



Research Article

# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

(2025) 4(3):24-43

## Optimal Design and Two-Level Power Management of a Hybrid Energy System Based on The Simultaneous Production of Electricity and Heat

Ahmad Rouhani<sup>1</sup>, PhD Student, Mahmood Joorabian<sup>1</sup>, Professor, Seyed Saeidollah Mortazavi<sup>1</sup>, Professor

<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Shahid Chamran University of Ahvaz, Ahvaz, Iran

### Abstract:

Today, the widespread presence of renewable production sources alongside non-renewable production sources along with energy storage devices as a hybrid energy system has solved many problems of energy production and storage units in power systems. Optimum power management to increase reliability and continuous supply of load is one of the basic challenges of these systems. Therefore, according to the existence of the main and backup systems, it is necessary to use an optimal power management strategy that fits the system structure. In this article, in addition to designing and optimizing the dimensions of the system, a power management strategy suitable for the structure of the hybrid energy system is proposed with various goals, such as providing electric and thermal load, optimizing the dimensions of the system, reducing the costs of construction, production and operation and increasing the penetration rate of renewable resources is presented in order to reduce environmental pollution. For this purpose, the mathematical model of the system components and the formulation of electric and thermal power have been done, and the multi-objective cost function with several technical and economic constraints has been minimized with the help of particle swarm optimization. The efficiency of the designed energy management strategy has been analyzed using the weather information of Shiraz city, and the appropriate performance of the system has been shown in the continuous supply of electrical and thermal load in different scenarios. As can be seen, the amount of costs for the heating system and fuel cell has decreased to \$1200,000.

**Keywords:** Combined heat and power, Energy storage system, Hybrid energy system, Power management, Renewable energy

**Received:** 23 June 2024

**Revised:** 4 August 2024

**Accepted:** 23 August 2024

**Corresponding Author:** Dr. Mahmood Joorabian, mjoorabian@scu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1127081>



### طراحی بهینه و مدیریت توان دو سطحی یک سیستم هیبرید انرژی مبتنی بر تولید همزمان برق و گرما

احمد روحانی<sup>۱</sup>، دانشجوی دکتری، محمود جورابیان<sup>۱</sup>، استاد، سید سعید اله مرتضوی<sup>۱</sup>، استاد

۱- گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز، اهواز، ایران

**چکیده:** امروزه حضور گسترده منابع تولید تجدیدپذیر در کنار منابع تولید تجدید ناپذیر به همراه ذخیره سازهای انرژی بعنوان یک سیستم هیبرید انرژی بسیاری از مشکلات واحد تولید و ذخیره سازی انرژی را در سیستم‌های قدرت حل نموده است. مدیریت بهینه توان جهت افزایش قابلیت اطمینان و تأمین پیوسته بار یکی از چالش‌های اساسی این سیستم‌ها می‌باشد. لذا با توجه به وجود سیستم‌های اصلی و پشتیبان، استفاده از یک استراتژی مدیریت توان بهینه و متناسب با ساختار سیستم ضروری می‌باشد. در این مقاله علاوه بر طراحی و بهینه سازی ابعاد سیستم، یک استراتژی مدیریت توان متناسب با ساختار سیستم هیبرید انرژی پیشنهادی با اهداف مختلفی از جمله تأمین بار الکتریکی و حرارتی، بهینه‌سازی ابعاد سیستم، کاهش هزینه‌های ساخت، تولید و بهره‌برداری و افزایش ضریب نفوذ منابع تجدیدپذیر به منظور کاهش آلاینده‌های زیست محیطی ارائه شده است. بدین منظور مدل ریاضی اجزای سیستم و فرمولبندی توان الکتریکی و حرارتی انجام شده و تابع هزینه چند هدفه با قیود متعدد فنی و اقتصادی به کمک روش بهینه‌سازی هوشمند ازدحام ذرات کمینه شده است. کارایی استراتژی مدیریت انرژی طراحی شده با استفاده از اطلاعات آب و هوایی شهر شیراز مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته و عملکرد مناسب سیستم را در تأمین پیوسته بار الکتریکی و حرارتی در سناریوهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می‌شود مقدار هزینه‌ها برای سیستم حرارتی و پیل سوختی به ۱۲۰۰۰۰۰ دلار کاهش یافته است.

**واژه های کلیدی:** انرژی تجدیدپذیر، تولید همزمان برق و گرما، سیستم هیبرید انرژی، مدیریت توان

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۴/۰۳

تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۳/۰۵/۱۴

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۶/۰۲

نویسنده‌ی مسئول: دکتر محمود جورابیان، mjoorabian@scu.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/TEEGES.2025.1127081>





## ۱-۱- انگیزه و ضرورت انجام پژوهش

از محورهای اساسی در سیاست گذاری های کلان تولید و مصرف انرژی الکتریکی بر مبنای تامین انرژی محلی با هدف کاهش هزینه، افزایش راندمان و همچنین انتشار کمتر آلاینده‌ها می‌باشد. بکارگیری منابع تجدید پذیر در کنار منابع سوخت فسیلی در یک سیستم منفصل از شبکه در کشورهای در حال توسعه بیش از پیش مورد توجه قرار گرفته است. از طرفی حضور منابع تولید همزمان برق و گرما (CHP)<sup>۱</sup> در کنار این تولیدات ترکیبی در جهت تامین بار حرارتی<sup>۲</sup> باعث افزایش راندمان این سیستم‌های نوظهور شده است. طراحی ابعاد و مدیریت توان این سیستم‌ها در جهت رسیدن به بهینه ترین حالت از نظر فنی و اقتصادی همچنان بعنوان یک چالش اساسی مورد توجه محققان این حوزه می‌باشد. در دهه‌ی اخیر مطالعات و پژوهش‌های بسیار زیادی پیرامون این مسئله انجام شده است که در ادامه به نقد و بررسی آنها پرداخته شده است.

## ۱-۲- مروری بر پژوهش‌های پیشین

مسئله طراحی ریزشبکه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدید پذیر و مدیریت بهینه انرژی در دو دهه اخیر به شدت مورد توجه محققان صنعت برق قرار گرفته است و مراجع جامعی در این زمینه‌ها منتشر شده است. مباحث مربوط به بهینه سازی سیستم، استراتژی مدیریت انرژی در ریزشبکه‌های مستقل از شبکه و انواع روش‌های ابتکاری برنامه‌ریزی با تمرکز بر امکان‌سنجی اقتصادی به طور جامع در مراجع [۱-۳] به بحث و بررسی گذاشته شده است. سیستم‌های مدیریت انرژی در میکروگریدها در [۴] از نظر روش‌ها، راه حل‌ها و چشم اندازها مورد بررسی قرار گرفته است و همچنین بررسی ساختار و روش‌های مدیریت انرژی سیستم‌های هیبرید ذخیره ساز انرژی در [۵] ارائه شده است. در کنار این مطالعات جامع، پژوهش‌های موردی در مراجع مختلف معتبر منتشر شده است. بهینه سازی و کنترل دو مرحله‌ای شامل توزیع اقتصادی و تنظیم زمان واقعی در جهت مدیریت انرژی در سیستم‌های ترکیبی سرمایه‌ش، گرمایش و توان در مرجع [۶] مطرح شده است. در مرجع [۷]، مدل MILP برای طراحی (انتخاب فناوری، تعیین اندازه، مکان واحد، و ساختار شبکه توزیع) یک سیستم انرژی پراکنده با هدف کمینه سازی سرمایه گذاری و بهره برداری ارائه شده است. در مرجع [۸] مدل برنامه‌ریزی مبتنی بر روش فاصله‌ای برای ریزشبکه‌های انرژی چندگانه ارائه شده است. در این مرجع تجهیز لازم برای نصب، ظرفیت بهینه تجهیز، مکان بهینه تجهیز و عملکرد بهینه انواع انرژی تعیین می‌گردد طوری که در آن معادلات پخش توان الکتریکی و پخش توان حرارتی در مدل پیشنهادی گنجانده شده است. در یک مطالعه جامع مسئله بهره‌برداری مبتنی بر بهینه‌سازی فاصله‌ای با در نظر گرفتن پاسخ تقاضا در یک ریزشبکه ترکیبی گازی - الکتریکی مطرح شده است [۹]. در مرجع [۱۰]، مدل نیمه‌آنتروپی میانگین چندهدفه برای یک ریزشبکه خوداتکای دارای سیستم ترکیبی فوتوولتائی-بادی-باتری-دیزل ژنراتور جهت رسیدن به اهداف سود بیشینه و ریسک کمینه ارائه می‌شود. در مرجع [۱۱]، یک مدل بهینه سازی MINLP برای حل توزیع اقتصادی یک سیستم هیبریدی حاوی واحدهای CHP، ژنراتورهای متداول برق، واحدهای فقط حرارتی، توربین‌های بادی، سیستم فوتوولتائی و سیستم ذخیره‌سازی باتری تحت عدم قطعیت با هدف یافتن پاسخ بهینه توزیع اقتصادی ارائه شده است. در مرجع [۱۲]، استراتژی مدیریت بهینه انرژی در یک سیستم هیبریدی شامل واحدهای تولیدی کنترل پذیر (پیل سوختی، بویلر الکتریکی، تولید همزمان سرمایه‌ش، گرمایش و برق و چیلرهای الکتریکی)، واحدهای تولیدی کنترل‌ناپذیر (توربین بادی و پیل فوتوولتائی) و تجهیزات ذخیره‌سازی انرژی (ذخیره‌سازی باتری، مخزن ذخیره‌سازی حرارت و مخزن ذخیره‌سازی یخ) در هر دو حالت متصل به شبکه و جزیره‌ای ارائه شده است. طرح بهره‌برداری بهینه انرژی سیستم‌های هیبریدی با در نظر گرفتن مدل ریاضی بارهای محلی، داده‌های آب و هوایی محلی، ساختار تعرفه بهره‌برداری، مشخصات فناوری‌های مورد استفاده به عنوان منابع پراکنده (شامل مشخصات فنی و مالی) و نیز جنبه‌های جغرافیایی در [۱۳] ارائه شده است. در مرجع [۱۴]، طراحی بهینه منابع تولید پراکنده درون یک ریزشبکه هیبریدی مبتنی بر CHP با هدف کاهش هزینه و مزایای زیست محیطی انجام شده است. در مرجع [۱۵]، الگوریتم تعیین اندازه و مکان بهینه منابع انرژی پراکنده و تجدیدپذیر در سیستم‌های توزیع توان الکتریکی ارائه شده است و در مرجع [۱۶]، یک روش مقاوم و مبتنی بر سناریوی مدیریت انرژی با در نظر گرفتن بدترین مقدار تولید تجدیدپذیر و بار با اهداف اقتصادی ارائه شده است.





