریفوژ) متراکم شده و سپس در یک مبدل حرارتی رکوپراتور توسط گازهای گرم خروجی از توربین، پیش‌گرم می‌شود. آنگاه هوای گرم شده در محفظه احتراق با سوخت مخلوط شده و محترق می‌شود. گازهای داغ حاصل از احتراق که فشار و دمای بالایی دارند، در یک توربین منبسط شده و از این طریق روی توربین کار انجام می‌دهند. سپس این کار توسط یک ژنراتور به توان الکتریسیته تبدیل می‌شود. کار حاصل از انبساط، با چرخاندن توربین، سبب حرکت دادن کمپرسور نیز می‌شود. سرانجام گازهای خروجی از توربین انبساط به مبدل حرارتی رکوپراتور رفته و موجب پیش‌گرم شدن هوای خروجی از کمپرسور می‌شوند (همیلتون^۵، ۲۰۰۰). بیش‌تر طرح‌های میکروتوربین‌ها تک محوره‌اند که در آن‌ها از یک ژنراتور مغناطیس دائم سرعت بالا، برای تولید ولتاژ و فرکانس متغیر جریان متناوب (AC)، استفاده می‌شود. بیش‌تر واحدهای میکروتوربین‌ها برای مصارف دائمی طراحی می‌شوند که می‌توان برای افزایش راندمان، گرما را نیز بازیافت کرد (استانتون و اُزپینچی^۷، ۲۰۰۳).

1 - Borges & Falcao.

2 - Hedman et al.

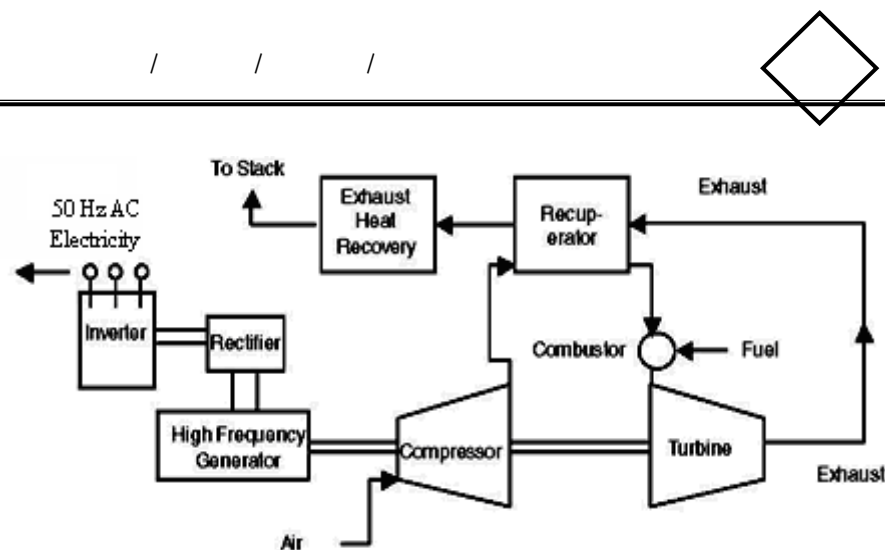
3 - Recuperator.

4 - Nichols and Loving.

5 - Hamilton.

6 - Exhaust Heat Recovery.

7 - Staunton and Ozpineci.



شکل ۱ - اجزای اصلی یک میکروتوربین که برای کاربرد در سیستم‌های CHP به کار می‌رود (گوران و لِنارت، ۲۰۰۱)

۲-۳ - فتوولتائیک

انرژی نور خورشید الکترون‌های سلول فتوولتائیک را وادار به حرکت می‌کند. هر سلول ۲-۴ A را با توجه به اندازه سلول با ولتاژ خروجی ۰.۵ V تأمین می‌کند. البته محدودیت‌های فتوولتائیک بیش‌تر از سایر مولدهاست، توان خروجی نسبتاً پایین، قیمت بالای سلول‌های فتوولتائیک و مشخصات جغرافیایی و آب و هوایی خاص برای تولید توان از جمله این محدودیت‌ها هستند. با توجه به پاکی انرژی تولیدی، تولید برق توسط فتوولتائیک مورد توجه است (بارکر و دی ملو، ۲۰۰۰؛ آکرمن و همکاران^۲، ۲۰۰۱).

۴- تعریف و طرح مسئله

در این مطالعه تلاش می‌شود که با در نظر گرفتن جنبه‌های زیست محیطی و فاکتورهای اقتصادی، ترکیبی بهینه برای یک سیستم متصل به شبکه، متشکل از میکروتوربین و سیستم فتوولتائیک، با حداقل هزینه و حداکثر پاسخ‌گویی به نیاز بار، طراحی شود. کارهای زیادی در این زمینه انجام نشده است، ولی در زمینه با سیستم میکروتوربین و فتوولتائیک، به تنهایی و یا ترکیب این سیستم‌ها با منابع تجدیدپذیر

1 - Barker & De Mello.

2 - Ackermann et al.

دیگر نظیر باد و پیل سوختی کارهای مختلفی به انجام رسیده است^۱ (کیلوگ و همکاران^۲، ۱۹۹۸؛ گوستافسون^۳، ۱۹۹۲). برای رسیدن به طرح بهینه، با توجه به گستردگی متغیرها و بزرگی تابع هدف، استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مؤثر به نظر می‌رسد. الگوریتم اجتماع ذرات (PSO)، چه از نظر سادگی و چه از نظر قدرت محاسباتی، یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های عددی برای حل معادلات بهینه‌سازی، محسوب می‌شود.

در این مطالعه، طراحی و بهره‌برداری بهینه از سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک، با استفاده از الگوریتم PSO و با در نظر گرفتن هزینه اجتماعی آلایندگی زیست محیطی برای یک بیمارستان با پیک بار الکتریکی ۳۴۰ kW و پیک بار حرارتی ۸۷۰ kW، انجام شده است. نمودار بار الکتریکی و حرارتی سالیانه این بیمارستان به صورت دو بردار ۹۶ تایی برای نرم افزار محاسباتی تعریف شده است. برای تشکیل این نمودار، از هر فصل یک منحنی ۲۴ ساعته که نشان دهنده مصرف یک روز از آن فصل را نشان می‌دهد استفاده شده است، با کنار هم قرار دادن منحنی ۲۴ ساعته یک روز از هر فصل، نمودار ۹۶ ساعته بار الکتریکی و حرارتی به دست می‌آید که ساعات ۱-۲۴ آن مربوط به مصرف یک روز از فصل بهار و ساعات ۲۵-۴۸ آن مربوط به مصرف یک روز از فصل تابستان و ساعات ۴۹-۷۲ آن مربوط به مصرف یک روز از فصل پاییز و ساعات ۷۳-۹۶ آن مربوط به مصرف یک روز از فصل زمستان است.

به منظور طراحی و بهره‌برداری بهینه سیستم ترکیبی، نرم‌افزاری در محیط MATLAB تهیه شده است که الگوریتم و ورودی‌های نرم افزار در بخش ۶ این مطالعه بیان شده است. برای انتخاب بهینه‌ترین سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک، ۴ سناریو تعریف شده، که نتایج به دست آمده در جدول ۲ آمده است.

