



# Economic Design of a Hybrid Wind-solar Power Plant based on the Energy Storage System with Consideration of the Equivalent Loss Factor

Mehdi Shafiee<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Electrical Engineering, Technical and Vocational University (TVU), Tehran, Iran.

## ARTICLE INFO

### Article Type:

Original Research

**Received:** 05.27.2023

**Revised:** 07.15.2023

**Accepted:** 08.30.2023

### Keyword:

Wind Turbine

Solar Array

Fuel Cell

Equivalent Loss Factor

### \*Corresponding Author:

Mehdi Shafiee

**Email:** [m-shafiee@tvu.ac.ir](mailto:m-shafiee@tvu.ac.ir)

## ABSTRACT

A hybrid plan is one of the solutions to increase the economic efficiency of renewable power plants. Photovoltaic and wind energy are the two major sources of renewable energy that will account for a large part of energy production in the future. The energy supplied from these sources is unpredictable, and as a result, to increase the reliability and availability of the load, the capacity of these power plants and their storage system should be considered much higher than demand. In this article, a hybrid system including wind turbines, solar arrays, and fuel cells for two scenarios, summer and winter load patterns, were designed. This proposed system minimizes the 20-year costs including initial investment, operation, and maintenance, as well as the cost of load losses. The equivalent loss factor of the system should be provided along with other constraints. Therefore, the solar radiation and wind speed data related to a region of Iran (Kerman Province) were considered in addition to the load pattern. The possibility of an emergency exit of three main components of the system, wind turbines, solar arrays, and AC/DC converter, was also considered, and the Crow search algorithm and PSO algorithm were used for optimization and validation. The results showed that the optimal sizing of energy production systems based on renewable resources in addition to the improvement of production technology are the main solutions for reducing the costs of these systems.



## EXTENDED ABSTRACT

### Introduction

In recent years, the use of renewable energies has been facing increasing growth and different countries have attempted to benefit from these resources as much as possible, considering their industrial and economic capabilities and geographical potentials. Sun and wind are the two major sources of renewable energy that will account for a large part of energy production in the future. The energy supplied from these sources is unpredictable, and as a result, to increase the reliability and availability of the load, the capacity of these power plants and their storage system should be considered much higher than the amount of load demand. The goal of this research was the optimal design of a hydrogen-based hybrid WG/PV system. Optimization variables included the number of wind turbine generators, the number and installation angle of photovoltaic arrays, and the capacities of electrolyzer, and fuel cell. System costs consist of the annualized costs of investment, replacement, operation, and maintenance of components, as well as costs of load interruptions during 20 years of operation. The problem was subject to the maximum allowable equivalent loss factor (ELF) reliability index. System simulation was also subject to some other constraints such as the components' maximum and minimum power and energy.

### Methodology

As can be observed in Figure 1, the system consisted of 6 major components as well as a DC and an AC Busbars. These components included wind turbine generators, PV arrays, electrolyzer, hydrogen storage tank, FC, and DC/AC converter (inverter).

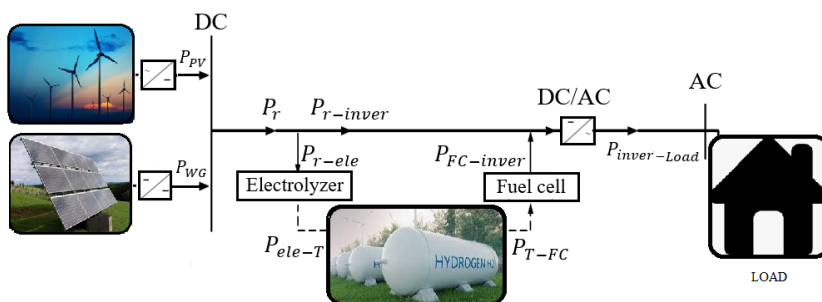


Figure 1. Block diagram of a hybrid wind-photovoltaic generation unit with ESS.

The system was simulated and reliability/cost assessment studies were carried out. Then, using economic factors, results were expanded to the 20 years of the system's lifetime. In this research, the method of using the hybrid system was determined according to its working conditions. Basically, in each time step, one of the following conditions was established:

- The total production power of renewable sources = the consumption power of the load: in this case, all the production power by renewable sources was injected into the load.

- The total production power of renewable sources  $\leq$  load consumption power: under these conditions, the fraction of load demand was provided by the fuel cell.
- The total production power of renewable sources  $\geq$  load consumption power: in this situation, the excess production power by wind and solar units was directed toward the electrolyzer to be converted into hydrogen.

## Results and discussion

To simulate the studied system, the annual wind and radiation data related to one of the regions of Iran and the load pattern related to the IEEE reliability test system with an annual peak of 50 kW were used. This system was simulated for one year, with a time step of one hour, and its economic calculations were conducted by considering two different scenarios (winter and summer peak load).

The results of scenarios 1 and 2 are shown in Tables 1 to 4.

**Tables 1. Optimal combination in Scenario 1.**

Algorithm	$\theta_{PV}$	$P_{Fuel\ Cell}$	$P_{Electrolyzer}$	$N_{PhotoVoltaic}$	$N_{Wind\ Generator}$
CSA	33.162	45.21	101.44	211	10
PSO	33.162	45.21	101.44	211	10

**Table 2. Optimal costs and reliability index in Scenario 1.**

Algorithm	ELF	Cost of Loss of Load (M\$)	Annual Cost (M\$)
CSA	0.0091	0.1401	2.441
PSO	0.0091	0.1401	2.441

**Tables 3. Optimal combination in Scenario 2.**

Algorithm	$\theta_{PV}$	$P_{Fuel\ Cell}$	$P_{Electrolyzer}$	$N_{PhotoVoltaic}$	$N_{Wind\ Generator}$
CSA	30.217	48.106	121.214	242	8
PSO	30.01	56.854	125.658	239	8

**Table 4. Optimal costs and reliability index in Scenario 2.**

Algorithm	ELF	Cost of Loss of Load (M\$)	Annual Cost (M\$)
CSA	0.0033	0.0547	2.687
PSO	0.003	0.0555	2.701

By comparing the results obtained in the two scenarios, the following conclusions were made:

- To supply the system load in the summer scenario, it is necessary to increase the number of solar arrays.
- The capacity of the electrolyzer required in the summer scenario was approximately 20% more than in the winter scenario. One of the reasons for this was that by shifting the peak load from winter to summer, the night peak load of the system also shifted to summer.
- The comparison of the tables related to the two scenarios shows that the installation angle of the arrays in the summer scenario was approximately 3.4 degrees less than the installation angle in the winter scenario. This is justifiable considering the peak summer load time.