### ۱-۳- چالش اصلی و خلأهای علمی

با توجه به مرور مراجعه انجام شده در این حوزه مشاهده می‌شود که مسئله بهینه سازی ابعاد سیستم به همراه استراتژی مدیریت توان در ریزشیکه های هیبریدی به منظور تأمین همزمان بارهای حرارتی و الکتریکی به دلیل پیچیدگی های ایجاد شده در حل مسئله با در نظر گرفتن تابع هزینه چند هدفه و قیود مختلف تا کنون انجام نشده و بعنوان یک چالش همچنان مطرح می‌باشد. چالش ها و خلأهای موجود به شرح زیر هستند:

- حل مسائل قبلی به صورت محدود و تک هدفه
- در نظر نگرفتن قیود سخت
- تک مرحله ای بودن برنامه ریزی های قبلی

### ۱-۴- سهم مشارکت و نوآوری

سهم اصلی و نوآوری این مقاله ارائه یک الگوریتم جامع دو سطحی جهت طراحی بهینه و مدیریت توان یک سیستم هیبرید انرژی مبتنی بر تولید همزمان برق و گرما می‌باشد. در این طرح در گام اول هدف بهینه کردن مقدار توان الکتریکی پنل های فتوولتائیک<sup>۲</sup> و توربین بادی<sup>۳</sup>، توان حرارتی و ظرفیت بویلر، ظرفیت ذخیره سازها، توان حرارتی و الکتریکی CHP و همچنین توان مصرف کننده های حرارتی و الکتریکی می‌باشد. در گام دوم این مسئله بحث مدیریت بهینه توان با کمینه کردن تابع هدفی مبتنی بر هزینه کل سیستم شامل هزینه های نصب، راه اندازی، بهره برداری، تعمیر و نگهداری می‌باشد. قیود در نظر گرفته شده برای حل این تابع هدف، تأمین توان حرارتی و الکتریکی، قابلیت اطمینان بر مبنای کاهش احتمال از دست رفتن بار، ضریب نفوذ پذیری انرژی های تجدیدپذیر و میزان شارژ ذخیره سازهای حرارتی و الکتریکی می‌باشند. روش حل مسئله در نظر گرفته در این مقاله براساس بهینه سازی در فضای جستجوی الگوریتم ازدحام ذرات<sup>۴</sup> و به صورت چند هدفه<sup>۵</sup> با روش فرمول نویسی برنامه نویسی خطی عدد صحیح مختلط<sup>۶</sup> می‌باشد. نوآوری ها به صورت خلاصه به شرح زیر هستند:

- حل مسئله برنامه ریزی دو مرحله ای مدیریت ذخیره سازهای حرارتی-الکتریکی
- مدلسازی مسئله به صورت چندهدفه با قیود سخت
- استفاده از ترکیب الگوریتم ازدحام ذرات برای مرحله اول و الگوریتم خطی برای مرحله دوم
- اجرا بر روی نمونه عملی شهر شیراز

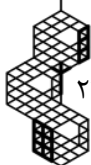
### ۱-۵- سازمان دهی مقاله

در این مقاله پس از معرفی ساختار سیستم هیبرید انرژی و مدلسازی اجزا به بررسی مدل ریاضی طراحی بهینه سیستم هیبرید انرژی پرداخته می‌شود. در بخش چهارم به بررسی استراتژی کنترل و مدیریت انرژی پرداخته شده است. در بخش پنجم به عملکرد سیستم هیبرید انرژی متشکل از پنل های خورشیدی و توربین های بادی با ذخیره سازی باتری و ترکیب پیل سوختی<sup>۷</sup> با الکترولیزور در طی یک روز کاری سیستم پرداخته شده است. در نهایت نتایج سیستم در بخش ششم و نتیجه گیری نهایی در بخش هفتم آورده شده است.

## ۲- ساختار سیستم هیبرید انرژی و مدلسازی اجزا

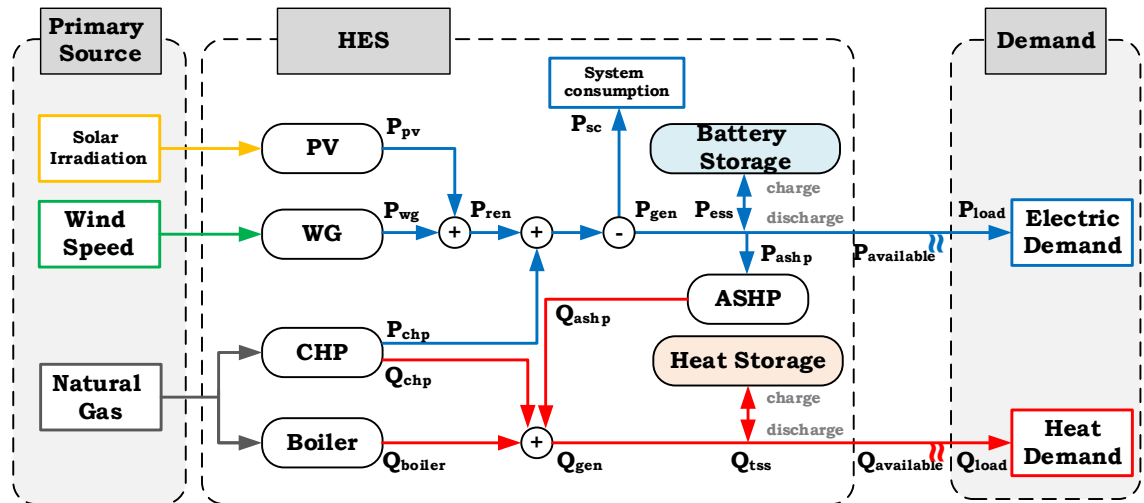
### ۲-۱- ساختار سیستم هیبرید انرژی مورد نظر

شکل (۱) سیستم هیبرید انرژی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این سیستم PV و WT، CHP-FC به عنوان منابع اصلی در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که از ترکیب FC و الکترولیزور به همراه باتری به عنوان سیستم پشتیبان و ذخیره کننده استفاده می‌شود. از آنجا که منابع انرژی اصلی و ذخیره ساز همگی سازگار با محیط زیست می‌باشد این سیستم تولید انرژی، کاملاً با محیط زیست سازگار است. هنگامی که انرژی بادی یا خورشیدی مازاد بر تقاضای بار موجود باشد، الکترولیزور روشن شده و شروع به تولید هیدروژن می‌کند. هیدروژن تولید شده در تانک ذخیره سازی نگهداری می‌شود. در صورتی که ظرفیت تانک ذخیره سازی هیدروژن تکمیل باشد، توان اضافی





به Dump load تحویل داده می‌شود. در مواقعی که توان تولیدی کاهش می‌یابد، با FC با هیدروژن ذخیره شده در تانک ذخیره‌سازی و در موارد خالی بودن این تانک به کمک هیدروژن ذخیره شده در تانک پشتیبان توان مورد نیاز سیستم را تأمین خواهد کرد. در این سیستم از باتری نیز جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود. در این سیستم، منابع مختلف انرژی به باس DC متصل شده و به وسیله یک اینورتر DC/AC بار را تأمین می‌کند. سیستم قابل گسترش بوده و منابع انرژی قابل دسترس دیگری را با توجه به شرایط منطقه مورد نظر می‌توان به سیستم اضافه کرد.



شکل (۱): بلوک دیاگرام سیستم هیبرید انرژی PV/WG/CHP

## ۲-۲-۲- مشخصات و مدل ریاضی اجزاء سیستم

به منظور طراحی سیستم بهینه با مدیریت انرژی و نیز مشاهده عملکرد سیستم در شرایط مختلف، وجود اطلاعات کافی از ساختار هر یک از اجزاء ضروری است. سیستم مورد نظر متشکل از توربین بادی، پنل فتوولتائیک، پیل سوختی، الکترولیزور و باتری می‌باشد. در این بخش هر یک از این اجزاء بررسی می‌شوند.

### ۲-۲-۲-۱- توربین بادی

توربین بادی با تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی و سپس با انتقال این انرژی به ژنراتور، الکتریسیته تولید می‌کند. توان خروجی توربین بادی از معادله (۱) بدست می‌آید [۱۷، ۱۸].

$$P_{WG} = 0.5 C_p (\lambda, \theta) \rho A V_w^3 \quad (1)$$

متغیرهای تعریفی این مقاله در جدول (۱) قابل مشاهده هستند.