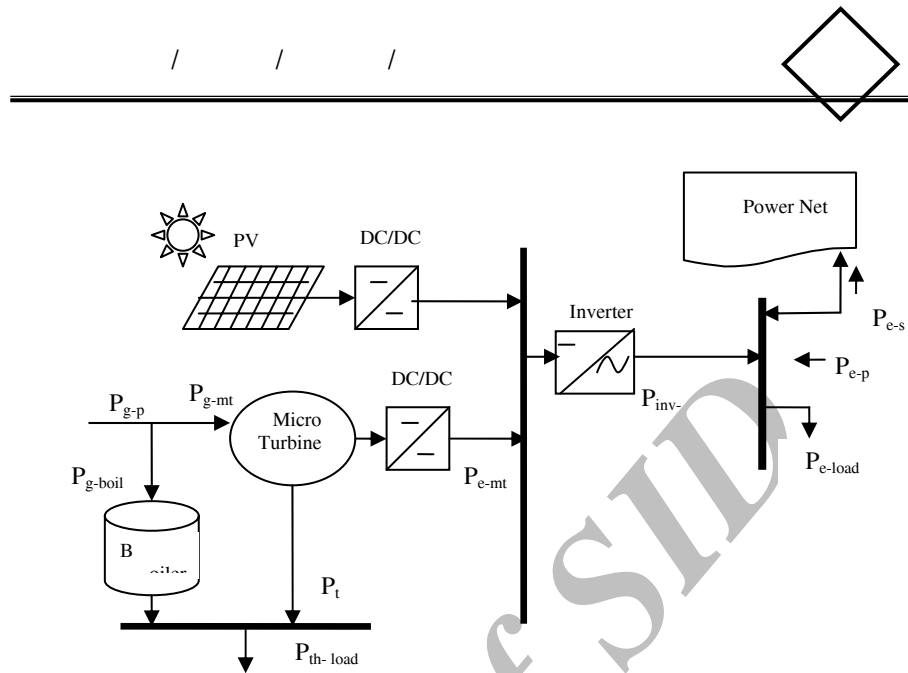
۵- مدل‌سازی سیستم فتوولتائیک خورشیدی - میکروتوربین

بلوک دیاگرام سیستم مختلط مورد بررسی، در شکل ۲ نمایش داده شده است. خروجی واحدها به یک باسبار DC مشترک متصل می‌شوند.

1 - www.eia.doe.gov/solar2/Renewable_electricity_purchases_history_and_recent_developments.htm and <http://CaliforniaSolarCenter.org/history-solarthermal/html>

2 - Kellogg et al.

3 - Gustafsson.



شکل ۲- بلوک دیاگرام سیستم مختلط میکروتوربین - خورشیدی

همان طور که در شکل ۲ دیده می شود، سیستم مورد مطالعه از چهار جزء اصلی، به اضافه یک باسبار DC و یک باسبار AC، تشکیل می شود. این اجزا شامل واحدهای میکروتوربین، فتوولتائیک های خورشیدی، بویلر و مبدل DC/AC هستند.

۵-۱- مدل سازی سیستم فتوولتائیک

داده های مربوط به توان تابیده شده بر سطح فتوولتائیک، با استفاده از رابطه زیر به توان خروجی آن تبدیل می شوند (خان و اقبال^۱، ۲۰۰۵):

$$P_{PV} = \frac{G}{1000} \times P_{PV, \text{rated}} \times \eta_{PV, \text{conv}} \quad (1)$$

که در آن، G توان تابش عمود بر سطح فتوولتائیک (W/m^2) و $P_{PV, \text{rated}}$ توان نامی هر فتوولتائیک بوده که به ازای $G = 1000 \text{ W/m}^2$ ، به دست می آید. $\eta_{PV, \text{conv}}$ نیز برابر با بازدهی مبدل DC/DC نصب شده بین هر فتوولتائیک و باسبار DC است.

1 - Khan & Iqbal.

در صورت در دست بودن مولفه‌های عمودی و افقی توان تابشی خورشید در هر لحظه، می‌توان توان تاییده شده (به صورت عمودی) بر سطح فتوولتائیک نصب شده با زاویه، θ_{PV} را طبق رابطه زیر محاسبه کرد:

$$G(t, \theta_{PV}) = G_V(t) \times \cos(\theta_{PV}) + G_H(t) \times \sin(\theta_{PV}) \quad (2)$$

در آن $G_H(t)$ و $G_V(t)$ به ترتیب نرخ تابش افقی و عمودی در گام زمانی t ام هستند (W/m^2).

۲-۵- مدل سازی سیستم میکروتوربین

میکروتوربین دارای راندمان الکتریکی و حرارتی است که می‌توان این راندمان را از رابطه زیر محاسبه کرد^۱:

$$\eta_{emt} = [-0.706(PL_{mt}/100)^4 + 2/40.5(PL_{mt}/100)^3] \quad (3)$$

$$- 3/17(PL_{mt}/100)^2 + 2/159(PL_{mt}/100) + 0.316] \eta_{e-nom-mt}$$

گاز مصرفی میکروتوربین از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{g-mt} = P_{e-mt} / \eta_{e-mt} \quad (4)$$

هم‌چنین توان حرارتی میکروتوربین از رابطه زیر به دست می‌آید:

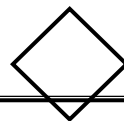
$$P_{th-mt} = \eta_{th-nom-mt} \times P_{g-mt} \quad (5)$$

در این مطالعه، $\eta_{e-nom-mt}$ ، راندمان الکتریکی نامی میکروتوربین برابر ۲۳ درصد و $\eta_{th-nom-mt}$ ، راندمان حرارتی نامی میکروتوربین برابر ۴۴ درصد و ضریب بازیافت حرارت ۰.۹۵ در نظر گرفته شده است.

۳-۵- مدل سازی بویلر

در صورتی که توان حرارتی مصرفی از توان حرارتی تولیدی میکروتوربین بیش‌تر باشد بایستی بویلر کمکی توان حرارتی مورد نیاز مصرف کننده را تأمین کند.

1 - Catalogue of CHP Technologies, U. S., Environmental Protection agency, Prepared by Energy Nexus Group, March 2002.



گاز مصرفی بویلر از رابطه زیر محاسبه می‌شود (کالینا و اسکورک^۱):

$$P_{g\text{-boil}} = P_{th\text{-boil}} / \eta_{boil} \quad (۶)$$

در این رابطه، راندمان بویلر، ۸۰٪ در نظر گرفته شده است.

۴-۵- مدل سازی مبدل DC/AC

در نهایت یک مبدل DC/AC، توان الکتریکی DC را جهت مصرف بار، به توان AC با فرکانس مطلوب بار تبدیل می‌کند. اثر تلفات مبدل را می‌توان با بازدهی آن مدل محاسبه نمود (خان و اقبال، ۲۰۰۵).

$$P_{inv\text{-load}} = (P_{PV\text{-inv}} + P_{mt\text{-inv}}) \eta_{inv} \quad (۷)$$

۵-۵- استراتژی بهره‌برداری از سیستم ترکیبی میکروتوربین-فتوولتائیک

نحوه بهره‌برداری از سیستم، بر حسب شرایط کار آن تعیین می‌شود. اصولاً در هر گام زمانی، یکی از شرایط زیر ممکن است برقرار باشد:

- $P_{inv\text{-load}} = P_{eload}$: در این صورت تمامی توان تولیدی توسط میکروتوربین و فتوولتائیک، از طریق مبدل DC/AC، به بار تزریق می‌شود.
- $P_{inv\text{-load}} > P_{eload}$: در این وضعیت مازاد توان تولیدی توسط میکروتوربین و فتوولتائیک، به شبکه فروخته می‌شود.
- $P_{inv\text{-load}} < P_{eload}$: در این شرایط، کسری تقاضای بار خریداری می‌شود.

۶-۵- مدل سازی هزینه‌های اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی

هزینه‌ای که به علت اثرات زیست محیطی مستقیم (انتشار آلاینده‌ها) سبب تخریب اکوسیستم‌ها، آسیب به ساختارها (اعم از ساختمان‌ها، محیط زیست و...) و سلامتی افراد شود، هزینه تخریب نامیده می‌شود. در حقیقت هزینه تخریب، هزینه‌ای است که اثرات تخریب کننده یا سوء یک آلاینده یا یک فعالیت بر محصولات کشاورزی، اکوسیستم‌ها، مواد و سلامت انسان را برآورد می‌کند و اغلب هزینه‌ای است که در قیمت

تمام شده در نظر گرفته نمی‌شود. به عبارت دیگر، به مجموع پولی که بتواند صدمات ناشی از انتشار مواد آلاینده و گازهای گلخانه‌ای را جبران کند، هزینه تخریب یا هزینه‌های اجتماعی گفته می‌شود. به منظور محاسبه هزینه‌های تخریب، به کمی کردن اثر آلاینده‌ها و فعالیت‌ها در محیط‌های اثرپذیر (انسانی و طبیعی) نیاز است.

این هزینه‌ها بر اساس مطالعات انجام شده توسط بانک جهانی و سازمان حفاظت محیط زیست ایران و همچنین بر اساس ضرایب EPA^۱ آمریکا محاسبه شده‌اند. با توجه به ضرایب هزینه اجتماعی انتشار گازهای آلاینده و گلخانه‌ای (براساس مطالعات EPA آمریکا) از بخش NO_x ، SO_2 ، CO_2 ، به ازای هر کیلووات ساعت برق تولیدی، جمعاً رقمی معادل ۰.۱۰۰ دلار برآورد می‌شود.