- The CSA algorithm provided a better answer for the summer scenario compared to the PSO algorithm. This shows the optimal performance of this algorithm in solving optimization problems.

Convergence curves of the CAS algorithm, for 4 independent runs, are depicted in Figure 2. It can be observed that the algorithm converged to the optimal fitness value after, more or less, 140 iterations. Thus, 180 iterations can be considered a fair termination criterion. Moreover, it was observed that the algorithm, for all the runs, almost converged to the same optimal value (global optimum). It is noteworthy that the same fitness value does not necessarily mean the same optimal combination. Some far points in the solution space may have close fitness values in the objective domain.

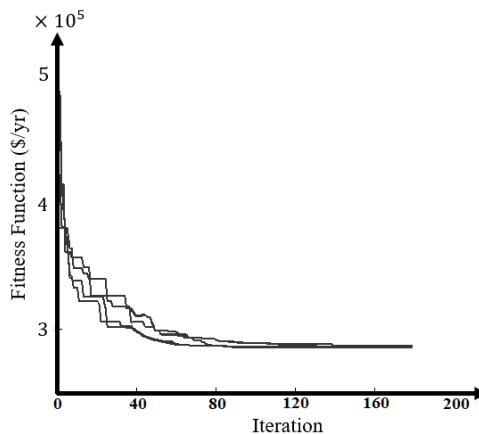


Fig. 2. Convergence of the optimization algorithm.

## Conclusion

In the present research, a hybrid WG-PV generating system was designed for a 20-year timeline. The optimal combination of components was achieved by a novel variation of the Crow Search Algorithm, which acceptably converges to the global, or near to the global, optimum combination. The optimization problem was subject to the reliability constraint. Results indicated that the costs of the system directly depend on its components' reliabilities. In the current study, the outage probabilities of three major components of the hybrid system, i.e., wind turbine generator, photovoltaic array, and DC/AC converter were taken into consideration. Versatile software, developed in MATLAB programming environment, carried out all these huge computations, including yearly simulation of the system with 1-h time steps, accurate evaluation of reliability index, and optimization algorithm. The software is capable of integrating any component model and, therefore, quite flexible to be implemented in any application. It only requires input of the wind speed, solar radiation, and load demand data, as well as specifications of the system components, and then running the software.



مجله علمی حرفه‌ای  
دانشگاه صنعتی امیرکبیر

کارافان

فصلنامه علمی دانشگاه فنی و حرفه‌ای

پاییز ۱۴۰۲، دوره ۲۰، شماره ۳، ۳۱۰-۲۸۷

آدرس نشریه: <https://karafan.tvu.ac.ir/>

doi: 10.48301/KSSA.2023.398615.2564



## طراحی اقتصادی نیروگاه هیبرید بادی - خورشیدی مبتنی بر سیستم ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن ضریب قطع معادل

مهدی شفییعی\*<sup>1</sup>

۱- گروه مهندسی برق، دانشگاه فنی و حرفه‌ای، تهران، ایران.

### چکیده

### اطلاعات مقاله

یکی از راهکارها جهت افزایش بازدهی اقتصادی نیروگاه‌های تجدیدپذیر استفاده از طرح‌های هیبرید می‌باشد. خورشید و باد دو منبع عمده انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشند که در آینده بخش بزرگی از تولید انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. انرژی تأمین شده از این منابع غیر قابل پیش‌بینی بوده و در نتیجه برای بالا بردن قابلیت اطمینان و دسترسی بار، باید ظرفیت این نیروگاه‌ها و سیستم ذخیره‌ساز آنها بسیار بیشتر از مقدار تقاضای بار در نظر گرفته شود. در این مقاله یک سیستم هیبرید شامل توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی و پیل سوختی برای دو سناریو (الگو بار تابستانی و زمستانی) به گونه‌ای طراحی شده است که ضمن کمینه‌کردن هزینه‌های ۲۰ ساله سیستم (هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، بهره‌برداری و نگهداری و همچنین هزینه دست‌رفتن بار)، قید ضریب قطع معادل سیستم در کنار سایر قیود سیستم تأمین شود. از این رو داده‌های تابش خورشید و سرعت و وزش باد مربوط به منطقه‌ای از کشور ایران (استان کرمان) در کنار الگوی بار در نظر گرفته شده و همچنین احتمال خروج اضطراری سه جزء عمده سیستم یعنی توربین‌های بادی، آرایه‌های خورشیدی و مبدل AC/DC در نظر گرفته شده است. برای بهینه‌سازی و اعتبار سنجی از الگوریتم جستجوی کلاغ و الگوریتم PSO استفاده شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهند اندازه‌یابی بهینه سیستم‌های تولید انرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، در کنار بهبود فناوری تولید، اصلی‌ترین راهکار کاهش هزینه‌های این نوع سیستم‌ها می‌باشند.

نوع مقاله: مقاله پژوهشی

دریافت مقاله: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۴/۲۴

پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

### کلید واژگان:

توربین بادی  
آرایه خورشیدی  
پیل سوختی  
ضریب قطع معادل

\*نویسنده مسئول: مهدی شفییعی

پست الکترونیکی:

[m-shafiee@tvu.ac.ir](mailto:m-shafiee@tvu.ac.ir)



©2023 the authors. Published by Technical and Vocational University, Tehran, Iran. This article is an open-access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 4.0 International (CC BY-NC License) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