جدول (۱): متغیرهای تعریفی مسئله

$C_{TAC}$	هزینه کل سالانه
$C_p$	ضریب عملکرد توربین بادی
$P_{WG}$	توان مکانیکی خروجی توربین
$\theta$	زاویه چرخش
$\lambda$	سرعت ماکزیمم
$\rho$ ( $\text{kg/m}^3$ )	چگالی هوا
$A$ ( $\text{m}^2$ )	سطح در برگیرنده پره‌های توربین
$V_w$	سرعت باد
$S_{pv}$ ( $\text{m}^2$ )	سطح PV



$PV\eta$	بازده PV
$P_{PV}$	توان اکتیو پنل های خورشیدی
$P_{Load}$	توان اکتیو بار
$P_{ESS}$	توان اکتیو ذخیره ساز
$CRF(r, L)$	ضریب بازبایی سرمایه
$C_{ini}$	هزینه سرمایه اولیه
$C_{rep}$	هزینه تعویض
$C_{main}$	هزینه تعمیر و نگهداری تجهیزات
$C_{ope}$	هزینه عملیات سالانه
$r$	نرخ بهره واقعی
$L$	کل زمان عمر پروژه
$k$	تعداد سالهای بهره برداری HES
$N$	نوع فناوری های DG
$N_k$	شماره نصب شده دستگاه k
$d$	نرخ تخفیف
$R_k^l$	شاخص جایگزینی دستگاه k (یک یا صفر)
$C_k^{main}$	هزینه تعمیر و نگهداری ثابت دستگاه برای هر واحد k
$C_f$	هزینه مصرف سوخت
$C_p$	هزینه جبران کمبود برق
$C_e$	هزینه جبران زیست محیطی
$P_{available}$	کل توان الکتریکی در دسترس برای تحویل به بار الکتریکی
$P_{load}$	توان بار الکتریکی
$Q_{available}$	کل توان حرارتی در دسترس برای تحویل به بار الکتریکی
$Q_{load}$	توان بار حرارتی
$Q_{tss}$	توان ذخیره کننده حرارتی
$p_k^{min}$	کمینه توان الکتریکی قابل تولید توسط تجهیز K
$p_k^{max}$	بیشینه توان الکتریکی قابل تولید توسط تجهیز K
$P_{k,t}$	توان الکتریکی تولید شده در هر لحظه توسط تجهیز K
$Q_k^{min}$	کمینه توان حرارتی قابل تولید توسط تجهیز K
$Q_k^{max}$	بیشینه توان حرارتی قابل تولید توسط تجهیز K
$Q_{k,t}$	توان حرارتی تولید شده در هر لحظه توسط تجهیز K
$SOC_{ess,t}^{\square}$	وضعیت شارژ ذخیره کننده الکتریکی در لحظه t
$SOC_{ess,end}^{\square}$	وضعیت شارژ ذخیره کننده الکتریکی در پایان دوره زمانی
$SOC_{ess}^{min}$	کمینه مقدار وضعیت شارژ ذخیره کننده الکتریکی
$SOC_{ess}^{max}$	بیشینه مقدار وضعیت شارژ ذخیره کننده الکتریکی
$SOC_{tss,t}^{\square}$	وضعیت شارژ ذخیره کننده حرارتی در لحظه t
$SOC_{tss,end}^{\square}$	وضعیت شارژ ذخیره کننده حرارتی در پایان دوره زمانی
$SOC_{tss}^{min}$	کمینه مقدار وضعیت شارژ ذخیره کننده حرارتی
$SOC_{tss}^{max}$	بیشینه مقدار وضعیت شارژ ذخیره کننده حرارتی
$\gamma_e^{CHP}$	ضریب تبدیل گاز به انرژی الکتریکی با CHP
$p_g^{CHP}$	میزان گاز ورودی به CHP
$P_{MT}$	توان اکتیو میکروتوربین
$Q_{MTu}$	حداکثر مقدار مجاز توان راکتیو میکروتوربین
$Q_{MTl}$	حداقل مقدار مجاز توان راکتیو میکروتوربین
$P_g^{BO}$	میزان گاز ورودی به بویلر



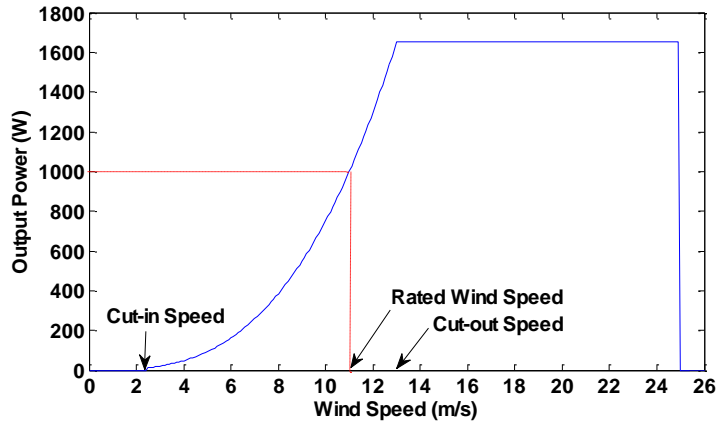
$H^{BO}$	توان حرارتی بویلر
$H^{BOu}$	حداکثر و مقدار مجاز توان حرارتی بویلر
$H^{BOl}$	حداقل مقدار مجاز توان حرارتی بویلر
$H^{CHP}$	ترتیب توان حرارتی سیستم ترکیبی برق و حرارت
$H^{DR}$	توان حرارتی در طرح پاسخ‌گویی بار
$H^D$	بار حرارتی
$\eta^H$	راندمان توربین در سیستم ترکیبی برق و حرارت
$\eta^L$	راندمان تلفاتی در سیستم ترکیبی برق و حرارت
$\eta^T$	راندمان حرارتی در سیستم ترکیبی برق و حرارت
$\xi$	ضریب نرخ مشارکت در طرح پاسخ‌گویی بار
$PDCHu$	حداکثر ظرفیت مجاز توان دشارژی سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$PCHu$	حداکثر ظرفیت مجاز توان شارژی سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$x$	متغیر باینری متناظر با عملکرد شارژ/دشارژ سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$SOC_{TSS}$	وضعیت شارژ ذخیره‌ساز حرارتی
$\eta^{pCH}$	راندمان دشارژ در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$\eta^{CH}$	راندمان شارژ در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$SOC_{TSS}^{ini}$	انرژی اولیه در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$SOC_{TSS}^l$	حداقل مقدار مجاز انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی
$SOC_{TSS}^u$	حداکثر مقدار مجاز انرژی قابل ذخیره در سیستم ذخیره‌ساز حرارتی

در شکل (۲) توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد ترسیم شده است. مشاهده می‌شود توان خروجی توربین از مقدار مشخصی از سرعت باد به بعد ثابت شده و برای سرعت‌های بیشتر از سرعت ماکزیمم، توربین متوقف می‌شود. مشخصات و پارامترهای توربین بادی استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۲) آورده شده است.

جدول (۲): مشخصات توربین بادی

توربین بادی	
KW <sub>۱</sub>	توان نامی
m/s ۲/۵	سرعت قطع پایین
m/s ۱۱	سرعت نامی
m/s ۱۳	سرعت قطع بالا
m ۲/۵	قطر روتور
Hz ۶۰	فرکانس نامی
\$ ۳۲۰۰	هزینه سرمایه اولیه
۱۰۰ \$/year	هزینه نگهداری و عملکرد
سال ۱۵	طول عمر
۱/۲۲۵ Kg/m <sup>3</sup>	چگالی هوا





شکل (۲): توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد

### ۲-۲-۲ - پنل فتوولتائیک

سیستم فتوولتائیک فرآیندی است که انرژی خورشید را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی از لحاظ فیزیکی شباهت بسیاری به دیودهای p-n دارند. سلول‌های فتوولتائیک چند بلوری در حال حاضر بهترین انتخاب از لحاظ قیمت و کیفیت می‌باشند. آنها بازده کمتری از تکنولوژی تک بلوری ارائه می‌دهند اما ارزانتر می‌باشند. این موارد دلیل استفاده این تکنولوژی در اکثر سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد. توان تولیدی PV از معادله (۲) بدست می‌آید [۱۷-۲۰].

$$P_{pv} = \text{insolation} \times \eta_{pv} \times S_{pv} \quad (۲)$$

در مدل PV از اثر دما بر سطح پنل صرف‌نظر شده است. سایر مشخصات PV در جدول (۳) ملاحظه می‌شود.

جدول (۳): مشخصات پنل فتوولتائیک

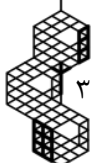
پنل فتوولتائیک	
پلی کریستالین	تکنولوژی
۱۲۰ W	توان ماکزیمم
۱۲ %	راندمان
۱/۰۷ m <sup>2</sup>	سطح هر ماژول
۱۶/۸ V	ولتاژ در P <sub>max</sub>
۷/۱۲ A	جریان در P <sub>max</sub>
۷/۷۴ A	جریان اتصال کوتاه
۲۱ V	ولتاژ مدار باز
۸۴/۴ \$/W <sub>peak</sub>	هزینه سرمایه اولیه
۰ \$/year	هزینه نگهداری و عملکرد
۲۰ سال	طول عمر

### ۲-۲-۳ - میکروتوربین گازی

در سیستم CHP، میزان انرژی الکتریکی تولید شده بوده که بصورت معادله (۳) محاسبه می‌شود،

$$P_{b,h,s}^{MT} = \gamma_e^{CHP} P_{g,h,s}^{CHP} \forall b, h, s \quad (۳)$$

قیود (۴) و (۵) شامل مدل بهره‌برداری میکروتوربین هستند. این محدودیت‌های اشاره به مدل منحنی قابلیت میکروتوربین دارند که به ترتیب بیانگر محدودیت توان اکتیو تولید و توان راکتیو قابل کنترل این نوع تولیدات پراکنده تجدیدناپذیر دارند [۲۱،۲۲].