با توجه به استراتژی بهره‌برداری در این مطالعه، نحوه انتخاب ظرفیت سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک با توجه به هزینه‌های اجتماعی، به صورت زیر محاسبه شده است:

$$C_{env-net-wo-mt} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{e-load} \right) / 4 * 365 * I_{env-network} \quad (8)$$

$$C_{env-gas-wo-mt} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{th-load} \right) / 4 * 365 * I_{env-boil} \quad (9)$$

$$C_{env-net-w-mt} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{ep} \right) / 4 * 365 * I_{env-network} \quad (10)$$

$$I_{env-net-w-mt} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{e-s} \right) / 4 * 365 * (I_{env-network} - I_{env-mt} * P_{mt}) \quad (11)$$

$$C_{env-w-gas} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{th-boil} \right) / 4 * 365 * I_{env-boil} * P_{boil} \quad (12)$$

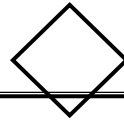
$$C_{env-w-mt} = \left(\sum_{i=1}^{96} P_{e-mt} \right) / 4 * 365 * I_{env-mt} * P_{mt} \quad (13)$$

$$C_{env-w-mt} = (C_{env-w-mt} + C_{env-w-gas} + C_{env-net-w-mt}) \quad (14)$$

$$C_{env-wo-mt} = (C_{env-net-wo-mt} + C_{env-gas-wo-mt}) \quad (15)$$

1 - Environment Protection Agency.

2 - Energy Balance of Islamic Republic Iran, 1385.



$$I_{env-network} \quad I_{env-boil} \quad I_{env-mt}$$

۵-۷- مدل سازی هزینه‌های دیماند انرژی الکتریکی

با توجه به این که هزینه نهایی مشترکان انرژی الکتریکی، شامل هزینه مصرف انرژی و هزینه دیماند است، در این مطالعه، هزینه‌های دیماند در تمامی ماه‌های ۴ فصل سال در ساعات کم باری، میان باری و اوج باری توسط روابط زیر محاسبه شده است:

$$I_{demand-sp1} = (P_{e-peak-load-sp1} - P_{e-p-sp1}) \times T_{demand1} \quad (16)$$

$$I_{demand-sp2} = (P_{e-peak-load-sp2} - P_{e-p-sp2}) \times T_{demand2} \quad (17)$$

$$I_{demand-sp3} = (P_{e-peak-load-sp3} - P_{e-p-sp3}) \times T_{demand3} \quad (18)$$

$$I_{demand-sum1} = (P_{e-peak-load-sum1} - P_{e-p-sum1}) \times T_{demand1} \quad (19)$$

$$I_{demand-sum2} = (P_{e-peak-load-sum2} - P_{e-p-sum2}) \times T_{demand2} \quad (20)$$

$$I_{demand-sum3} = (P_{e-peak-load-sum3} - P_{e-p-sum3}) \times T_{demand3} \quad (21)$$

$$I_{demand-fal1} = (P_{e-peak-load-fal1} - P_{e-p-fal1}) \times T_{demand1} \quad (22)$$

$$I_{demand-fal2} = (P_{e-peak-load-fal2} - P_{e-p-fal2}) \times T_{demand2} \quad (23)$$

$$I_{demand-fal3} = (P_{e-peak-load-fal3} - P_{e-p-fal3}) \times T_{demand3} \quad (24)$$

$$I_{demand-win1} = (P_{e-peak-load-win1} - P_{e-p-win1}) \times T_{demand1} \quad (25)$$

$$I_{demand-win2} = (P_{e-peak-load-win2} - P_{e-p-win2}) \times T_{demand2} \quad (26)$$

$$I_{demand-win3} = (P_{e-peak-load-win3} - P_{e-p-win3}) \times T_{demand3} \quad (27)$$

برای محاسبه هزینه دیماندا سالیانه، بایستی هزینه دیماندا هر فصل (هر ماه از هر فصل ضربدر ۳) محاسبه و سپس هزینه دیماندا، ۴ فصل با یکدیگر جمع شود. هزینه دیماندا سالیانه در رابطه زیر محاسبه شده است:

$$I_{\text{demand}} = [(I_{\text{demand-sp1}} + I_{\text{demand-sp2}} + I_{\text{demand-sp3}}) \times 3] \\ + [(I_{\text{demand-sum1}} + I_{\text{demand-sum2}} + I_{\text{demand-sum3}}) \times 3] \quad () \\ + [(I_{\text{demand-fal1}} + I_{\text{demand-fal2}} + I_{\text{demand-fal3}}) \times 3] \\ + [(I_{\text{demand-win1}} + I_{\text{demand-win2}} + I_{\text{demand-win3}}) \times 3]$$

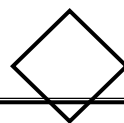
۵-۱- مدل سازی هزینه‌های پیک زدایی شبکه انرژی الکتریکی

با توجه به این که در این مطالعه سیستم ترکیبی میکروتوربین - فتوولتائیک به شبکه متصل است، به دلیل تولید انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی، از تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه‌ها کاسته می‌شود. در حقیقت با این طرح دیگر نیاز به ساخت نیروگاه‌های جدید با هزینه‌های بالا نیست و دولت می‌تواند به جای ساخت نیروگاه‌های جدید که انتقال آن با تلفات و تولید آن با انتشار آلاینده‌های زیست محیطی همراه است، درصدی از این هزینه‌ها را جهت حمایت از سیستم ترکیبی، به صورت یارانه در اختیار استفاده‌کنندگان از سیستم ترکیبی قرار دهد. در این مطالعه هزینه‌های پیک‌زدایی از نیروگاه‌ها توسط سیستم ترکیبی میکروتوربین - فتوولتائیک از طریق روابط زیر محاسبه شده است:

$$I_{\text{peak-shaving}} = (\text{Peakload}_e - \max(P_{e-p})) \times T_{\text{peak-shaving}} \quad (29)$$

۵-۹- طرح مسئله (تابع هدف و قیود بهینه سازی)

هدف این مطالعه، یافتن اندازه بهینه اجزای سیستم، یعنی تعداد و زاویه نصب پانل فتوولتائیک، ظرفیت میکروتوربین و مبدل DC/AC و نحوه بهره‌برداری بهینه از سیستم ترکیبی، با وجود شبکه است. هزینه‌های سیستم شامل هزینه یکنواخت سالیانه (EUAC) سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، و جایگزینی تجهیزات است. البته، شبیه‌سازی سیستم نیز دارای قیودی مانند رعایت بیشینه و کمینه توان و انرژی تولیدی تجهیزات می‌باشد.



هزینه یکنواخت سالیانه تجهیز را می توان طبق رابطه زیر محاسبه کرد (ثنایی و شکرالهی^۱، ۲۰۰۴؛ کاشفی کاویانی^۲، ۲۰۰۸):

$$EUAC_i = N_i \times (CC_i + RC_i \times K_i + O \& MC_i \times PWA(ir, R)) \quad (30)$$

در عبارت فوق، N تعداد (unit) یا ظرفیت (kW) تجهیز، CC هزینه سرمایه گذاری اولیه (US\$/unit)، RC، هزینه هر بار جایگزینی (US\$/unit)، O & MC، هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (US\$/unit-yr) تجهیز بوده و R نیز طول عمر پروژه (در این مطالعه ۲۰ سال) است. ir ، بهره واقعی (در این مطالعه ۱۵ درصد) است، که بر حسب بهره نامی ($ir_{nominal}$) و نرخ تورم سالیانه (f)، طبق رابطه زیر محاسبه می شود.

$$ir = \frac{(ir_{nominal} - f)}{(1 + f)} \quad (31)$$

PWA و K نیز به ترتیب، فاکتور ارزش فعلی پرداخت های سالیانه γ و ثابت λ بوده اند، که به صورت زیر تعریف می شوند:

$$PWA(ir, R) = \frac{(1 + ir)^R - 1}{ir(1 + ir)^R} \quad (32)$$

$$K_i = \sum_{n=1}^{y_i} \frac{1}{(1 + ir)^{n \times L_i}} \quad (33)$$

L و y به ترتیب، تعداد جایگزینی ها و طول عمر مفید تجهیز مربوطه هستند. در نهایت، تابع هدف مسأله به صورت زیر تعریف می شود:

$$J = \min \left(\sum_i EUAC_i + C_{e-p} + C_{g-p} - I_{e-s} - (C_{env-wo-mt} - C_{env-w-mt} + I_{env-net-w-mt}) - I_{demand} - I_{peak-shaving} \right) \quad (34)$$

- 1 - Sanaye & Shokrollahi.
- 2 - Kashefi Kaviani.
- 3 - Capital Cost.
- 4 - Real interest rate.
- 5 - Nominal interest rate.
- 6 - Annual inflation rate.
- 7 - Annual Payment Present Worth.
- 8 - Single payment present worth.