شاپای الکترونیکی: ۲۵۳۸-۴۴۳۰

شاپای چاپی: ۲۳۸۲-۹۷۹۶

## مقدمه

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر با رشد روز افزونی روبه‌رو بوده و کشورهای مختلف با توجه به توانمندی‌های صنعتی و اقتصادی و پتانسیل‌های جغرافیایی خود، سعی در بهره‌مندی هرچه بیشتر از این منابع را داشته‌اند. دلیل اصلی توجه زیاد کشورهای صنعتی به انرژی‌های تجدیدپذیر، بالا بردن امنیت انرژی از طریق کاهش وابستگی به کشورهای نفت خیز و تحولات و تنش‌هایی است که معمولاً در کشورهای دارای منابع نفتی رخ می‌دهد. به گونه‌ای که تحقیقات و سرمایه‌گذاری‌ها در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر به طور خاص و مباحث مدیریت انرژی به طور عام پس از شوک‌های نفتی اول و دوم در سال‌های ۱۹۷۳ و ۱۹۷۸، با جدیت بیشتری دنبال گردیده است [۱]. همچنین رشد روزافزون قیمت سوخت‌های فسیلی و حادث شدن مسایل زیست محیطی به دلیل افزایش غیر طبیعی انواع مختلف ترکیبات زیان آور از جمله گازهای گلخانه‌ای نیز از دلایل بالا رفتن انگیزه کشورهای در استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد. تحقیقات فراوان در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر در این سال‌ها موجب کاهش شدید قیمت الکتروسیتته تولیدی از این طریق گردیده و امکان رقابت با منابع انرژی تجدیدناپذیر را تا حدودی فراهم نموده است [۲].

خورشید و باد دو منبع عمده انرژی‌های تجدیدپذیر هستند که در آینده بخش بزرگی از تولید انرژی را به خود اختصاص می‌دهند. انرژی تأمین شده از این منابع غیر قابل پیش‌بینی بوده و در نتیجه باعث آن می‌شود که برای بالا بردن قابلیت اطمینان و دسترسی بار، ظرفیت این نیروگاه‌ها و سیستم ذخیره ساز آنها بسیار بیشتر از مقدار تقاضای بار در نظر گرفته شود. یکی از راهکارها جهت افزایش بازدهی اقتصادی نیروگاه‌های تجدیدپذیر استفاده از آنها به صورت سیستم‌های هیبرید می‌باشد [۲؛ ۳].

انجام محاسبات قابلیت اطمینان یکی از مسائل مهمی است که باید در کنار ارزیابی‌های اقتصادی و زیست محیطی ناشی از به‌کارگیری منابع تجدید شونده انرژی مدنظر قرار گیرد. ارزیابی دقیق سود اقتصادی استفاده از این واحدها نیازمند بررسی سطح قابلیت اطمینان سیستم‌ها می‌باشد. بدیهی است که محدودیت انرژی در دسترس از منابع انرژی نو و همچنین رفتار ناپیوسته آنها باعث کاهش سطح قابلیت اطمینان سیستم می‌شود [۴].

روش‌های مختلفی برای بررسی قابلیت اطمینان در کنار بهینه‌سازی هزینه‌های نیروگاه‌های هیبرید ارائه شده است. گستره وسیعی از روش‌های بهینه‌سازی، از ترکیبات کلاسیکی چون برنامه‌ریزی خطی و غیر خطی تحلیلی و عددی عمدتاً مبتنی بر محاسبه مشتقات جزئی گرفته تا به‌کارگیری الگوریتم‌های مدرن هوشمند همچون الگوریتم ژنتیک و اجتماع ذرات، در تحقیقات مختلف مورد استفاده قرار گرفته‌اند [۵؛ ۶]. در ادامه با توجه به اهمیت موضوع به گوشه‌ای از مطالعات انجام شده در زمینه سیستم‌های قدرت هیبرید پرداخته می‌شود.

در مرجع [۷] یک سیستم متشکل از توربین بادی و پیل سوختی جهت بهبود سودمندی توان باد بررسی شده است. قسمتی از انرژی تولیدی به وسیله توربین بادی به فرم هیدروژن ذخیره شده و به وسیله پیل سوختی به مصرف‌کننده تحویل داده می‌شود. ظرفیت تجهیزات (الکترولایزر، پیل سوختی، تانک ذخیره هیدروژن) براساس نسبت انرژی تحویل داده شده، به طور مستقیم، از توربین بادی به انرژی تحویلی از پیل سوختی تعیین می‌گردد. در این تحقیق نتایج نشان می‌دهند که متوسط توان تحویلی به وسیله پیل سوختی به بیش از یک سوم توان نامی توربین بادی می‌رسد و بازده کلی آن بیشتر از ۶۰ درصد می‌باشد.

نویسندگان در مرجع [۸] مفهوم مزرعه بادی مجهز شده به ذخیره‌ساز ابرسانا (SMES)<sup>۱</sup> را مورد بررسی قرار داده‌اند. در این پژوهش انرژی ذخیره شده توسط SMES می‌تواند اینرسی پره‌های توربین را جبران کند تا این که سرعت توربین بادی بتواند براساس سرعت باد کنترل شود. SMES در مقایسه با سایر ذخیره‌سازهای انرژی، تلفات کمتری را

<sup>1</sup> Superconductor Magnetic Energy Storage

دارا می‌باشد. به علت نیاز به سیستم خنک‌سازی و قیمت بالای سیم‌پیچی‌های ابررسانا، در حال حاضر SMES برای ذخیره‌سازی انرژی در فاصله زمانی کوتاه مورد استفاده قرار می‌گیرد.

در مرجع [۹] هدف تعیین اندازه اجزای سیستم به گونه‌ای بوده است که ضمن تأمین بار، هزینه سیستم کمینه شده و قیود سیستم نیز برآورده شوند. به طور کلی هزینه‌ها شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه‌های تعمیر و نگهداری و در صورت نیاز، هزینه‌های جایگزینی می‌باشند. برای کمینه‌کردن هزینه‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد که سیستم هیبرید بادی - خورشیدی در مقایسه با سیستم‌های صرفاً بادی یا خورشیدی دارای هزینه کمتری می‌باشند.

مرجع [۱۰] به امکان سنجی سیستم قدرت هیبرید پرداخته است. از این رو از نرم‌افزار HOMER جهت تعیین ظرفیت و بهینه‌سازی سیستم استفاده شده است. این سیستم هیبرید برای تغذیه خانه‌ای دور از شبکه سراسری استفاده شده که مصرف آن ۲۵ کیلووات ساعت در شبانه روز با پیک بار روزانه  $4/73$  کیلووات می‌باشد. نتایج نشان می‌دهند که سیستم هیبرید بادی - دیزل - باتری دارای کمترین هزینه نسب به سایر سیستم‌های پیشنهادی می‌باشد. با این وجود در مقاله بیان می‌شود که اگر هزینه پیل سوختی به ۱۵ درصد میزان فعلی کاهش یابد، سیستم هیبرید بادی - پیل سوختی انتخاب بهتری خواهد بود.