$$P_b^{MTl} \leq P_{b,h,s}^{MT} \leq P_b^{MTu} \forall b, h, s \quad (4)$$

$$Q_b^{MTl} \leq Q_{b,h,s}^{MT} \leq Q_b^{MTu} \forall b, h, s \quad (5)$$

### ۲-۲-۴ - بویلر

بویلر نیز گاز مصرف کرده و انرژی حرارتی تولید می کند. رابطه بین ورودی و خروجی بویلر بصورت معادله (۶) محاسبه می شود:

$$H_{b,h,s}^{BO} = \gamma^{BO} \cdot P_{g,h,s}^{BO} \forall b, h, s \quad (6)$$

### ۲-۲-۵ - مبدل انرژی الکتریکی به حرارتی

بلوک حرارتی شامل سیستم ترکیبی برق و حرارت، بویلر و مصرف کننده های حرارتی دارای قابلیت طرح پاسخ گویی بار است. فرمول بندی بهره برداری آن در قیود (۷) - (۱۵) ارائه شده است. در قید (۷) تعادل توان حرارتی در این بلوک مدل سازی شده است. در روابط (۸) - (۱۱) مدل سیستم ترکیبی برق و حرارت در نظر گرفته شده است. به طوری که توان حرارتی تولید سیستم ترکیبی برق و حرارت براساس رابطه (۸) محاسبه می شود، که آن ضریبی از توان اکتیو تولیدی سیستم ترکیبی برق و حرارت می باشد. در قیود (۹) - (۱۰) فرمول بندی منحنی قابلیت سیستم ترکیبی برق و حرارت در بخش الکتریکی ارائه شده است، که این قیود به ترتیب اشاره به محدودیت توان اکتیو و راکتیو قابل کنترل توسط سیستم ترکیبی برق و حرارت را دارند. محدودیت توان حرارتی قابل تولید توسط سیستم ترکیبی برق و حرارت نیز در رابطه (۱۱) در نظر گرفته شده است. محدودیتی همانند رابطه (۱۱) برای بویلر وجود دارد که در رابطه (۱۲) مدل سازی شده است. در نهایت مدل بهره برداری طرح پاسخ گویی بار برای مصرف کننده حرارتی (الکتریکی) در قیود (۱۳) - (۱۵) بیان شده است. این نوع طرح پاسخ گویی بار متناسب با مدل تشویقی است. به طوری که مصرف کننده ها در این طرح پاسخ گویی بار با توجه به سیگنال قیمت انرژی، انرژی مصرفی خود را کاهش یا افزایش می دهند. به عبارتی، در طرح پاسخ گویی بار به منظور کمینه سازی هزینه ها مصرف کننده ها در ساعتی که قیمت انرژی بالا (پایین) است، انرژی مصرفی خود را کاهش (افزایش) می دهند. بنابراین قیود (۱۳) و (۱۴) متناسب با محدوده تغییرات توان مصرف کننده ها در طرح پاسخ گویی بار است، و آنها براساس این رابطه حداکثر با ضریب مشارکت  $\xi$  در طرح پاسخ گویی بار شرکت می کنند. علاوه بر این فرض شده است که در این طرح پاسخ گویی بار، مصرف کننده ها تا افق بهره برداری قادر هستند که کلیه انرژی مصرفی مورد تقاضای خود را از بازار انرژی خرده فروشی دریافت کنند. بنابراین برای رعایت این شرایط، قید (۱۵) به فرمول بندی طرح پیشنهادی اضافه می شود [۲۳، ۲۴].

$$H_{b,h,s}^{CHP} + H_{b,h,s}^{BO} + H_{b,h,s}^{DR} = H_{b,h,s}^D \forall b, h, s \quad (7)$$

$$H_{b,h,s}^{CHP} = \frac{P_{b,h,s}^{CHP} (1 - \eta_b^T - \eta_b^h)}{\eta_b^T} \cdot \eta_b^H \forall b, h, s \quad (8)$$

$$P_b^{CHPl} \leq P_{b,h,s}^{CHP} \leq P_b^{CHPu} \forall b, h, s \quad (9)$$

$$Q_b^{CHPl} \leq Q_{b,h,s}^{CHP} \leq Q_b^{CHPu} \forall b, h, s \quad (10)$$

$$H_b^{CHPl} \leq H_{b,h,s}^{CHP} \leq H_b^{CHPu} \forall b, h, s \quad (11)$$

$$H_b^{BOl} \leq H_{b,h,s}^{BO} \leq H_b^{BOu} \forall b, h, s \quad (12)$$

$$-\xi_b P_{b,h,s}^D \leq P_{b,h,s}^{DR} \leq \xi_b P_{b,h,s}^D, \forall b, h, s \quad (13)$$

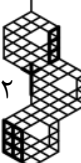
$$-\xi_b H_{b,h,s}^D \leq H_{b,h,s}^{DR} \leq \xi_b H_{b,h,s}^D, \forall b, h, s \quad (14)$$

$$\sum_{h \in OH} P_{b,h,s}^{DR} (\text{or } H_{b,h,s}^{DR}) = 0 \forall b, s \quad (15)$$

### ۲-۲-۶ - ذخیره کننده انرژی الکتریکی

باتری انتخاب شده جهت شبیه سازی از نوع lead-acid می باشد، برتری این نوع باتری بر موارد مشابه در راندمان بالا، هزینه پایین و تخلیه خودی کم (کمتر از ۵ درصد در ماه) می باشد. عیب اصلی آن وزن بالاست که در سیستم های ساکن قابل چشم پوشی است [۱۸]. توان ورودی باتری با توجه به عملکرد شارژ یا دشارژ می تواند مثبت یا منفی باشد. توان باتری از معادله (۱۶) بدست می آید.

$$P_{\text{ess}} = P_{\text{gen}} - P_{\text{sc}} - P_{\text{available}} \quad (16)$$



وضعیت شارژ باتری، طبق معادله (۱۷) از انرژی و راندمان باتری استنباط می‌شود [۲۵].

$$SOC_{ess} = \int (P_{ess,charge} \times \eta_{ess} - P_{ess,discharg}) dt \quad (17)$$

سایر مشخصات باتری در جدول (۳) ملاحظه می‌شود [۲۵،۲۶].

جدول (۳): مشخصات باتری

باتری	
سرب-اسید	تکنولوژی
۲۰ \$/KWh	هزینه سرمایه اولیه
۵ سال	طول عمر

### ۲-۲-۷- ذخیره کننده حرارتی

فرمول بندی این بخش در قیود (۱۸)-(۲۲) بیان شده است، که به ترتیب معرف محدودیت نرخ شارژ و دشارژ، انرژی ذخیره شده، انرژی اولیه در ساعت اول بهره برداری، محدودیت انرژی قابل ذخیره و محدودیت ظرفیت شارژر ذخیره ساز حرارتی هستند. در قیود (۱۸)-(۱۹)، متغیر باینری  $x$  به منظور جلوگیری از عملکرد همزمان ذخیره ساز حرارتی در مد شارژ و دشارژ استفاده می‌شود. به طوری که  $x = 1$  عملکرد ذخیره ساز حرارتی در مد شارژ است، در غیر این صورت آن در مد دشارژ فعالیت می‌کند. وضعیت شارژ سیستم ذخیره کننده حرارتی از رابطه (۲۰) بدست می‌آید. وضعیت انرژی اولیه ذخیره شده در ذخیره ساز حرارتی در (۲۱) ارایه شده است. محدودیت مقدار شارژ شیشتم ذخیره ساز حرارتی در رابطه (۲۲) آمده است.

$$0 \leq P_{b,h,s}^{CH} \leq x_{b,h} P_v^{CH} x_{b,h} \forall b, h, s \quad (18)$$

$$0 \leq P_{b,h,s}^{DCH} \leq P_b^{DCH} (1 - x_{b,h}) \forall b, h, s \quad (19)$$

$$SOC_{TSS,b,h+1,s} = SOC_{TSS,b,h,s} + \eta_b^{CH} P_{b,h,s}^{CH} - \frac{1}{\eta_b^{DCH}} P_{b,h,s}^{DCH} \forall b, h, s \quad (20)$$

$$SOC_{TSS,b,h,s} = SOC_{TSS,b}^{ini} \forall b, h = 1, s \quad (21)$$

$$SOC_{TSS,b}^l \leq SOC_{TSS,b,h,s} \leq SOC_{TSS,b}^u \forall b, h, s \quad (22)$$

### ۳- مدل ریاضی طراحی بهینه سیستم هیبرید انرژی

#### ۱-۳- تابع هدف

هزینه سیستم شامل هزینه خرید و نصب، هزینه جایگذاری، هزینه نگهداری و تعمیرات اجزا در طول مدت زمان عملکرد سیستم می‌باشد. هدف از بهینه سازی سیستم، کاهش هزینه کل سالیانه در مدت زمان عملکرد سیستم با رعایت قیود فنی، اقتصادی و زیست محیطی است. تابع هدف از معادله (۲۳) محاسبه می‌شود [۲۷]:

$$C_{TAC} = CRF(r, L) \times [C_{ini} + C_{rep} + C_{main}] + C_{ope} \quad (23)$$

که در آن ضریب کل بازیابی از معادله (۲۴) بدست می‌آید:

$$CRF(r, L) = \frac{r(1+r)^L}{(1+r)^L - 1} \quad (24)$$

#### ۳-۱-۱- هزینه اولیه

هزینه اولیه شامل هزینه تهیه و نصب تجهیزات می‌باشد که به صورت معادله (۲۵) محاسبه می‌شود:





$$C_{ini} = \sum_{k=1}^N N_k P_k^{rated}, \quad k = PV, WG, MT, ESS, TSS \quad (25)$$

### ۳-۱-۲- هزینه جایگذاری

در چرخه عملکرد سیستم هیبرید انرژی، هنگامی که زمان عملکرد (DER) به زمان تعیین شده برای سرویس رسید و یا تجهیز دچار آسیب شد، نیاز به جایگذاری تجهیز مورد نظر وجود دارد. در این مطالعه فقط هزینه سرویس به عنوان هزینه جایگذاری لحاظ شده که مطابق با معادله (۲۶) محاسبه خواهد شد:

$$C_{rep} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \frac{R_k^l N_k P_k^{rated}}{(1+d)^l} \quad (26)$$

### ۳-۱-۳- هزینه تعمیرات و نگهداری

هزینه تعمیرات و نگهداری مطابق با معادله (۲۷) محاسبه می شود:

$$C_{main} = \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^N \frac{C_k^{main} N_k}{(1+d)^l} \quad (27)$$

### ۳-۱-۴- هزینه بهره برداری

هزینه سالیانه بهره برداری از سه قسمت تشکیل شده است: هزینه مصرف سوخت، هزینه جریمه کمبود توان، هزینه جریمه آلودگی که به صورت معادله (۲۸) محاسبه می شود.

$$C_{ope} = C_f + C_p + C_e \quad (28)$$

### ۳-۲-۱- قیود بهینه سازی

برای دستیابی به عملکرد پایدار در یک سیستم هیبرید انرژی و دستیابی به سایر اهداف مورد نظر، قیود مختلفی را می بایست در طراحی و بهینه سازی در نظر گرفت که در ادامه شرح داده می شوند.