در عبارت فوق، i نشان‌دهنده تجهیز مورد نظر بوده، C_{e-p} هزینه انرژی الکتریکی خریداری شده از شبکه، C_{g-p} هزینه گاز خریداری شده از شبکه، I_{e-s} درآمد حاصل از انرژی الکتریکی فروخته شده به شبکه و X نیز یک بردار صدتایی، متشکل از متغیرهای بهینه‌سازی است. تابع هدف فوق باید با در نظر گرفتن قیود زیر بهینه شود:

$$0 \leq N_i \quad (35)$$

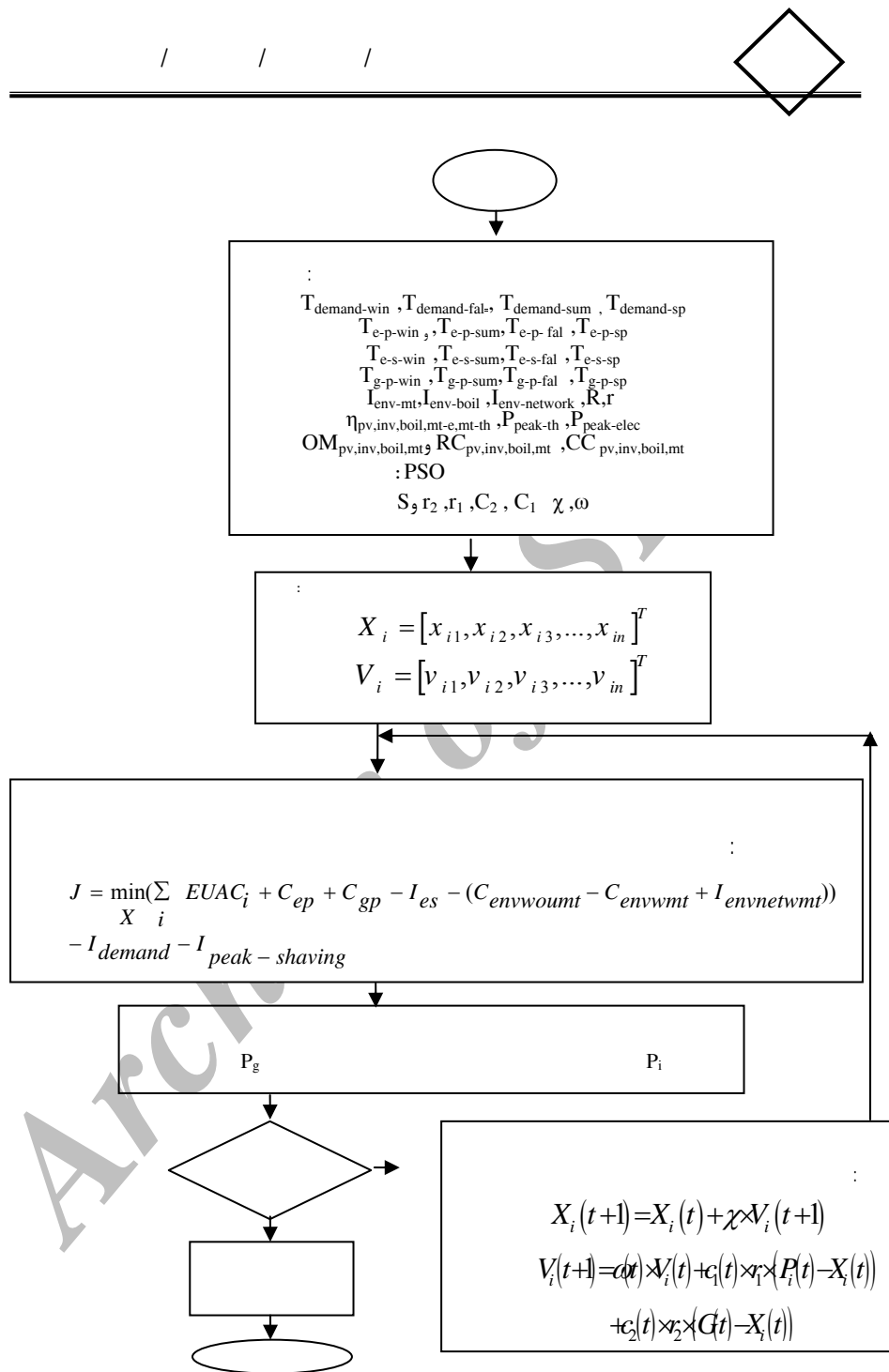
$$0 \leq \theta_{pv} \leq \frac{\pi}{2} \quad (36)$$

در قید (۱-۳۶)، θ_{pv} زاویه نصب پانل فتوولتائیک است.

۶- بهینه سازی سیستم با استفاده از الگوریتم PSO

الگوریتم اجتماع ذرات (PSO) که ایده اولیه آن از حرکت پرندگان یا ماهی‌ها اقتباس شده، توسط کندی و ابرهارت^۱ (۱۹۹۵) ابداع گردید. فلوجارت روند بهینه‌سازی سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم PSO، با در نظر گرفتن هزینه‌های آینده‌های زیست محیطی، در شکل ۳ نشان داده شده است.

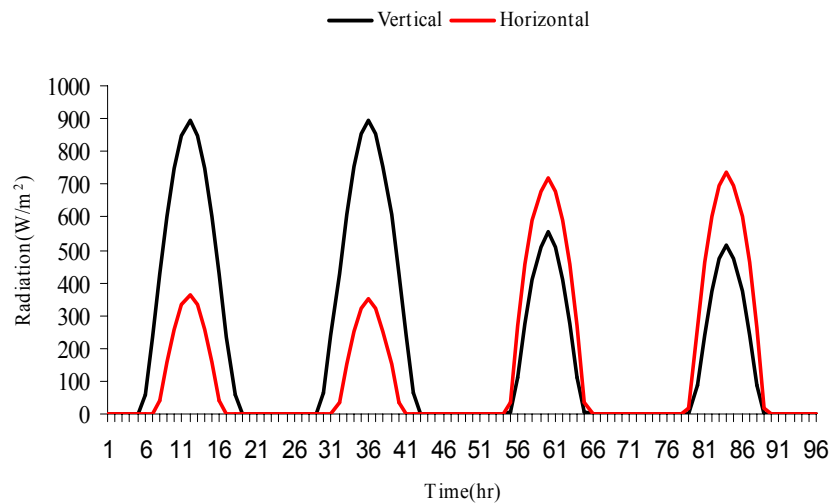
1 - Kennedy & Eberhart.