در مرجع [۱۱] اندازه بهینه اجزای یک سیستم هیبرید تولید توان متشکل از آرایه‌های خورشیدی و توربین‌های بادی با استفاده از شبکه موجک بررسی شده است. هدف از انجام این کار ساخت یک نیروگاه هیبرید تولید توان مبتنی بر انرژی‌های نو با حداقل هزینه و تأمین بار مورد نیاز یک مجموعه مستقل از شبکه برق سراسری بوده است. در این مقاله سیستم هیبرید در مجموع هزینه‌های تولید انرژی و نیاز به ذخیره انرژی را کاهش می‌دهد. گرچه طراحی مناسب سیستم تولید توان مستقل مبتنی بر انرژی‌های نو کار دشواری است ولی هدف اصلی این مقاله کاهش هزینه‌ها و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. در سیستم هیبرید مورد نظر زمانی که میزان انرژی تولیدی و انرژی ذخیره شده در باتری برای تأمین بار کافی نباشد، این کسری انرژی، از دست رفتن منبع توان نامیده می‌شود که در این مقاله از آن تحت عنوان شاخص قابلیت اطمینان سیستم یاد شده است. در نهایت با توجه به این که قابلیت اطمینان و هزینه دو فاکتور قابل ملاحظه در تعیین اندازه بهینه سیستم‌های هیبرید تولید توان مستقل می‌باشند و نظر به این که شاخص قیمت در این بررسی، هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد، با استفاده از الگوریتم ژنتیک و پارامترهای مذکور در این مقاله مبادرت به یافتن اندازه بهینه اجزا سیستم شده است.

مرجع [۱۲] از یک سیستم هیبرید شامل آرایه‌های خورشیدی، پیل سوختی، الکترولیزر و باتری برای تأمین بار مورد نیاز خود استفاده کرده است. در مواقعی که تابش خورشید زیاد می‌باشد، بار مورد نظر توسط آرایه‌های خورشیدی تأمین می‌شود و مقداری از مازاد برق تولیدی به الکترولیزر رفته و صرف تولید هیدروژن و ذخیره آن در تانک می‌شود و همچنین بخش دیگر برق تولیدی نیز صرف شارژ باتری می‌گردد. در زمان‌هایی که تابش خورشید به تنهایی نتواند بار منطقه را تأمین کند، باتری و پیل سوختی با کمک آرایه‌های خورشیدی بار را تأمین می‌کنند. در این سیستم هیبرید باتری ذخیره‌ساز کوتاه مدت و پیل سوختی ذخیره‌ساز بلند مدت می‌باشند. در ضمن از توان خروجی پیل سوختی نیز می‌توان جهت شارژ باتری استفاده نمود. نتایج نشان می‌دهد که پیل سوختی در فصل‌های سرد سال جهت تأمین بار، وارد مدار می‌شود و در باقی فصول آرایه‌های خورشیدی و باتری بار را تأمین می‌کنند.

نویسندگان در مرجع [۱۳] با استفاده از اطلاعات تابش خورشید و سرعت باد و اطلاعات موجود درباره بار مصرفی در هر ساعت، به ازای اندازه‌های مختلف آرایه‌های خورشیدی و توربین بادی، اختلاف میان توان تولیدی و میزان توان مصرفی در هر ساعت را محاسبه و با استفاده از یک روش تکرار عددی، سیستم با هزینه کمتر را پیشنهاد داده‌اند.

سیستم هیبرید مورد بررسی در مرجع [۱۴] مشتمل بر پیل سوختی، آرایه خورشیدی، الکترولیزر، تانک ذخیره هیدروژن، گرم کننده بیوگاز، مبدل DC/AC، و مبدل حرارتی می‌باشد. سیستم پیل سوختی شامل یک رفرورمر و یک

پیل سوختی غشای پروتونی (PEM)<sup>۱</sup> با بیشینه توان الکتریکی ۴kW و ماکزیمم خروجی حرارتی ۵/۶ kW می‌باشد، این پیل سوختی می‌تواند توسط رفورمر تغذیه شود و یا این‌که به طور مستقیم از هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر استفاده کند. این سیستم هیبرید جهت تأمین برق و حرارت یک ساختمان سه طبقه مورد استفاده قرار می‌گیرد. جهت ارزیابی حالت‌های مختلف سیستم، مدل دینامیکی سیستم در نرم‌افزار MATLAB پیاده‌سازی شده است. آرایه‌های خورشیدی توان تولیدی را به ساختمان تحویل می‌دهند. اگر توان اضافی موجود باشد، الکترولایزر تغذیه شده و هیدروژن تولید می‌شود که این هیدروژن در تانک هیدروژن ذخیره می‌گردد. در مواقع نیاز پیل سوختی می‌تواند توسط هیدروژن ذخیره شده و یا هیدروژن تولیدی توسط رفورمر تغذیه شود.

در مرجع [۱۵] سیستم ذخیره‌ساز هیدروژن با سیستم کمکی دیزل ژنراتور جهت تعیین سیستم بهینه اقتصادی مقایسه شده است. در این مقاله مشاهده می‌شود که تغییرات فصلی در انرژی خورشیدی در عرض‌های جغرافیایی بالاتر بیشتر است در حالی که اصولاً ارتباط چندانی بین انرژی فصلی باد با عرض جغرافیای به چشم نمی‌خورد. از آنجا که هزینه‌های انتقال سوخت برای مناطق قطبی قابل توجه است، سیستم هیبرید مبتنی بر ذخیره‌ساز هیدروژن برای مناطق قطبی مقرون به صرفه می‌باشد. علاوه بر این، سیستم مبتنی بر ذخیره‌ساز هیدروژن هنگامی که بحث مسائل زیست محیطی مطرح باشد نیز به صرفه می‌باشد. همچنین این گونه پیش‌بینی شده است که در آینده‌ای نزدیک سیستم‌های با ذخیره‌ساز هیدروژن نسبت به دیزل ژنراتور از نظر اقتصادی به صرفه‌تر خواهند شد.