### ۳-۲-۱-۱- تعادل انرژی الکتریکی و حرارتی

تعادل انرژی الکتریکی تولیدی و انرژی الکتریکی مصرفی یکی از مهمترین قیود در طراحی بهینه سیستم هیبرید انرژی است که مطابق با معادله (۲۹) محاسبه می شود:

$$\min \Delta P = P_{available} - P_{load} \quad (29)$$

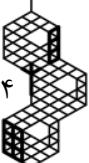
یکی دیگر از قیود مهم در سیستم هایی که شامل تکنولوژی تولید همزمان برق و حرارت می باشند، تعادل انرژی حرارتی تولیدی و انرژی حرارتی مصرفی است که از معادله (۳۰) محاسبه می شود:

$$\min \Delta Q = Q_{available} - Q_{load} \quad (30)$$

### ۳-۲-۱-۲- قیود محدوده تولید انرژی الکتریکی و حرارتی

میزان تولید انرژی الکتریکی و انرژی حرارتی در هر زمان و برای هر نوع تجهیز باید در محدوده تعریف شده در قید (۳۱) باشد و از محدوده قابل قبول ماکزیمم ظرفیت و مینیمم ظرفیت تعریف شده تجاوز نکند:

$$\begin{aligned} N_k P_k^{\min} &\leq P_{k,t} \leq N_k P_k^{\max} \\ N_k Q_k^{\min} &\leq Q_{k,t} \leq N_k Q_k^{\max} \end{aligned} \quad (31)$$



### ۳-۲-۳- قیود ذخیره سازی انرژی الکتریکی و حرارتی

وضعیت حداقل و حداکثر ظرفیت سطح شارژ ذخیره‌سازهای حرارتی و الکتریکی مطابق با رابطه (۳۲) خواهد بود.

$$\begin{aligned} SOC_{ess}^{\min} &\leq SOC_{ess,t} \leq SOC_{ess}^{\max} \\ SOC_{tss}^{\min} &\leq SOC_{tss,t} \leq SOC_{tss}^{\max} \end{aligned} \quad (32)$$

ذخایر انرژی الکتریکی و حرارتی در پایان یک روز نمونه باید به گونه ای باشند که بتوانند انرژی مورد نیاز در یک روز را به طور مستقل تأمین کنند که در قید (۳۳) آماده است.

$$one\ day\ autonomy \leq SOC_{ess,end} \text{ and } SOC_{tss,end} \quad (33)$$

### ۳-۲-۴- قیود ضریب استفاده از منابع تجدیدپذیر

ضریب استفاده از منابع تجدیدپذیر، سهم انرژی الکتریکی تولید شده از منابع تجدیدپذیر را در سیستم هیبرید انرژی مشخص می‌کند. این قید در راستای کاهش آلودگی‌های زیست محیطی موجب افزایش میزان تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر خواهد شد. این قید به صورت نامساوی آورده شده در (۳۴) بیان می‌شود:

$$\sum_{t=1}^T P_{ren,t} \geq RE \sum_{t=1}^T P_{gen,t} \quad (34)$$

که در آن میزان انرژی الکتریکی حاصل از منابع تجدیدپذیر به صورت قید (۳۵) محاسبه می‌شود:

$$P_{ren,t} = \sum_{t=1}^T P_{wg,t} + \sum_{t=1}^T P_{pv,t} \quad (35)$$

### ۳-۲-۵- قیود قابلیت اطمینان برای انرژی الکتریکی و حرارتی

برای اطمینان از توانایی و عملکرد مناسب سیستم هیبرید انرژی طراحی شده در تأمین انرژی الکتریکی و حرارتی از ضریب قابلیت اطمینان LPSP استفاده شده است (۳۶). این ضریب یک پارامتر آماری با عنوان احتمال از دست دادن منابع تولید است که برای ساختار مورد بررسی به میزان  $LPSP \leq 0.05$  در نظر گرفته شده است. این بدان معنا هست که حداکثر ۵ درصد از تقاضای انرژی الکتریکی و یا حرارتی می‌تواند برآورده نشود.

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^T \text{Time}(P_{available}(t) < P_{load}(t))}{T} \quad (36)$$

$$LPSP = \frac{\sum_{t=0}^T \text{Time}(Q_{available}(t) < Q_{load}(t))}{T}$$

که در آن انرژی الکتریکی در دسترس و انرژی حرارتی در دسترس به صورت معادله (۳۷) می‌شود:

$$P_{available} = P_{gen} \pm P_{ess} - P_{sc} \quad (37)$$

$$Q_{available} = Q_{gen} \pm Q_{tss}$$

مصرف داخلی سیستم شامل توان مصرفی اجزاء جانبی سیستم نظیر سیستم‌های خنک کننده، واحد کنترلی و کمپرسور گاز می‌باشد. [۲۱]

### ۴- استراتژی کنترل و مدیریت انرژی

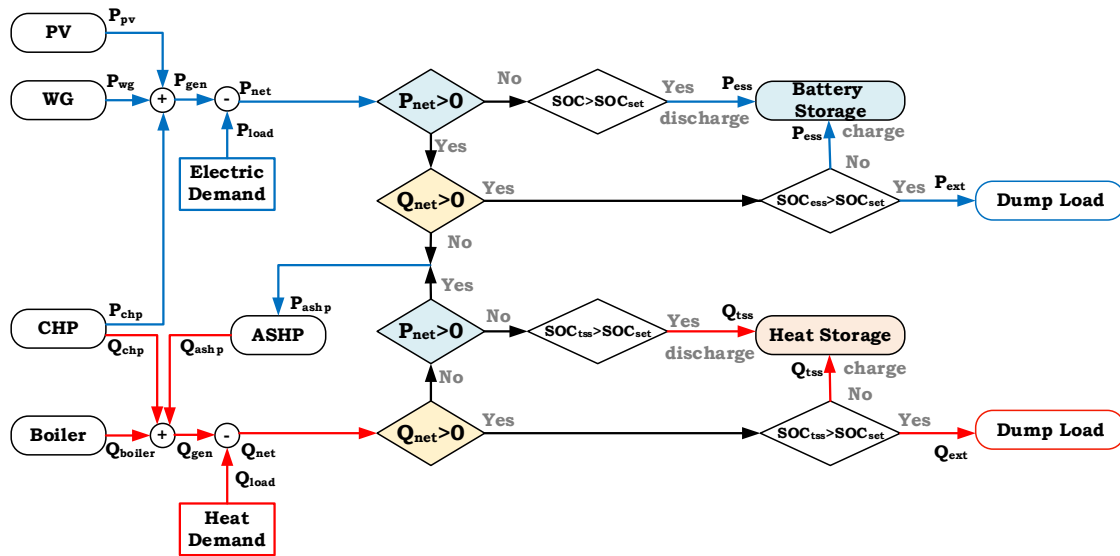
هدف از مدیریت انرژی برقراری نسبت مناسبی میان تولید و مصرف در سیستم هیبرید مورد نظر جهت تأمین بارهای محلی در منطقه ای دور از شبکه می‌باشد. در این راستا تعیین ابعاد سیستم جهت قابلیت اطمینان مناسب برق تولیدی و همچنین بهینه بودن از لحاظ اقتصادی ضروری می‌باشد. بدین منظور باید اختلاف توان تولیدی الکتریکی و حرارتی و تقاضای بار الکتریکی و حرارتی طبق معادله (۳۸) در بازه زمانی مورد مطالعه حداقل گردد [۲۸].

$$P_{net} = P_{gen} - P_{load} \quad (38)$$

$$Q_{net} = Q_{gen} - Q_{load}$$



از نقطه نظر طراحی، بهینه‌سازی ابعاد سیستم‌های هیبرید انرژی بسیار مهم می‌باشد و منجر به یک رابطه مناسب بین هزینه و اجرا خواهد شد. قبل از بهینه‌سازی ابعاد سیستم بایستی پروفیل بار، شدت تابش و میزان سرعت باد قابل دسترس را ارزیابی کرد، بنابراین این موارد در بخش‌های ذیل ارائه خواهند شد. روش‌های مختلفی جهت مدیریت و کنترل سیستم‌های هیبرید انرژی با منابع غیر پیوسته نظیر باد و خورشید وجود دارد که هر کدام مزیت و معایب خاص خود را دارد [۲۶-۲۱]. شکل (۳) فلوچارت سیستم کنترلی پیشنهادی مربوط به سیستم هیبرید مورد مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل (۳): فلوچارت استراتژی کنترلی سیستم هیبرید انرژی مورد مطالعه

با توجه به اینکه در سیستم هیبریدی مورد مطالعه از تکنولوژی CHP استفاده شده است، استراتژی کنترل یک نقش کلیدی جهت اطمینان از رضایت مندی هر دو تقاضای انرژی الکتریکی و حرارتی دارا می‌باشد بنابراین بایستی سیستم کنترلی هم برای تامین بار الکتریکی و هم جهت تامین بار حرارتی در نظر گرفته شود.