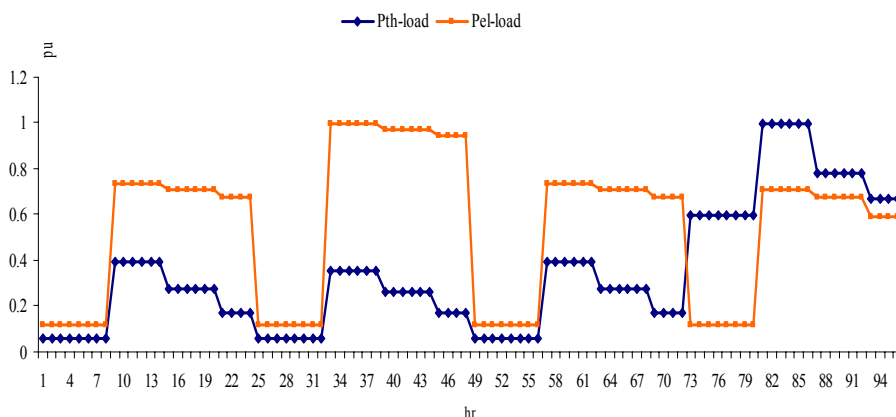
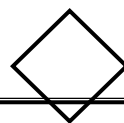
شکل ۳- فلوچارت روند بهینه‌سازی سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک با استفاده از الگوریتم PSO، با در نظر گرفتن هزینه آلاینده‌های زیست محیطی

۷- نتایج مدل

در این بخش ترکیب بهینه سیستم مختلط مدل شده، برای حالت‌های مختلف محاسبه می‌شود. سیستم فوق با استفاده از الگوریتم اجتماع ذرات بهینه‌سازی می‌شود. برای این منظور، نرم‌افزاری تحت محیط برنامه‌نویسی MATLAB، آماده شده است. داده‌های سیستم، شامل، اطلاعات تابش عمودی و افقی که در شکل ۴ نشان داده شده است. و منحنی سالیانه بارالکتریکی و حرارتی (این منحنی به صورت پریونیت برای تمامی بیمارستان‌ها در نظر گرفته شده است، که با توجه به پیک بار الکتریکی و حرارتی هر بیمارستان قابل تعمیم است)، در شکل ۵ نشان داده شده است، لازم به ذکر است که مبدأ محور افقی ساعت یک بامداد اول فروردین را نشان می‌دهد، همچنین این منحنی به صورت ۴ قسمت (هر قسمت مربوط به یک فصل) است، که ۰-۲۴، محور افقی منحنی بار الکتریکی و حرارتی روزانه فصل بهار، ۲۵-۴۸، محور افقی منحنی بار الکتریکی و حرارتی روزانه فصل تابستان، ۴۹-۷۲، محور افقی منحنی بار الکتریکی و حرارتی روزانه فصل پاییز و ۷۳-۹۶، محور افقی منحنی بار الکتریکی و حرارتی روزانه فصل زمستان است.



شکل ۴- تابش افقی و عمودی سالیانه [۲۹]



شکل ۵ - منحنی بار الکتریکی و حرارتی ۲۴ ساعته یک روز از هر فصل (۰-۲۴، بهار، ۲۵-۴۸، تابستان، ۴۹-۷۲، پاییز و ۷۳-۹۶، زمستان) برای بیمارستان به صورت پرونیوت

جدول ۱، نیز شامل مشخصات نامی تجهیزات سیستم است که قبلاً" تشریح شده است.

جدول ۱- مشخصات نامی تجهیزات مورد استفاده در سیستم مختلط مورد بررسی

تجهیز	هزینه اولیه (US\$/unit)	هزینه جایگزین (US\$/unit)	هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه (US\$/unit-yr)	عمر مفید (سال)	بازدهی (درصد)
میکروتوربین	۹۵۰	۷۵۰	۰/۰۰۶	۱۰	۸۵
آرایه خورشیدی	۷۰۰۰	۶۰۰۰	-	۱۰	-
بوئیلر	۱۰۰	۷۵	۰/۰۰۱۵	۱۰	۸۰
مبدل DC/AC	۸۰۰	۷۵۰	۸	۱۵	۹۰

در این بخش، ۴ سناریو تعریف شده است، برای هر یک از این سناریوها تعرفه خرید و فروش انرژی الکتریکی برای حمایت از سیستم‌های تولید هم‌زمان و فتولتائیک، یکسان در نظر گرفته شده است. هزینه‌های انرژی الکتریکی و دیماند برای سناریوها به صورت سه تعرفه‌ای برای زمان‌های کم باری (از ساعت ۲۳ تا ۷)، میان باری (از ساعت ۷ تا ۱۹) و اوج باری (از ساعت ۱۹ تا ۲۳)، تعریف می‌شود. هزینه‌ی آلاینده‌های زیست محیطی برای هر سناریو در نظر گرفته شده است.

در این بخش، با توجه به این که سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک به شبکه سراسری انرژی الکتریکی متصل است، تولید انرژی الکتریکی سیستم ترکیبی از تولید انرژی الکتریکی نیروگاه‌ها می‌کاهد، از این رو استفاده از سیستم ترکیبی توسط مصرف‌کنندگان می‌تواند از ساخت نیروگاه‌های پر هزینه که انتقال انرژی الکتریکی آن به مصرف‌کنندگان با تلفات زیادی همراه است، جلوگیری کند و دولت نیز برای حمایت از استفاده‌کنندگان سیستم ترکیبی، درصدی از هزینه ساخت نیروگاه‌ها به ازای هر کیلووات را به‌عنوان یارانه به استفاده‌کنندگان اختصاص دهد. به‌منظور مشخص شدن مقدار هزینه پیک زدایی که سبب سودی پروژه می‌شود، هزینه پیک زدایی برای هر یک از این سناریوها، مختلف تعریف شده است. نتایج بهینه سازی این سناریوها در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲- نتایج حاصل از بهینه سازی سناریوها با در نظر گرفتن هزینه دیماند و هزینه پیک زدایی بر

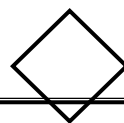
اساس تعرفه‌های واقعی انرژی الکتریکی

نسبت تعرفه انرژی و دیماند به تعرفه‌های داخلی کشور	تعرفه خرید برق (\$/kWh)	تعرفه فروش برق (\$/kWh)	تعرفه دیماند (\$/kW)	هزینه اجتماعی الاینده (\$/kWh)	هزینه پیک زدایی (\$/kW)	مقدار تابع هدف کل هزینه (سالانه) (\$/year)	ظرفیت فتوولتائیک (kW)	زاویه نصب پانل (°)	ظرفیت اینورتر (kW)	ظرفیت میکروتوربین (kW)
۱	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۳ میان باری: ۳ اوج بار: ۱۱.۸۰	۰/۱۰۰	۳۰۰	۳۳۴۳۰.۲	-	-	-	-
۲	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۲ میان باری: ۳ اوج بار: ۱۱.۸۰	۰/۱۰۰	۵۰۰	۷۹۴۱۹	-	۳۰۰	۳۳۳	-
۳	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۳ میان باری: ۳ اوج بار: ۱۱.۸۰	۰/۱۰۰	۱۰۰۰	۶۴۳۶۱	-	۳۱۵	۳۴۹	-
۴	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۰.۰۸۸ میان باری: ۰.۱۰۰ اوج بار: ۰.۱۶۵	کم باری: ۳ میان باری: ۳ اوج بار: ۱۱.۸۰	۰/۱۰۰	۱۱۰۰	-۲۹۵۴۹	-	۳۲۷	۴۹۵	-

در سناریوی ۱، تعرفه خرید و فروش انرژی الکتریکی از شبکه بر اساس تعرفه‌های کنونی بین‌الملل، برای ساعات کم باری، ۰/۰۸۸ دلار، میان باری، ۰/۱۰۰ دلار و اوج باری ۰/۱۶۵ دلار در نظر گرفته شده است. هم‌چنین هزینه‌های دیماند برای ساعات کم

۱- منظور از علامت منفی، عدم انتخاب توسط نرم افزار برای سناریو مورد نظر است.

۲- منظور از منفی بودن، سود متوسط سالیانه در مدت عمر پروژه است.



باری ۳ دلار، میان باری، ۳ دلار و اوج باری ۱۱/۸۰ دلار منظور شده است. هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی به ازای تولید هر kWh انرژی الکتریکی توسط نیروگاه، معادل ۰/۱۰۰ دلار است. با توجه به این فرضیات و نمودار بار الکتریکی و حرارتی بیمارستان مورد مطالعه (شکل ۵) و تابش افقی و عمودی سالیانه (شکل ۴) و هم‌چنین داده‌های جدول ۱ به‌عنوان ورودی‌های سیستم، نرم‌افزار اجرا شده است. پس از اجرا، نرم‌افزار بهره‌برداری از سیستم ترکیبی را پیشنهاد نمی‌دهد، یعنی در حقیقت با اختصاص ۳۰۰ دلار یارانه دولت به ازای هر کیلو وات نصب سیستم ترکیبی، برای این سناریو انتخاب سیستم ترکیبی مقرون به صرفه نیست. سناریوی ۲، همان سناریوی ۱ است با این تفاوت که هزینه‌های پیک زدایی برای آن ۵۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. سناریوی ۲، پس از اجرا منجر به بهره‌برداری شده است، که ظرفیت میکروتوربین انتخابی ۳۳۰ kW، ظرفیت اینورتر، ۳۰۰ kW و سیستم فتوولتائیک انتخاب نشده است، هم‌چنین هزینه سالیانه این سیستم در طول عمر پروژه معادل ۷۹۴۱۹ دلار است.