نویسندگان در مرجع [۱۶] سیستم هیبرید شامل یک توربین بادی ۴۰۰ وات، یک پیل سوختی PEM، ابر خازن، الکترولایزر و مبدل توان را مورد بررسی قرار داده‌اند. نوسانات خروجی توربین بادی که ناشی از تغییرات سرعت باد است با استفاده از پیل سوختی کاهش می‌یابد. بار به وسیله توربین بادی که با یک پیل سوختی موازی شده است تغذیه می‌شود. هنگامی که انرژی باد اضافی در دسترس باشد، به وسیله الکترولایزر به هیدروژن تبدیل شده و در مواقع نیاز توسط پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد. هدف از به‌کارگیری ابرسانا و مبدل توان به ترتیب کمینه کردن نوسانات ولتاژ در سیستم و تولید ولتاژ AC می‌باشد. در این مقاله مدل دینامیک اجزای مختلف سیستم هیبرید ارائه گردیده است. کنترلر PID برای کنترل پیل سوختی استفاده شده و از نرم‌افزار MATLAB جهت مدل‌سازی سیستم استفاده شده است. دینامیک سیستم نیز برای تشخیص تغییرات ولتاژ درونی سیستم مطالعه گردیده و پاسخ دینامیکی سیستم به تغییرات پله جریان بار و سرعت باد در تعدادی از وضعیت‌های محتمل مورد بررسی و همچنین تحلیل نتایج و محدودیت‌های شبیه‌سازی سیستم هیبرید باد-پیل سوختی مورد بحث قرار گرفته است.

در مرجع [۱۷] با توسعه یک نرم‌افزار به تعیین اندازه بهینه واحدهای یک سیستم هیبرید متصل به شبکه سراسری، شامل مؤلفه‌هایی از قبیل آرایه خورشیدی، پیل سوختی و الکترولایزر برای تأمین بار مصرفی، پرداخته است. با شبیه‌سازی بهره‌برداری بهینه از سیستم مورد نظر، اندازه تانک ذخیره هیدروژن و یا باتری تعیین، و از لحاظ اقتصادی مورد بررسی قرار گرفته است. در این سیستم تقاضای بار الکتریکی از سه منبع فتوولتائیک، شبکه سراسری و سیستم ذخیره‌سازی انرژی شامل پیل سوختی، الکترولایزر و تانک ذخیره هیدروژن یا باتری تأمین می‌شود. در این سیستم باتری و مجموعه پیل سوختی، الکترولایزر و تانک هیدروژن به‌طور جداگانه نقش ذخیره‌ساز انرژی را ایفا می‌کنند. هزینه تولید انرژی، عملکرد و چگونگی بهره‌برداری از سیستم در هر یک از دو حالت بررسی شده و نتایج به‌دست آمده حاصل از سناریوهای مختلف با هم مقایسه شده‌اند.

با بررسی مقالات قبل می‌توان گفت بیشتر کارهای انجام شده طول عمری حدوداً بیست ساله برای دوره مطالعات خود در نظر گرفته‌اند. با توجه به هزینه‌های جاری، از جمله هزینه‌های جایگزینی اجزای مانند باتری‌ها و مبدل‌ها که عمر مفیدی به مراتب کمتر از ۲۰ سال دارا می‌باشند، به نظر می‌رسد که فاکتورهای اقتصادی مانند نرخ بهره و نرخ تورم

<sup>1</sup> Proton Exchange Membrane

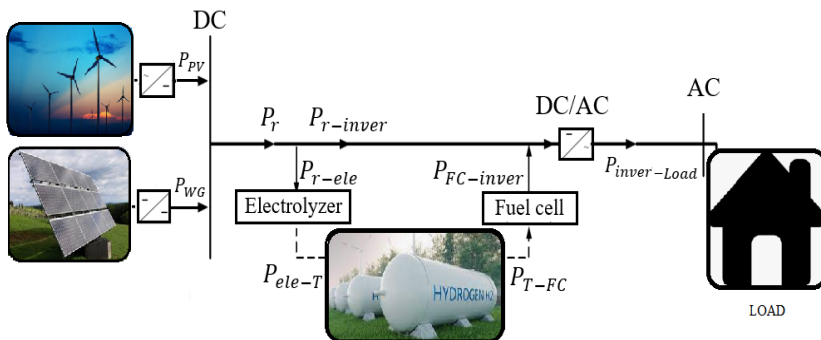
تأثیر زیادی بر ارزیابی‌های اقتصادی طرح‌ها داشته باشند (چه بسا طرحی که بر اساس بهره‌های امروزی اقتصادی می‌باشد با در نظر گرفتن بهره پیش‌بینی شده برای ۲۰ سال آینده توجیه پذیر نباشد).

نکته دیگر این‌که در کمتر مقاله‌ای به بررسی دقیق شاخص‌های قابلیت اطمینان در طراحی اقتصادی سیستم‌های هیبرید پرداخته شده است. به نظر می‌رسد که بتوان ترکیب جالبی بین مقالاتی که به محاسبات قابلیت اطمینان سیستم‌های هیبرید و بهینه‌سازی اقتصادی آنها پرداخته‌اند، ایجاد نمود. از این رو در این مقاله سعی شده با در نظر گرفتن قید قابلیت اطمینان در کنار فاکتورهای اقتصادی (مانند نرخ بهره و نرخ تورم)، ترکیبی بهینه برای یک سیستم جدا از شبکه، متشکل از منابع بادی و آرایه‌های خورشیدی، با حداقل هزینه و حداکثر پاسخگویی به نیاز بار طراحی نمود. بدین منظور با توجه به گستردگی متغیرها و بزرگی تابع هدف از الگوریتم جستجوی کلاغ (CSA)<sup>۱</sup> [۱۸] استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی چه از نظر سادگی و چه از نظر قدرت محاسباتی، یکی از قوی‌ترین الگوریتم‌های عددی برای حل معادلات بهینه‌سازی، محسوب می‌گردد.

ساختار کلی مقاله بدین صورت است که در بخش ۲ به مدل‌سازی و بیان مسئله پرداخته شده است. در بخش ۳ شاخص‌های قابلیت اطمینان و مدل‌سازی آنها بیان شده و در ادامه تابع هدف و محدودیت‌های مسئله در بخش ۴ آورده شده است. در بخش ۵ استراتژی کنترلی و در بخش ۶ الگوریتم جستجوی کلاغ توضیح داده شده است. بخش ۷ به بحث و بررسی سناریوهای مسئله و نهایتاً در بخش ۸ نتیجه‌گیری آورده شده است.