#### ۴-۱- حالت ۱: استراتژی سیستم کنترلی جهت تأمین بار الکتریکی

استراتژی کنترلی سیستم هیبرید انرژی در این حالت به این صورت است که اگر مجموع توان الکتریکی تولید شده توسط منابع برابر با تقاضای بار الکتریکی باشد ( $P_{net} = 0$ )، طبق معادله (۳۹)، کل توان الکتریکی تولیدی به بار تحویل داده می‌شود.

$$P_{gen} = P_{load} \quad (39)$$

اگر توان الکتریکی تولید شده توسط منابع انرژی الکتریکی بیشتر از تقاضای بار الکتریکی باشد ( $P_{net} > 0$ )، یکی از دو حالت زیر اتفاق خواهد افتاد:

الف) اگر توان حرارتی تولیدی توسط منابع انرژی حرارتی کافی باشد ( $Q_{net} > 0$ )، آنگاه مازاد انرژی الکتریکی در صورت نیاز در باتری ذخیره‌سازی خواهد شد و در غیر اینصورت به بار تخلیه یا بار اضافه داده تحویل داده خواهد شد. در این شرایط معادله توان به صورت معادله (۴۰) بیان می‌گردد:

$$P_{gen} = P_{load} + P_{ess,charge} \quad (40)$$

ب) اگر توان حرارتی تولیدی توسط منابع انرژی حرارتی کافی نباشد ( $Q_{net} < 0$ )، آنگاه مازاد انرژی الکتریکی به مبدل حرارتی تحویل داده خواهد شد تا کمبود انرژی حرارتی را جبران کند. در این شرایط معادله توان به صورت معادله (۴۱) بیان می‌گردد:

$$P_{gen} = P_{load} + P_{ashp} \quad (41)$$

هنگامی که توان الکتریکی تولیدی توانایی تأمین بار الکتریکی را نداشته باشد ( $P_{net} < 0$ )، از انرژی ذخیره شده در باتری برای تأمین کمبود توان استفاده خواهد شد. در این شرایط معادله توان به صورت معادله (۴۲) بیان می‌گردد:

$$P_{gen} + P_{ess, discharge} = P_{Load} \quad (42)$$

#### ۴-۲- حالت ۲: استراژی سیستم کنترلی جهت تأمین بار حرارتی

اگر مجموع توان حرارتی تولید شده توسط منابع برابر با تقاضای بار حرارتی باشد ( $Q_{net} = 0$ )، طبق معادله (۴۳) کل توان حرارتی تولیدی به بار تحویل داده می‌شود.

$$Q_{gen} = Q_{load} \quad (43)$$

اگر توان حرارتی تولید شده توسط منابع انرژی الکتریکی بیشتر از تقاضای بار الکتریکی باشد ( $Q_{net} > 0$ )، آنگاه مازاد انرژی حرارتی در صورت نیاز به ذخیره‌ساز حرارتی و در غیر اینصورت به بار تخلیه یا بار اضافه تحویل داده خواهد شد. در این شرایط معادله توان راک به صورت معادله (۴۴) بیان می‌گردد:

$$Q_{gen} = Q_{load} + Q_{tss, charge} \quad (44)$$

هنگامی که توان حرارتی تولیدی توانایی تأمین بار حرارتی را نداشته باشد ( $Q_{net} < 0$ )، یکی از دو حالت زیر اتفاق خواهد افتاد: الف) اگر توان الکتریکی تولیدی توسط منابع انرژی کافی باشد ( $P_{net} > 0$ )، آنگاه مازاد انرژی الکتریکی به مبدل حرارتی تحویل داده خواهد شد تا کمبود توان حرارتی را جبران نماید. در این شرایط معادله توان به صورت معادله (۴۵) بیان می‌گردد:

$$Q_{gen} + Q_{ashp} = Q_{load} \quad (45)$$

ب) اگر توان الکتریکی تولیدی توسط منابع انرژی کافی نباشد ( $P_{net} < 0$ )، آنگاه وضعیت ذخیره ساز حرارتی بررسی خواهد شد و در صورت امکان از ذخیره انرژی حرارتی برای جبران کمبود توان حرارتی استفاده خواهد شد. در این شرایط معادله توان به صورت معادله (۴۶) بیان می‌گردد:

$$Q_{gen} + Q_{tss, discharge} = Q_{load} \quad (46)$$

در هر دو استراژی تعریف شده در حالت اول و دوم، اولویت با تأمین لحظه‌ای تقاضای بار الکتریکی و حرارتی می‌باشد و بحث ذخیره‌سازی در اولویت بعدی قرار دارد. از طرفی اولویت تولید منابع حرارتی با میکروتوربین گازی است و در صورت نیاز از بویلر کمکی استفاده خواهد شد.

### ۵- مطالعه موردی

#### ۵-۱- بازه زمانی

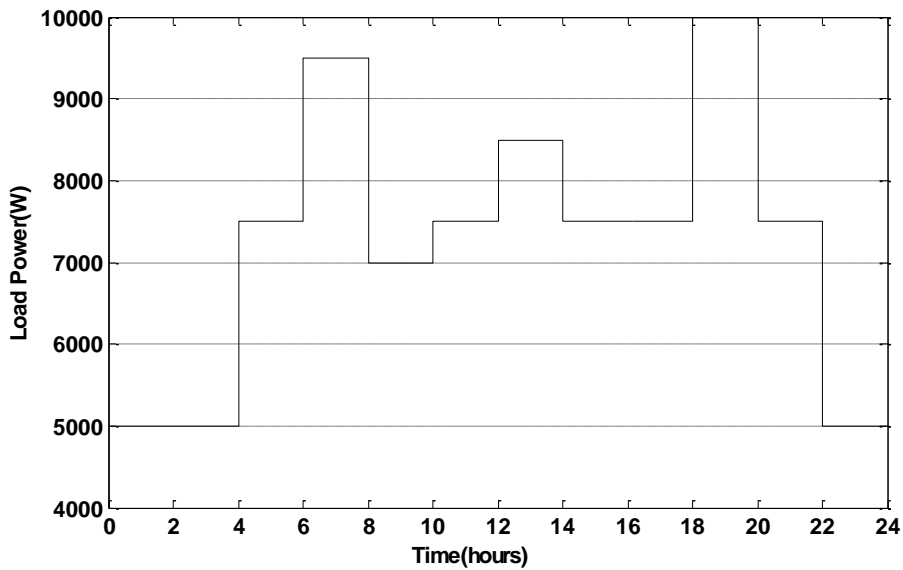
هزینه کل احداث و بهره برداری از سیستم هیبرید انرژی در طی یکسال نمونه کمینه‌سازی خواهد شد. به منظور ساده‌سازی و کاهش حجم اطلاعات و محاسبات، در بازه زمانی مورد نظر چهار فصل در نظر گرفته شده و در هر فصل یک روز نمونه با پروفایل‌های یک ساعته مدل خواهد شد. بنابراین یک سال نمونه به  $۳۶۵ \times ۲۴ = ۸۷۶۰$  پله زمانی تقسیم‌بندی خواهد شد.

#### ۵-۲- منحنی پروفیل بار الکتریکی و حرارتی

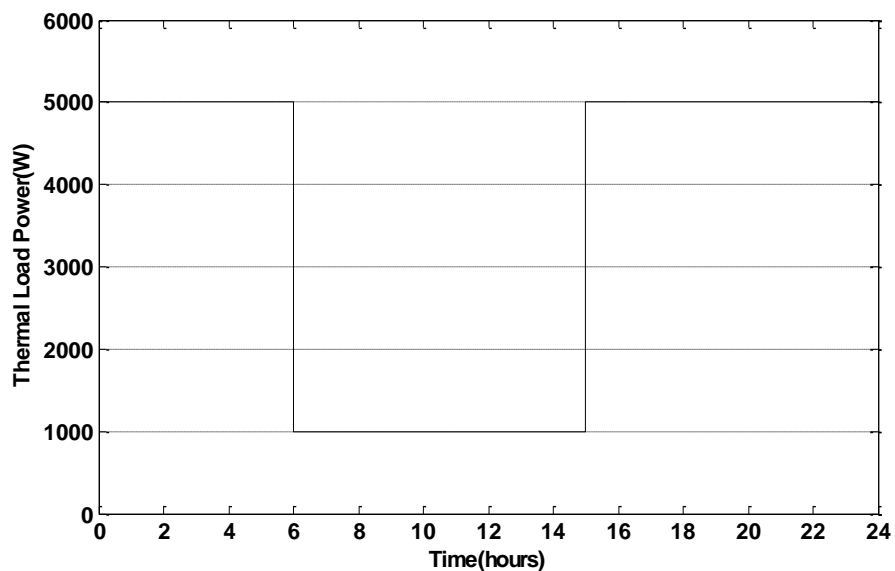
پروفیل بار الکتریکی و حرارتی یک شبانه‌روز نمونه برای مصرف یک مجموعه از واحدهای مسکونی با در نظر گرفتن گلخانه در منطقه‌ای دور از شبکه استفاده شده در شبیه‌سازی، به ترتیب در شکل (۴) و شکل (۵) نشان داده شده است. متوسط پروفیل بار الکتریکی حدود



۷/۳ کیلو وات می باشد که منجر به مصرف سالیانه حدود ۶۳/۸۸ مگاوات می شود. پیک بار مصرفی ۱۰ کیلووات و حداقل مصرف ۵ کیلووات می باشد. متوسط پروفیل بار حرارتی نیز ۳/۵ کیلو وات می باشد.



شکل (۴): پروفیل بار الکتریکی در یک شبانه روز



شکل (۵): پروفیل بار حرارتی در یک شبانه روز

### ۳-۵- منابع انرژی اولیه

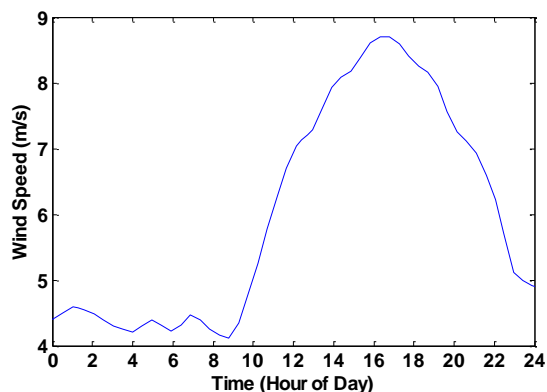
#### ۱-۳-۵- اطلاعات تابش خورشید

توان حاصل از انرژی خورشیدی بطور قابل ملاحظه ای وابسته به شرایط محیطی می باشد و بنابراین غیر قابل پیش بینی است. منحنی تابش خورشید در یک شبانه روز در ماه خرداد برای شرایط آب و هوایی شهر شیراز در شکل (۶) آورده شده است [۳۱].