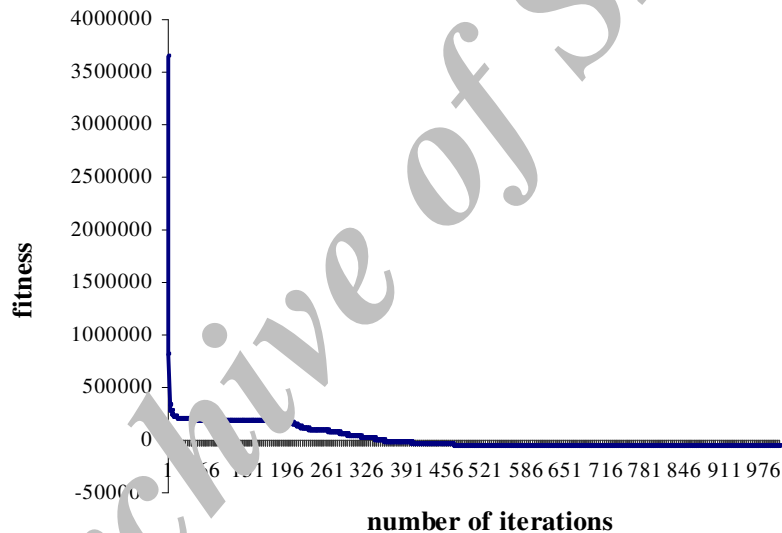
هدف از تعریف سناریوی ۱ و ۲، تأثیر هزینه‌های پیک زدایی با توجه به ثابت بودن سایر هزینه‌های انرژی الکتریکی بوده است.

سناریوی ۳، همان سناریوی ۱، است با این تفاوت که هزینه پیک‌زدایی آن برابر ۱۰۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. سناریو ۳ پس از اجرا منجر به بهره‌برداری شده که ظرفیت میکروتوربین انتخابی ۳۴۹ kW و ظرفیت اینورتر ۳۱۵ kW در نظر گرفته شده است، هم‌چنین سود سالیانه این سیستم در طول عمر پروژه، معادل ۶۴۳۶۱ دلار است، یعنی دولت با دادن ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلو وات نصب سیستم ترکیبی با توجه به تعرفه‌های واقعی، می‌تواند نصب سیستم ترکیبی را برای مصرف‌کنندگان مقرون به صرفه کند.

سناریوی ۴، همان سناریوی ۱ است، با این تفاوت که هزینه پیک زدایی آن برابر ۱۱۰۰ دلار در نظر گرفته شده است. سناریوی ۴ پس از اجرا منجر به بهره‌برداری شده است، که ظرفیت میکروتوربین انتخابی، ۴۹۵ kW و ظرفیت اینورتر، ۳۲۷ kW و سیستم فتوولتائیک انتخاب نشده است، هم‌چنین سود سالیانه این سیستم در طول عمر پروژه معادل ۲۹۵۴۹ دلار است.

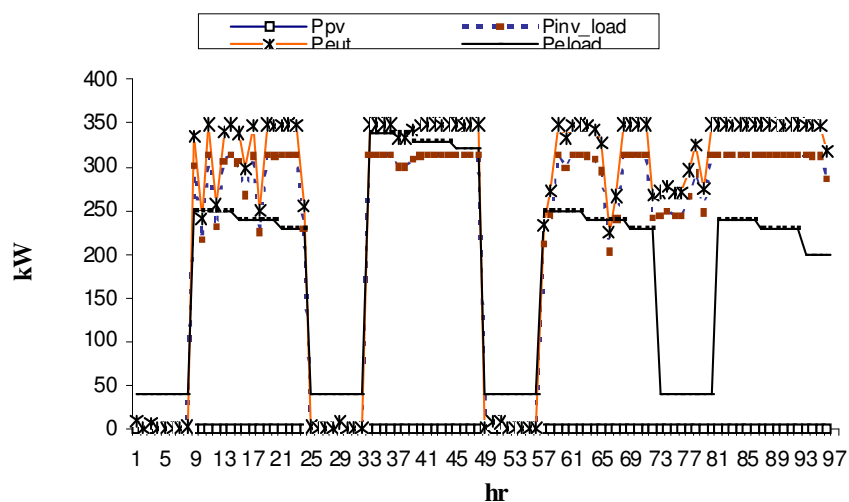
فتوولتائیک انتخاب نشده است، همچنین سود سالیانه این سیستم در طول عمر پروژه معادل ۲۹۵۴۹ دلار است.

هدف از تعریف سناریوهای ۲، ۳ و ۴، مقایسه تأثیر افزایش هزینه پیک زدایی شبکه و مشخص شدن محدوده سودهای سالیانه پروژه، با افزایش هزینه پیک زدایی با توجه به ثابت بودن سایر هزینه‌های انرژی الکتریکی بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده، سناریوی ۳ بهترین سناریو برای بهره‌بردار است. نتایج حاصل از نحوه بهره‌برداری سناریوی ۳ در شکل‌های زیر نشان داده شده است. شکل ۶، نحوه هم‌گرایی الگوریتم PSO را پس از ۱۰۰۰ تکرار نشان می‌دهد:



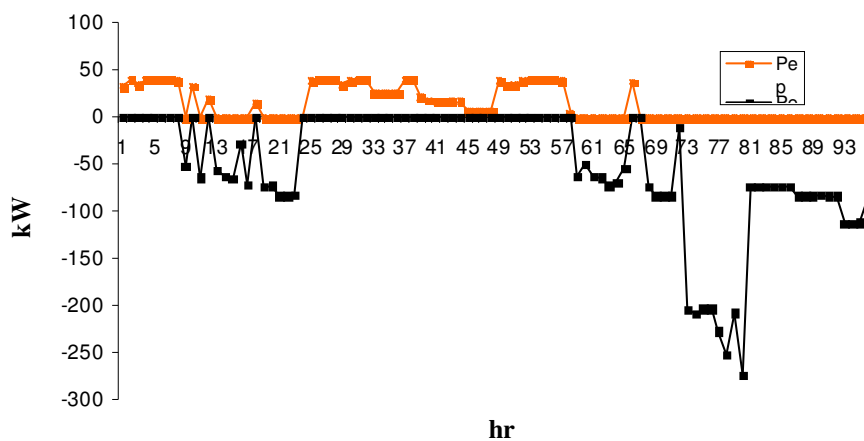
شکل ۶ - منحنی هم‌گرایی الگوریتم PSO (سناریو ۳)

در شکل ۷، میزان بار مصرفی ساختمان مورد مطالعه با تولید الکتریکی میکروتوبان و فتوولتائیک، همچنین انرژی الکتریکی عبوری از اینوتران نشان داده شده است:



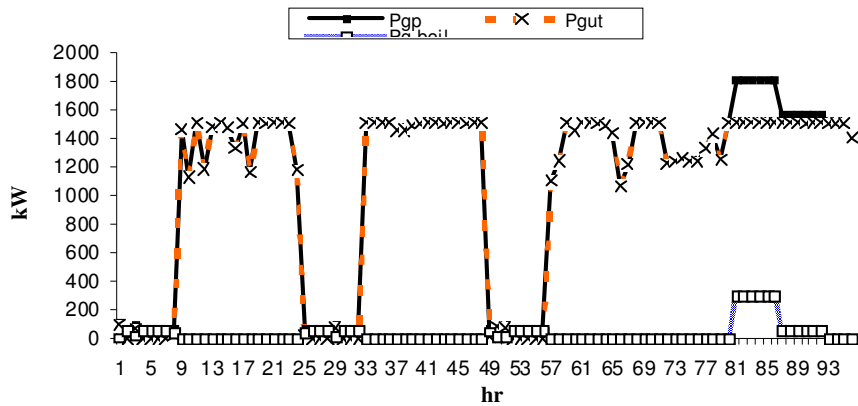
شکل ۷ - منحنی بار الکتریکی مصرفی و منحنی‌های میزان تولید انرژی الکتریکی توسط میکروتوربین و فتوولتائیک، همچنین انرژی الکتریکی عبوری از اینورتر (سناریوی ۳)