## مدل‌سازی

بلوک دیاگرام سیستم هیبرید مورد بررسی، در شکل (۱) نمایش داده شده است. خروجی واحدهای تولیدی به یک باسبار DC مشترک متصل می‌شوند. همچنین، در این طرح از یک پیل سوختی، یک الکترولایزر، و یک تانک ذخیره‌ساز هیدروژن به عنوان سیستم ذخیره‌ساز انرژی (ESS)<sup>۲</sup> استفاده شده است.



شکل ۱. بلوک دیاگرام سیستم هیبرید بادی-خورشیدی با ذخیره‌ساز هیدروژن.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، سیستم مورد مطالعه از شش جزء اصلی به اضافه یک باسبار DC و یک باسبار AC تشکیل شده است. این اجزا شامل واحدهای توربین بادی، آرایه‌های خورشیدی، الکترولایزر، تانک ذخیره هیدروژن، پیل

<sup>۱</sup> Crow Search Algorithm

<sup>۲</sup> Energy Storage System

سوختی و مبدل DC/AC می‌باشند. مدل به کار گرفته شده برای هر یک از اجزای سیستم مورد مطالعه در ادامه توضیح داده خواهد شد.

### آرایه‌های خورشیدی

داده‌های مربوط به تابش تابیده شده بر سطح آرایه با استفاده از رابطه زیر به توان خروجی آن تبدیل می‌شوند [۱۹]:

$$P_{PV} = \frac{G}{1000} \times P_{PV, rat} \times \eta_{PV, con} \quad (1)$$

که در این رابطه،  $G$  توان تابش عمودی بر سطح آرایه و  $P_{PV, rat}$  توان نامی هر آرایه در ازا  $\frac{W}{m^2}$   $G = 1000$  به دست می‌آید.  $\eta_{PV, con}$  نیز برابر با بازدهی مبدل DC/DC نصب شده بین هر آرایه و باسبار DC می‌باشد. در صورت در دست بودن مؤلفه‌های عمودی و افقی توان تابشی خورشید در هر لحظه، می‌توان توان تابیده شده (به صورت عمودی) بر سطح آرایه نصب شده با زاویه  $\theta_{PV}$  را طبق رابطه زیر محاسبه نمود:

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

که در این رابطه  $G_V(t)$  و  $G_H(t)$  به ترتیب نرخ تابش افقی و عمودی در گام زمانی  $t$  می‌باشد. سایر مشخصات آرایه‌های خورشیدی مطابق جدول (۱) می‌باشند.

جدول ۱. مشخصات آرایه‌های خورشیدی [۱۰].

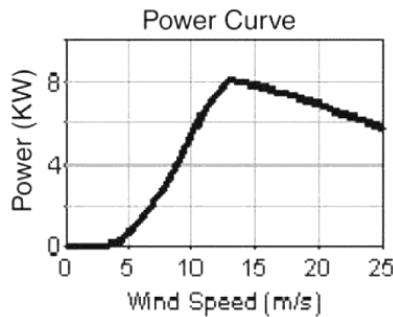
عنوان	مقدار
توان نامی هر آرایه	۱ kW
هزینه اولیه	۷۰۰۰ unit/\$
هزینه جایگزینی	۶۰۰۰ unit/\$
هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری	۲۰ unit-yr/\$
عمر مفید	۲۰ سال
نرخ خروج اضطراری	۴ درصد

### توربین بادی

منحنی توان خروجی توربین بادی در شکل (۲) نمایش داده شده است. این منحنی معمولاً توسط کارخانه سازنده توربین ارائه می‌شود و بیان‌کننده توان حقیقی انتقالی از توربین به باسبار DC می‌باشد. توربین مورد استفاده از نوع BWC Excel-R/۴۸ [۱۰] می‌باشد. توان نامی این توربین ۷/۵ kW بوده و ولتاژ خروجی آن ۴۸ ولت می‌باشد. مشخصه توان خروجی ( $P_{WG}$ ) بر حسب سرعت باد ( $v_W$ ) توربین را می‌توان از رابطه زیر تقریب زد:

$$P_{WG} = \begin{cases} 0 & ; v_W \leq v_{cut-in}, v_W \geq v_{cut-out} \\ P_{WG-max} \times \left( \frac{v_W - v_{cut-in}}{v_{rat} - v_{cut-in}} \right)^m & ; v_{cut-in} \leq v_W \leq v_{rat} \\ P_{WG-max} + \frac{P_{fu} - P_{WG-max}}{v_{cut-out} - v_{rat}} \times (v_W - v_{rat}) & ; v_{rat} \leq v_W \leq v_{fu} \end{cases} \quad (3)$$

که در این رابطه  $v_{cut-in}$ ،  $v_{cut-out}$  و  $v_{rat}$  به ترتیب سرعت قطع پایین، سرعت قطع بالا و سرعت نامی توربین بوده و  $P_{WG-max}$  بیشینه توان خروجی توربین و  $P_{fu}$  نیز توان خروجی در سرعت قطع بالا می باشد.



شکل ۲. مشخصه توان خروجی توربین بادی BWC Excel-R/۴۸ بر حسب سرعت باد [۱۰].

سایر مشخصات توربین های بادی مطابق جدول (۲) می باشند.

جدول ۲. مشخصات توربین های بادی [۱۰].

مقدار	عنوان
۷/۵ kW	توان نامی
۳ m/s	سرعت قطع پایین
۱۳ m/s	سرعت نامی
۲۵ m/s	سرعت قطع بالا
۸/۱ kW	بیشینه توان خروجی
۵/۸ kW	توان خروجی در سرعت قطع بالا
۱۹۴۰۰ unit/\$	هزینه اولیه
۱۵۰۰۰ unit/\$	هزینه جایگزینی
۷۵ \$/unit-yr	هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری
۲۰ سال	عمر مفید
۴ درصد	نرخ خروج اضطراری

## الکترولايزر

وظیفه الکترولايزر تجزیه آب به هیدروژن و اکسیژن در فرآیند ساده الکترولیز می‌باشد. هیدروژن معمولاً در فشاری حدود ۳۰ بار تولید می‌گردد، این در حالی است که برای تولید الکتروسیسته در یک پیل سوختی کافی است که فشار مواد واکنش‌دهنده ۱/۲ بار (حدوداً کمی بیشتر از فشار هوا) باشد [۲۰]. بنابراین در بیشتر مطالعات انجام گرفته هیدروژن خروجی از الکترولايزر مستقیماً وارد تانک ذخیره‌ساز می‌شود [۲۱-۲۳]. توان خروجی الکترولايزر ( $P_{ele-T}$ )، برحسب توان الکتريکی وارد شده به آن ( $P_{r-ele}$ ) و بازدهی الکترولايزر  $\eta_{ele}$ ، را می‌توان با استفاده از رابطه زیر به‌دست آورد:

$$P_{ele-T} = P_{r-ele} \times \eta_{ele} \quad (۴)$$

سایر مشخصات الکترولايزر مطابق جدول (۳) در نظر گرفته شده است.