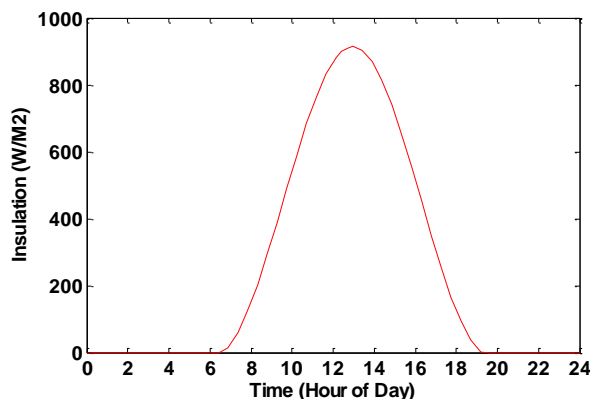


### ۵-۳-۲- اطلاعات سرعت وزش باد

منحنی سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر در یک شبانه روز در ماه خرداد در شکل (۷) آورده شده است. میانگین سالیانه سرعت باد در این ارتفاع ۵/۰۹ m/s است [۳۱].



شکل (۷): سرعت باد در یک شبانه روز

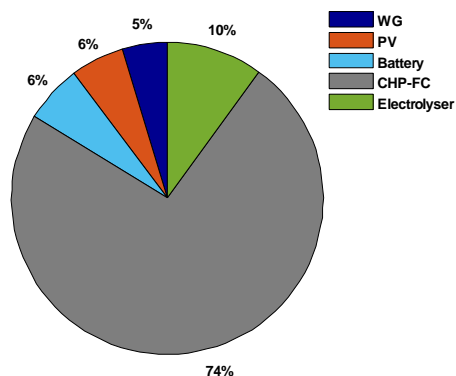


شکل (۶): شدت تابش خورشید در یک شبانه روز

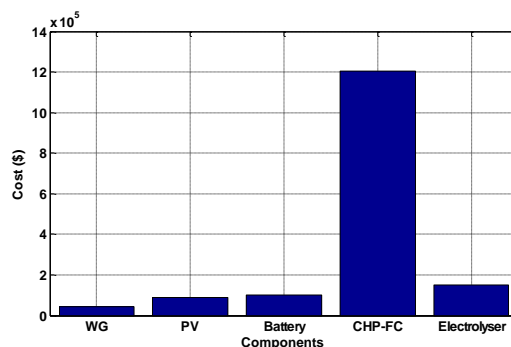
## ۶- نتایج شبیه سازی

### ۱-۶- ابعاد بهینه سیستم

با توجه به مشخصه غیر پیوسته تابش خورشید و وابستگی زیاد آنها به شرایط جوی، مهمترین بحث، طراحی سیستم با قابلیت اطمینان مناسب در تأمین بار می‌باشد [۲۴،۳۲]. در این راستا توجه به هزینه سیستم اجتناب‌ناپذیر است، لذا هدف از طراحی بهینه سیستم هیبرید، تأمین بار با قابلیت اطمینان بالا و هزینه مناسب می‌باشد. در سیستم هیبرید مورد مطالعه، پنل‌های PV، تعداد توربین‌های بادی و ظرفیت باتری باید به صورت بهینه تعیین گردد. بدین منظور از برنامه‌ای در MATLAB استفاده شده است که با توجه به عملکرد سیستم، هزینه تمام اجزای سیستم را در حالت‌های قابل قبول محاسبه نماید. بنابراین سیستم به گونه‌ای طراحی می‌گردد که علاوه بر هزینه مقرون به صرفه، انرژی باتری را برای روز بعد نگه داشته و هیدروژن مورد نیاز را از طریق الکترولیزور تولید نماید. هزینه هر یک از اجزای سیستم هیبرید انرژی مورد مطالعه در شکل (۸) و سهم هزینه هر یک از اجزای سیستم هیبرید بهینه در هزینه کل در شکل (۹) نشان داده شده است.



شکل (۹): سهم هزینه اجزاء سیستم از هزینه کل



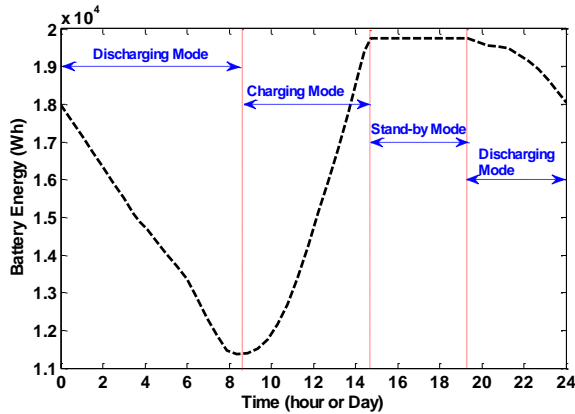
شکل (۸): هزینه اجزاء سیستم هیبرید انرژی مورد مطالعه



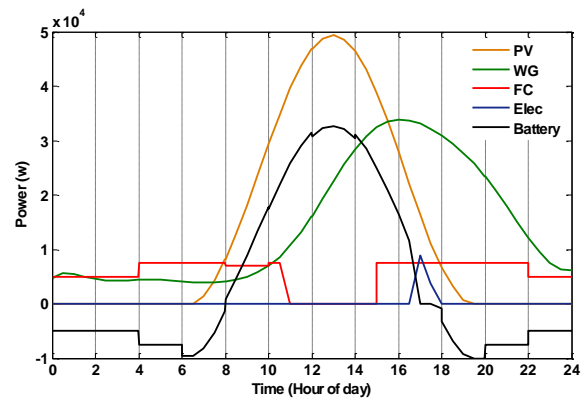


## ۶-۲- عملکرد بهینه سیستم در تأمین بار الکتریکی و حرارتی

نتایج شبیه سازی با MATLAB/Simulink در یک روز کاری سیستم، در این قسمت تشریح گردیده است. در شکل (۱۰) نتایج عملکرد سیستم در طول ۲۴ ساعت نشان داده شده است. توان‌های خروجی مربوط به با مقادیر پس از بهینه‌سازی هستند که نتایج آن در بخش آنالیز اقتصادی آورده شده است. در ساعات ابتدایی روز که تابش صفر بوده، بار از طریق باتری تأمین می‌شود (لازم به ذکر است باتری حدود ۵۰٪ دارد). پس از حدود ۴ ساعت و با توجه به کاهش ذخیره باتری و نیز افزایش تقاضای بار مصرفی، FC روشن شده و در تأمین بار مشارکت می‌کند. حضور FC در مدار تا وقتی است که باتری مجدداً شارژ شود. تا وقتی که شدت تابش به حد مطلوب نرسیده، عملکرد سیستم به همین منوال است. با افزایش شدت تابش خورشید، باتری در حالت شارژ قرار گرفته و در تأمین بار دخالت ندارد. بعد از اینکه باتری به حد مطلوب شارژ شد، FC از مدار خارج می‌شود و این در هنگامی است که PV قادر به تأمین بار است. پس از اینکه شارژ باتری به مقدار حداکثر خود رسیده، باتری از حالت شارژ خارج شده و الکترولیزور تا هنگام پر شدن تانک هیدروژن روشن می‌شود. پس از اینکه تانک هیدروژن پر شد، الکترولیزور خاموش شده و توان اضافی به Dump load داده می‌شود. در اواخر روز به دلیل کاهش تولید توربین بادی و PV، باتری مجدداً روشن شده و بخشی از بار را تأمین می‌کند. مقدار انرژی باتری مطابق با شکل (۱۱)، در انتهای روز نباید از مقدار مشخصی پایین‌تر رود.

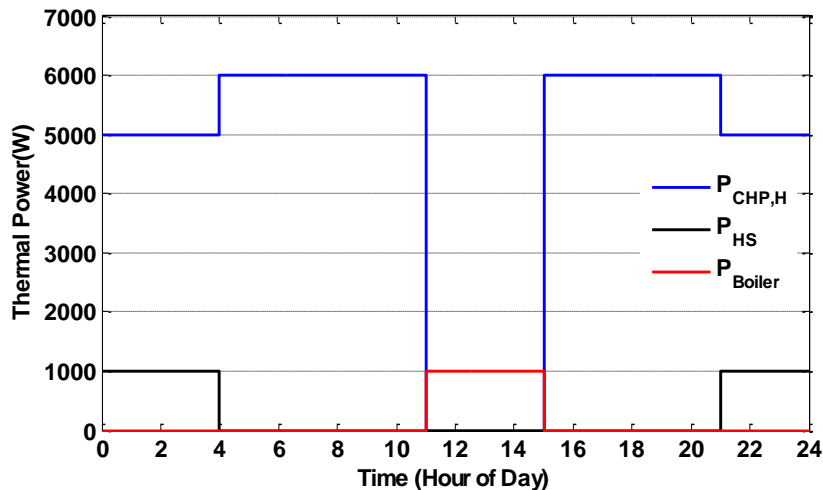


شکل (۱۱): تغییرات انرژی باتری در یک شبانه روز



شکل (۱۰): عملکرد سیستم در یک شبانه روز جهت تأمین بار الکتریکی

شکل (۱۲) توان حرارتی تولید شده توسط CHP، ذخیره‌ساز گرمایی و بویلر کمکی را در طول ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در ساعات اولیه و انتهایی روز با توجه به اینکه CHP پیل سوختی جهت تأمین بار الکتریکی فعال می‌باشد، تقاضای بار حرارتی نیز توسط CHP تأمین می‌شود و مازاد انرژی تولید شده در ذخیره‌ساز انرژی گرمایی ذخیره می‌شود. در محدوده زمانی ۱۱ الی ۱۵ با توجه به اینکه CHP غیر فعال می‌باشد و تقاضای بار حرارتی نیز قابل توجه نمی‌باشد (۱ kW) بدلیل اقتصادی از بویلر کمکی جهت تأمین بار حرارتی استفاده می‌شود.