در شکل ۸، نحوه خرید و فروش انرژی الکتریکی توسط بهره‌بردار در طول سال نشان داده شده است:



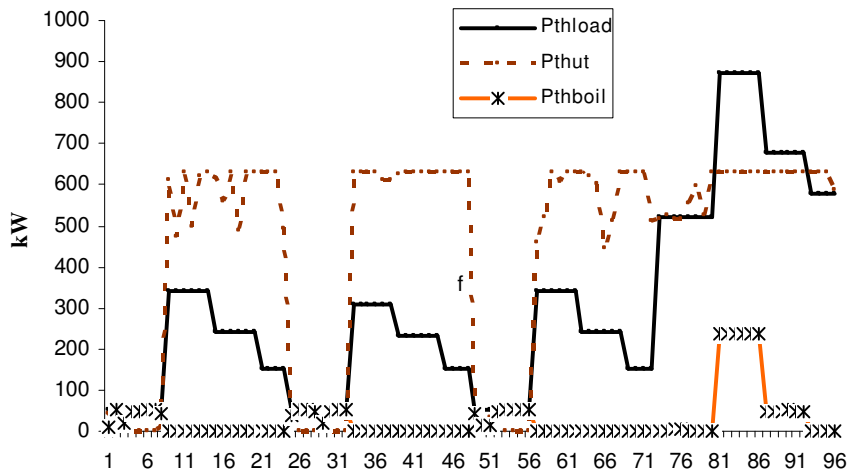
شکل ۸ - منحنی‌های فروش انرژی الکتریکی مازاد و خرید کمبود انرژی الکتریکی از شبکه (سناریوی ۳)

در شکل ۹، میزان مصرف گاز طبیعی میکروتوربین و بویلر برای تأمین انرژی حرارتی ساختمان مورد مطالعه، نشان داده شده است:

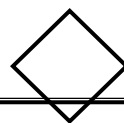


شکل ۹ - منحنی‌های مصرف گاز میکروتوربین و بویلر و منحنی خرید گاز از شبکه (سناریوی ۳)

در شکل ۱۰، میزان حرارت مصرفی ساختمان و نحوه تولید حرارت توسط میکروتوربین و بویلر در طول سال نشان داده شده است:



شکل ۱۰- منحنی بار حرارتی مصرفی و منحنی‌های حرارت تولیدی توسط میکروتوربین و بویلر (سناریوی ۳)



۸- نتیجه گیری

در این مطالعه، برای تمامی سناریوها، داده‌های تابش و الگوی بار نوعی بیمارستانی با پیک بار الکتریکی ۳۴۰ کیلو وات و بار حرارتی ۸۷۰ کیلو وات در نظر گرفته شده‌است. هدف از بهینه‌سازی، کمینه کردن هزینه‌های سیستم طی یک دوره کارکرد ۱۰ ساله با در نظر گرفتن قیود فنی و هزینه آلاینده‌های زیست محیطی است. پس از اجرای سناریوها توسط نرم افزار، نتایج زیر حاصل شده است:

نتایج به دست آمده از سناریوها نشان می‌دهد که تعرفه خرید و فروش انرژی الکتریکی، تعرفه‌های دیماند، هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی، بر بهره‌برداری بهینه از سیستم ترکیبی تأثیرگذارند. نتایج سناریوی ۳ نشان می‌دهد در حالتی که تعرفه‌های انرژی واقعی و تعرفه پیک زدایی (پارانه‌ای که دولت به ازای نصب هر کیلووات سیستم ترکیبی به استفاده کننده می‌دهد) بالاتر از $1000 \text{ \$/kW}$ باشد، در طول عمر پروژه سالانه، معادل ۶۴۳۶۱ دلار سود می‌دهد هم‌چنین ظرفیت‌های بهینه میکروتوربین، اینورتر، به ترتیب 349 kW ، 315 kW انتخاب شده است.

فهرست منابع

Acharya, P. Mahat, N. Mithulananthan, "An Analytical Approach for DG Allocation in Primary Distribution Network", *Electrical Power and Energy Systems* 28 (2006) 669–678.

Ackermann, T., Andersson, G., Soder, L. "Distributed generation: a definition", *Electric Power Systems Research* 57, 195–204, 2001.

Barker, R. W. De Mello, "Determining the impact of distributed generation on power systems. I. Radial distribution systems", *Proceeding of the power Engineering society Summer Meeting IEEE*, vol. 3, pp. 1645-1656, 2000.

Borges, D.M. Falcao, "Optimal Distributed Generation Allocation for Reliability, Losses, and Voltage Improvement", *Electrical Power and Energy Systems* 28 (2006) 413–420.

Catalogue of CHP Technologies, U. S., Environmental Protection agency, Prepared by Energy Nexus Group, March 2002.

El-Khattam, W., Salama, M. M. A., "Distributed generation technologies, definitions and benefits", *Electric Power Syst. Res.*, pp. 119-128, 2004.

Energy Balance of Islamic Republic Iran, 1385.

Gustafsson., Optimization of Building Retrofits in a Combined Heat and Power Network, Energy 1992, 17(2):161-71.

Hamilton, S. L., "Project Title: Micro Turbine Generator Program", IEEE, Proceedings of the 33rd Hawaii International Conference, 2000.

Hedman, B., et al, "Gas-Fired Distributed Energy Resource Technology Characterizations", joint project of the Gas research Institute (GRI) and the NERL, October 2003.

Hoff, T.E., Herig, C., Shaw, R. W., Wenger, H. J., "Distributed Generation and Micro- Grids,".

Kalina, Janusk Skorek, CHP Plants for Distributed Generation- Equipment Sizing and System Performance Evaluation, Institute of Thermal Technology, Konarskiego 22, 44-101 Gliwice, Poland.

Kashefi Kaviani, "Economic design of a hybrid wind-solar power plant according to reliability indices, using intelligent algorithm PSO", Proceedings of the Amirkabir University of Technology, Electrical Engineering Department, Tehran, Iran, spring, 2008.

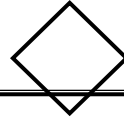
Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataraman., V. GereZ, "Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand Alone Wind, Photovoltaic and Hybrid Wind/PV Systems", IEEE Transaction on Energy Conversion, Volume 13, Issue 1, March 1998 Page(s):70-75.

Kennedy J, Eberhart RC, Particle Swarm Optimization, Proc Of IEEE international conference on Neural Networks (ICNN), Vol 4, 99 1942-1948, Perth, Australia, 1995.

Khan, M.T. Iqbal, "Pre-feasibility Study of Stand-alone Hybrid Energy Systems for Applications in Newfoundland", Renewable Energy 30 (2005) 835-854.

Kim, S., Song, J., Yu, G., "Load Sharing Operation of a 14kW Photovoltaic/Wind Hybrid Power System," Photovoltaic Specialists Conference, Conference Record of the Twenty-Sixth IEEE 1997, pages 1325-1328.

Kitamura, S., Mori, K., Shindo, S., "Modified Multiobjective Particle Swarm Optimization Method and Its Application to Energy Management System for Factories," Advanced Technology R&D Center, Mitsubishi Electric Corp. Japan, Vol.156, No.4, 2006.



Koutroulis, E., Kolokotsa, D., Potirakis, A., Kalaitzakis, K., "Methodology for Optimal Sizing of Stand-alone Photovoltaic/Wind-generator Systems using Genetic Algorithms," Solar Energy 80 (2006) 1072-1088.

Mellit, A., Benghanme, M., Hadj arab, A., Guessoum, A., "An Adaptive Wavenet for Sizing of Stand Alone Photovoltaic Systems," Proceedings of the IEEE International Conference on Mechatronics, 2004, ICM '04, 3-5 June 2004 Page(s):1-6.

Nichols, D.K. and Loving, K.P," Assessment of Microturbine Generators", IEEE Power Engineering society , Vol. 4,July 2003.

Pepermans, G., Driesen, J., Haeseldonckx, D., Belmans, R., D'haeseleer, W., "Distributed generation: definitions, benefits and issues" , Energy Policy, pp. 1-12 , 2003.