جدول ۳. مشخصات الکترولايزر [۱۰].

مقدار	عنوان
۲۰۰۰ kW/\$	هزینه اولیه
۱۵۰۰ kW/\$	هزینه جایگزینی
۲۵ kW-yt/\$	هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری
۲۰ سال	عمر مفید
۷۵ درصد	بازدهی

## تانک هیدروژن

انرژی ذخیره شده در تانک ( $E_T$ ) برای هر گام زمانی  $t$  از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد:

$$E_T(t) = E_T(t-1) + P_{ele-T}(t) \times \Delta t - P_{T-FC}(t) \times \Delta t \times \eta_{st} \quad (۵)$$

در رابطه فوق  $\Delta t$  طول گام زمانی بوده که در این مطالعات برابر با یک ساعت می‌باشد.  $\eta_{st}$  نیز بازدهی سیستم ذخیره‌ساز بوده که می‌تواند نشان‌دهنده تلفات ناشی از نشتی و یا پمپاژ باشد، که در این مطالعه برابر با ۹۵ درصد فرض شده است [۲۴].

همچنین بخاطر افت فشار داخل مخزن فرض می‌گردد همه هیدروژن ذخیره شده قابل استخراج نمی‌باشد. در واقع هیدروژن موجود در تانک همواره دارای محدوده بالا و پایین خواهد بود.

$$E_{T-\min} \leq E_T(t) \leq E_{T-\max} \quad (۶)$$

مشخصات تانک هیدروژن مورد استفاده مطابق جدول (۴) می‌باشد.

جدول ۴. مشخصات تانک هیدروژن [۱۰].

مقدار	عنوان
۱۳۰۰ kg/\$	هزینه اولیه
۱۲۰۰ kg/\$	هزینه جایگزینی

مقدار	عنوان
۱۵ kg-yT/\$	هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری
۲۰ سال	عمر مفید
۹۵ درصد	بازدهی
۱/۸ kg/\$ [۲۴]	هزینه خرید هیدروژن

### پیل سوختی

پیل‌های سوختی تجهیزاتی الکتروشیمیایی بوده که انرژی شیمیایی یک واکنش را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می‌نمایند. پیل‌های PEM دارای کارکرد قابل اطمینانی تحت شرایط کار ناپیوسته بوده و انواع صنعتی آن در مقیاس بالا تولید شده و به صورت تجاری در دسترس می‌باشند [۲۵]. توان خروجی پیل سوختی ( $P_{FC-inver}$ ) به صورت تابعی از توان هیدروژن ورودی به آن و همچنین بازدهی آن ( $\eta_{FC}$ )، که می‌توان آن را ثابت فرض نمود، از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$P_{FC-inver} = P_{T-FC} \times \eta_{FC} \quad (۷)$$

مشخصات پیل سوختی مورد استفاده مطابق جدول (۵) می‌باشد:

جدول ۵. مشخصات پیل سوختی [۱۰].

مقدار	عنوان
۳۰۰۰ kW/\$	هزینه اولیه
۲۵۰۰ kW/\$	هزینه جایگزینی
۱۷۵ kW-yT/\$	هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری
۵ سال	عمر مفید
۵۰ درصد	بازدهی

### مبدل DC/AC

مبدل DC/AC توان الکتریکی DC را جهت مصرف بار به توان AC با فرکانس مطلوب بار ( $P_{inver-load}$ ) تبدیل می‌کند. اثر تلفات مبدل را می‌توان با بازدهی آن ( $\eta_{inver}$ ) از رابطه زیر بدست آورد:

$$P_{inver-load} = (P_{FC-inver} + P_{r-inver}) \times \eta_{inver} \quad (۸)$$

سایر مشخصات مبدل مورد استفاده مطابق جدول (۶) می‌باشد:

جدول ۶. مشخصات مبدل DC/AC [۱۰].

مقدار	عنوان
۸۰۰ kW/\$	هزینه اولیه
۷۵۰ kW/\$	هزینه جایگزینی
۸ kW-yT/\$	هزینه سالانه تعمیرات و نگهداری

عنوان	مقدار
عمر مفید	۱۵ سال
بازدهی	۹۰ درصد
نرخ خروج اضطراری	۰/۱۱ درصد [۲۶]

### قابلیت اطمینان

در مراجع مختلف تعاریف گوناگونی برای قابلیت اطمینان ارائه شده است، ولی تعریفی که به طور گسترده مورد قبول قرار گرفته است بدین شرح می باشد: «قابلیت اطمینان عبارت است از احتمال این که یک تجهیز (یا سیستم) وظیفه‌اش را، تحت شرایط بهره‌برداری در مدت زمان معین، به درستی انجام دهد» [۲۷].

### شاخص‌های قابلیت اطمینان

مراجع شاخص‌های متعددی را برای محاسبه قابلیت اطمینان سیستم‌ها ارائه کرده‌اند [۴؛ ۲۸-۳۲] که می‌توان به شاخص‌هایی نظیر امید قطع بار، امید از دست رفتن انرژی و یا امید انرژی تأمین نشده، احتمال از دست رفتن منبع و ضریب قطع معادل (ELF)<sup>۱</sup> اشاره نمود. از آنجایی که ELF در برگیرنده اطلاعات بیشتری، هم درباره تعداد قطعی‌ها و هم مقدار آنها، می‌باشد، در این مقاله از آن به عنوان معیار اصلی قابلیت اطمینان استفاده شده است. در ادامه ضریب قطع معادل به صورت رابطه زیر تعریف شده است:

$$ELF = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \frac{Z(t)}{D(t)} \quad (9)$$

در رابطه بالا  $Z(t)$  مقدار بار از دست رفته و  $D(t)$  میزان تقاضای بار در گام زمانی  $t$  ام می‌باشد.