شکل (۱۲): عملکرد سیستم در یک شبانه روز جهت تأمین بار حرارتی



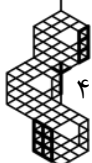
## ۷- نتیجه گیری

هدف اصلی از طراحی سیستم هیبرید فتوولتائیک، تولید انرژی با قابلیت اطمینان مناسب در شرایط مختلف جوی با کمترین هزینه است. در این مقاله بهینه سازی ابعاد سیستم بر اساس قابلیت اطمینان و آنالیز اقتصادی برای سیستم هیبرید مذکور با ذخیره ساز باتری و الکترولیزور پیل سوختی در مدت ۲۰ سال عملکرد سیستم به صورت دو سطحی انجام گرفت و یک استراتژی کنترل و مدیریت انرژی جامع برای سیستم هیبرید مورد مطالعه ارائه گردید. عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از آنالیز اقتصادی به وضوح مزایای سیستم هیبرید طراحی شده را در مقایسه با حالت های ذکر شده چه از لحاظ اقتصادی و چه از منظر قابلیت اطمینان نشان می دهد به صورت خلاصه نتایج مهم این مقاله عبارتند از:

- کاهش هزینه اجرا و پیاده سازی طرح پیشنهادی با مشارکت منابع تجدیدپذیر
- افزایش سطح نفوذ منابعی چون CHP-FC ها و الکترولیزرها جهت تغذیه بارهای حرارتی
- کاهش زمان استفاده از منابع تولید حرارتی که هزینه تولید زیادی به سیستم تحمیل می کنند.

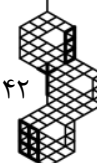
## مراجع

- [1] A. L. Bukar and C. W. Tan, "A review on stand-alone photovoltaic-wind energy system with fuel cell: System optimization and energy management strategy," 2019. doi: 10.1016/j.jclepro.2019.02.228.
- [2] Y. Huang *et al.*, "A review of power management strategies and component sizing methods for hybrid vehicles," 2018. doi: 10.1016/j.rser.2018.07.020.
- [3] C. Gamarra and J. M. Guerrero, "Computational optimization techniques applied to microgrids planning: A review," 2015. doi: 10.1016/j.rser.2015.04.025.
- [4] M. F. Zia, E. Elbouchikhi, and M. Benbouzid, "Microgrids energy management systems: A critical review on methods, solutions, and prospects," 2018. doi: 10.1016/j.apenergy.2018.04.103.
- [5] R. Xiong, H. Chen, C. Wang, and F. Sun, "Towards a smarter hybrid energy storage system based on battery and ultracapacitor - A critical review on topology and energy management," *J Clean Prod*, vol. 202, 2018, doi: 10.1016/j.jclepro.2018.08.134.
- [6] Z. Luo, Z. Wu, Z. Li, H. Y. Cai, B. J. Li, and W. Gu, "A two-stage optimization and control for CCHP microgrid energy management," *Appl Therm Eng*, vol. 125, 2017, doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.05.188.
- [7] A. Omu, R. Choudhary, and A. Boies, "Distributed energy resource system optimisation using mixed integer linear programming," *Energy Policy*, vol. 61, 2013, doi: 10.1016/j.enpol.2013.05.009.
- [8] D. Yang, C. Jiang, G. Cai, D. Yang, and X. Liu, "Interval method based optimal planning of multi-energy microgrid with uncertain renewable generation and demand," *Appl Energy*, vol. 277, 2020, doi: 10.1016/j.apenergy.2020.115491.
- [9] Y. Xiang, J. Liu, and Y. Liu, "Robust Energy Management of Microgrid with Uncertain Renewable Generation and Load," *IEEE Trans Smart Grid*, vol. 7, no. 2, 2016, doi: 10.1109/TSG.2014.2385801.
- [10] L. Bai, F. Li, H. Cui, T. Jiang, H. Sun, and J. Zhu, "Interval optimization based operating strategy for gas-electricity integrated energy systems considering demand response and wind uncertainty," *Appl Energy*, vol. 167, 2016, doi: 10.1016/j.apenergy.2015.10.119.
- [11] P. H. Jiao, J. J. Chen, K. Peng, Y. L. Zhao, and K. F. Xin, "Multi-objective mean-semi-entropy model for optimal standalone micro-grid planning with uncertain renewable energy resources," *Energy*, vol. 191, 2020, doi: 10.1016/j.energy.2019.116497.
- [12] F. Nazari-Heris, B. Mohammadi-ivatloo, and D. Nazarpour, "Network constrained economic dispatch of renewable energy and CHP based microgrids," *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 110, 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.02.037.
- [13] Z. Li and Y. Xu, "Optimal coordinated energy dispatch of a multi-energy microgrid in grid-connected and islanded modes," *Appl Energy*, vol. 210, 2018, doi: 10.1016/j.apenergy.2017.08.197.
- [14] E. D. Mehleri, H. Sarimveis, N. C. Markatos, and L. G. Papageorgiou, "Optimal design and operation of distributed energy systems: Application to Greek residential sector," *Renew Energy*, vol. 51, 2013, doi: 10.1016/j.renene.2012.09.009.





- [15] D. Zhang, S. Evangelisti, P. Lettieri, and L. G. Papageorgiou, "Optimal design of CHP-based microgrids: Multiobjective optimisation and life cycle assessment," *Energy*, vol. 85, 2015, doi: 10.1016/j.energy.2015.03.036.
- [16] B. Kroposki, P. K. Sen, and K. Malmedal, "Optimum sizing and placement of distributed and renewable energy sources in electric power distribution systems," *IEEE Trans Ind Appl*, vol. 49, no. 6, 2013, doi: 10.1109/TIA.2013.2262661.
- [17] M. S. Alam and D. W. Gao, "Modeling and analysis of a wind/PV/fuel cell hybrid power system in HOMER," in *ICIEA 2007: 2007 Second IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2007. doi: 10.1109/ICIEA.2007.4318677.
- [18] L. Wang and C. Singh, "PSO-based hybrid generating system design incorporating reliability evaluation and generation/load forecasting," in *2007 IEEE Lausanne POWERTECH, Proceedings*, 2007. doi: 10.1109/PCT.2007.4538519.
- [19] A. Arezooye Araghi, A. Ahmarinejad, M. Alizadeh, and M. Babaei, "Optimizing Energy and Ancillary Services Markets in Transmission and Distribution Networks Through a Two-Stage Optimal Framework Considering Flexible Loads, Electric Vehicles, and Storage Systems," *Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System*, vol. 2, no. 4, pp. 38–64, 2024, doi: 10.30486/teegees.2023.1986699.1074.
- [20] M. Abedini, R. Eskandari, J. Ebrahimi, M. H. Zeinali, and A. Alahyari, "Optimal Placement of Power Switches on Malayer Practical Feeder to Improve System Reliability Using Hybrid Particle Swarm Optimization with Sinusoidal and Cosine Acceleration Coefficients," *Computational Intelligence in Electrical Engineering*, vol. 11, no. 2, pp. 73–86, 2020.
- [21] J. Ebrahimi and M. Abasi, "Design of a Power Management Strategy in Smart Distribution Networks with Wind Turbines and EV Charging Stations to Reduce Loss, Improve Voltage Profile, and Increase Hosting Capacity of the Network," *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 1, pp. 1–15, Mar. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.1.1.
- [22] S. Darvish Kermani, M. Fayazi, J. Barati, and M. Joorabian, "Percentage of Islanding and Peninsulating Detection in Large Microgrids with Renewable Energy Resources with Multiple Connection Points to Different Grids," *Journal of Green Energy Research and Innovation*, vol. 1, no. 2, pp. 1–14, Jun. 2024, doi: 10.61186/jgeri.1.2.1.
- [23] H. Makvandi, M. Abasi, M. Joorabian, S. Soltani, J. Ebrahimi, and Z. Sabzian Molaei, "Design of New Intelligent Islanding Detection Scheme in Multi-Machine Power Systems to Prevent Wide-Area Blackouts," in *2022 12th Smart Grid Conference, SGC 2022*, 2022. doi: 10.1109/SGC58052.2022.9998906.
- [24] J. Ebrahimi, M. Abedini, and M. M. Rezaei, "Optimal scheduling of distributed generations in microgrids for reducing system peak load based on load shifting," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100368.
- [25] J. Lagorse, M. G. Simões, A. Miraoui, and P. Costerg, "Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 33, no. 12, 2008, doi: 10.1016/j.ijhydene.2008.03.054.
- [26] J. Ebrahimi, M. Abedini, M. M. Rezaei, and M. Nasri, "Optimum design of a multi-form energy in the presence of electric vehicle charging station and renewable resources considering uncertainty," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. 23, 2020, doi: 10.1016/j.segan.2020.100375.
- [27] D. B. Nelson, M. H. Nehrir, and C. Wang, "Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems," *Renew Energy*, vol. 31, no. 10, 2006, doi: 10.1016/j.renene.2005.08.031.
- [28] C. Wang and M. H. Nehrir, "Power management of a stand-alone wind/photovoltaic/fuel cell energy system," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 23, no. 3, 2008, doi: 10.1109/TEC.2007.914200.
- [29] W. D. Kellogg, M. H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation unit sizing and cost analysis for stand-alone wind, photovoltaic, and hybrid wind/PV systems," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 13, no. 1, 1998, doi: 10.1109/60.658206.
- [30] S. Bensmail, D. Rekioua, and H. Azzi, "Study of hybrid photovoltaic/fuel cell system for stand-alone applications," *Int J Hydrogen Energy*, vol. 40, no. 39, 2015, doi: 10.1016/j.ijhydene.2015.04.013.
- [31] Nasa, "Surface meteorology and Solar Energy," *Solar Energy*, 2011.





- [32] F. Giraud and Z. M. Salameh, "Steady-state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind - Photovoltaic power system with battery storage," *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 16, no. 1, 2001, doi: 10.1109/60.911395.

## زیر نویس ها

- 
- <sup>1</sup> Combined Heat and Power
  - <sup>2</sup> Thermal load
  - <sup>3</sup> PV
  - <sup>4</sup> Wind Turbine
  - <sup>5</sup> Storage capacity
  - <sup>6</sup> Particle Swarm Optimization
  - <sup>7</sup> Multi objective
  - <sup>8</sup> Mixed-Integer Linear Programming
  - <sup>9</sup> Fuel cell
  - <sup>10</sup> Distributed Energy Resource