Rahman, S.R.A. Rahim, I. Musirin, "Optimal Allocation and Sizing of Embedded Generators", In Proceedings of National Power and Energy Conference,2004, PECon 2004, Issue, 29-30, Nov. 2004, Page(s): 288-294.

Sanaye, Shahabeddin shokrollahi, Selection and sizing of prime movers in combined heat and power systems, proceeding of ASME Turbo Expo 2004, June 14-17, Vienna,Austria.

Staunton, R.H. and Ozpineci, B., "Microturbine Power Conversion Technology Review", Oak Ridge National Laboratory, 2003.

Thomas, A., Goran, A., Lennart, S., " Distributed generation: A definition ", Electric Power Syst. Res. 57 (3) ,pp. 195-204, 2001.

Wang, L., Singh, C., "Stochastic combined heat and power dispatch based on multi – objective particle swarm optimization," Journal of Electrical Power, vol. 30, pp. 226-234, 2008.

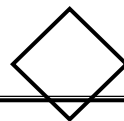
Yang, H., Zhou, W.,"Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm, "Journal of Solar Energy, vol. 82, pp. 354-367, 2008.

[http:// www.eia.doe.gov](http://www.eia.doe.gov), solar2\Renewable electricity purchases history and recent developments.htm

<http://CaliforniaSolarCenter.org/history-solarthermal/html>

فهرست علائم و اختصارات

- P_{e-mt} : توان الکتریکی خروجی میکروتوربین (kW)
- P_{pv} : توان الکتریکی خروجی فتوولتائیک خورشیدی (kW)
- $P_{inv-load}$: توان انتقالی از مبدل DC/AC به بار (مجموع توان تولید شده توسط واحدهای خورشیدی و میکروتوربین) (kW)
- P_{e-load} : توان الکتریکی مصرف کننده (kW)
- P_{e-s} : توان فروخته شده به شبکه (kW)
- P_{e-p} : توان خریداری شده از شبکه (kW)
- P_{g-p} : گاز خریداری شده از شبکه (kW)
- P_{g-mt} : گاز مصرفی میکروتوربین (kW)
- P_{g-boil} : گاز مصرفی بویلر (kW)
- P_{th-mt} : توان حرارتی خروجی میکروتوربین (kW)
- $P_{th-boil}$: توان حرارتی خروجی بویلر (kW)
- $P_{th-load}$: توان حرارتی مصرف کننده (kW)
- $C_{env-net-wo-mt}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها برای تأمین بار الکتریکی بدون میکروتوربین
- $I_{env-network}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها برای تولید انرژی الکتریکی توسط نیروگاه
- $C_{env-gas-wo-mt}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها برای تأمین بار حرارتی بدون میکروتوربین
- $I_{env-boil}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها برای تولید انرژی حرارتی توسط بویلر
- $C_{env-net-w-mt}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها حاصل کسری بار الکتریکی (خرید از شبکه) توسط نیروگاه با در نظر گرفتن میکروتوربین
- $I_{env-net-w-mt}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها حاصل انرژی الکتریکی تولیدی میکروتوربین که به شبکه فروخته می‌شود و از انرژی الکتریکی تولیدی نیروگاه می‌کاهد.
- I_{env-mt} : هزینه اجتماعی آلاینده‌ها توسط میکروتوربین
- $C_{env-gas-w-mt}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌ها برای تأمین بار حرارتی با میکروتوربین
- $C_{env-wo-mt}$: کل هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی بدون میکروتوربین
- $C_{env-w-mt}$: کل هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی همراه با میکروتوربین
- $I_{demand-sp1}$: هزینه دیماندر در ساعات کم باری یک ماه از فصل بهار، با حضور سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک



$I_{demand-sp2}$: هزینه دیماندر ساعات میان باری یک ماه از فصل بهار، با حضور سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک

$I_{demand-sp3}$: هزینه دیماندر ساعات اوج باری یک ماه از فصل بهار، با حضور سیستم ترکیبی میکروتوربین و فتوولتائیک

$P_{e-peak-load-sp1}$: پیک بار الکتریکی در ساعات کم باری یک ماه از فصل بهار

$P_{e-peak-load-sp2}$: پیک بار الکتریکی در ساعات میان باری یک ماه از فصل بهار

$P_{e-peak-load-sp3}$: پیک بار الکتریکی در ساعات اوج باری یک ماه از فصل بهار

$P_{e-p-sp1}$: پیک بار الکتریکی خریداری شده از شبکه، در ساعات کم باری یک ماه از فصل بهار

$P_{e-p-sp2}$: پیک بار الکتریکی خریداری شده از شبکه، در ساعات میان باری یک ماه از فصل بهار

$P_{e-p-sp3}$: پیک بار الکتریکی خریداری شده از شبکه، در ساعات اوج باری یک ماه از فصل بهار

$T_{demand1}$: تعرفه دیماندر ساعات کم باری

$T_{demand2}$: تعرفه دیماندر ساعات میان باری

$T_{demand3}$: تعرفه دیماندر ساعات اوج باری

متغیرهای مربوط به فصل تابستان، پاییز و زمستان، به ترتیب با زیرنویس‌های sum ، win و fal نشان داده شده‌اند.

$I_{peak-shaving}$: هزینه پیک زدایی شبکه در حالت اتصال سیستم ترکیبی به شبکه

$Peak\ load_e$: پیک بار الکتریکی مکان مورد مطالعه (kW)

$Max(P_{e-p})$: پیک بار الکتریکی خریداری شده از شبکه با حضور سیستم ترکیبی

$T_{peak-shaving}$: تعرفه پیک زدایی شبکه (هزینه ساخت نیروگاه به ازای هر کیلووات

جهت تأمین انرژی) ($\$/Kw$)

$T_{demand-smm}$: تعرفه دیماندر انرژی الکتریکی در فصل تابستان

$T_{demand-sp}$: تعرفه دیماندر انرژی الکتریکی در فصل بهار

$T_{demand-fal}$: تعرفه دیماندر انرژی الکتریکی در فصل پاییز

$T_{demand-win}$: تعرفه دیماندر انرژی الکتریکی در فصل زمستان

T_{e-p-sp} : تعرفه خرید انرژی الکتریکی از شبکه در فصل بهار

- $T_{e-p-smm}$: تعرفه خرید انرژی الکتریکی از شبکه در فصل تابستان
 $T_{e-p-fal}$: تعرفه خرید انرژی الکتریکی از شبکه در فصل پاییز
 $T_{e-p-win}$: تعرفه خرید انرژی الکتریکی از شبکه در فصل زمستان
 T_{e-s-sp} : تعرفه فروش انرژی الکتریکی به شبکه در فصل بهار
 $T_{e-s-smm}$: تعرفه فروش انرژی الکتریکی به شبکه در فصل تابستان
 $T_{e-s-fal}$: تعرفه فروش انرژی الکتریکی به شبکه در فصل پاییز
 $T_{e-s-win}$: تعرفه فروش انرژی الکتریکی به شبکه در فصل زمستان
 T_{g-p-sp} : تعرفه خرید گاز از شبکه در فصل بهار
 $T_{g-p-smm}$: تعرفه خرید گاز از شبکه در فصل تابستان
 $T_{g-p-fal}$: تعرفه خرید گاز از شبکه در فصل پاییز
 $T_{g-p-win}$: تعرفه خرید گاز از شبکه در فصل زمستان
 $I_{env-network}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی توسط نیروگاه
 I_{env-mt} : هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی توسط میکروتوربین
 $I_{env-boil}$: هزینه اجتماعی آلاینده‌های زیست محیطی توسط بویلر
 $P_{peak-elec}$: پیک بار الکتریکی مصرفی
 $P_{peak-th}$: پیک بار حرارتی مصرفی
 $\eta_{pv,inv,boil,mt-e,mt-th}$: راندمان فتوولتائیک، اینورتر، بویلر و میکروتوربین
 $CC_{pv,inv,boil,mt}$: هزینه سرمایه‌گذاری فتوولتائیک، اینورتر، بویلر و میکروتوربین
 $RC_{pv,inv,boil,mt}$: هزینه جایگزینی فتوولتائیک، اینورتر، بویلر و میکروتوربین
 $OM_{pv,inv,boil,mt}$: هزینه تعمیرات و نگهداری فتوولتائیک، اینورتر، بویلر و میکروتوربین

میکروتوربین