### مدل قابلیت اطمینان سیستم هیبرید

محاسبات قابلیت اطمینان، با فرض وجود احتمال خروج واحدهای توربین بادی و آرایه‌های خورشیدی، و همچنین احتمال خروج مبدل DC/AC، انجام گرفته است. نرخ خروج اضطراری (FOR)<sup>۲</sup> واحدهای بادی و خورشیدی، در این مطالعه برابر با ۴ درصد در نظر گرفته شده است.

### هزینه از دست رفتن بار

هزینه‌های ناشی از ایجاد وقفه در تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز بار با روش‌های متفاوتی برآورد می‌شود. به عنوان مثال می‌توان این کار را بر اساس میزان تمایل مشتری به پرداخت پول در قبال گسترش شبکه و یا ضرر وارد شده به صنایع در اثر وقفه ایجاد شده در فرآیند تولید آنها محاسبه نمود. در این مقاله هزینه عدم رضایت مصرف‌کنندگان ناشی از قطع بار، به طور متوسط برابر با \$ ۵/۶ [۳۳] در نظر گرفته شده است.

<sup>1</sup> Equivalent Loss Factor

<sup>2</sup> Forced Outage Rate

## تابع هدف و محدودیت‌ها

در این مطالعه هدف یافتن اندازه بهینه اجزای سیستم هیبرید، یعنی تعداد توربین‌های بادی، تعداد و زاویه نصب آرایه‌های خورشیدی، ظرفیت الکتروولایزر، تانک هیدروژن، پیل سوختی و مبدل DC/AC با در نظر گرفتن هزینه‌های سیستم (شامل هزینه سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، و جایگزینی تجهیزات به اضافه هزینه‌های ناشی از وقفه در تأمین بار) در طول عمر سیستم می‌باشد. هزینه خالص فعلی تجهیز  $t$  را می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه نمود [۳۴]:

$$NPC_i = N_i \times (CC_i + RC_i \times H_i + O\&MC_i \times PA(ir, R)) \quad (10)$$

در رابطه فوق،  $N$  تعداد یا ظرفیت تجهیز،  $CC$  هزینه سرمایه‌گذاری اولیه،  $RC$  هزینه هر بار جایگزینی، و  $O\&MC$  هزینه تعمیر و نگهداری سالیانه تجهیز و  $R$  طول عمر پروژه می‌باشد.  $ir$  بهره واقعی بوده که بر حسب بهره نامی ( $ir_{nom}$ ) و نرخ تورم سالیانه ( $f$ ) طبق رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد [۳۵].

$$ir = \frac{(ir_{nom} - f)}{(1 + f)} \quad (11)$$

$PA$  و  $H$  نیز به ترتیب فاکتور ارزش فعلی پرداخت‌های سالیانه و ثابت بوده که با روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$PA(ir, R) = \frac{(1 + ir)^R - 1}{ir(1 + ir)^R} \quad (12)$$

$$H_i = \sum_{n=1}^{y_i} \frac{1}{(1 + ir)^{n \times L_i}} \quad (13)$$

که در این روابط  $L$  و  $y$  به ترتیب تعداد جایگزینی‌ها و طول عمر مفید تجهیز مربوطه می‌باشد. اگر امید بار از دست رفته سالانه با رابطه (۱۴) تعریف گردد، آنگاه ارزش خالص فعلی از دست رفتن بار را می‌توان از رابطه (۱۵) به دست آورد:

$$LOEE = \sum_{t=1}^N E[LOE(t)] \quad (14)$$

$$NPC_{loss} = LOEE \times C_{loss} \times PA \quad (15)$$

که در این روابط،  $E[LOE(t)]$  امید ریاضی مقدار بار از دست رفته در بازه زمانی  $t$  و  $C_{loss}$  برابر است با متوسط ضرر ناشی از قطع هر کیلووات ساعت بار مصرفی می‌باشد. در نهایت تابع هدف مسأله به صورت زیر تعریف می‌گردد:

$$J = \min_X \left\{ \sum_i NPC_i + NPC_{loss} \right\} \quad (16)$$

در عبارت فوق،  $\dot{t}$  نشان دهندهٔ تجهیز مورد نظر بوده، و  $X$  بردار متغیرهای بهینه‌سازی می‌باشد. تابع هدف فوق باید با در نظر گرفتن محدودیت‌های زیر بهینه گردد:

$$E[ELF] \leq ELF_{max} \quad (17)$$

$$0 \leq N_i \quad (18)$$

$$0 \leq \theta_{PV} \leq \frac{\pi}{2} \quad (19)$$

$$E_T(0) \leq E_T(8760) \quad (20)$$

در رابطه (۱۹)،  $\theta_{PV}$  زاویهٔ نصب آرایه‌های خورشیدی بوده و رابطه (۲۰) نیز بیان‌گر این نکته است که انرژی ذخیره شده در تانک در انتهای سال نباید کمتر از انرژی اولیه آن باشد.

### استراتژی بهره‌برداری

نحوهٔ بهره‌برداری از سیستم هیبرید، بر حسب شرایط کار آن تعیین می‌شود. اصولاً در هر گام زمانی یکی از شرایط زیر برقرار می‌باشد:

- مجموع توان تولیدی منابع تجدیدپذیر = توان مصرفی بار: در این صورت تمامی توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر، از طریق مبدل DC/AC به بار تزریق می‌گردد.
- مجموع توان تولیدی منابع تجدیدپذیر  $\geq$  توان مصرفی بار: تحت این شرایط کسری تقاضای بار توسط پیل سوختی تأمین خواهد شد. اگر این کسری از ظرفیت نامی پیل سوختی بیشتر باشد و یا چنانچه هیدروژن موجود در تانک کافی نباشد، قسمتی از بار باید قطع گردد که این امر موجب از دست رفتن بار می‌شود.
- مجموع توان تولیدی منابع تجدیدپذیر  $<$  توان مصرفی بار: در این وضعیت مازاد توان تولیدی توسط واحدهای بادی و خورشیدی به سمت الکترولایزر هدایت شده تا به هیدروژن تبدیل گردد.

### الگوریتم جستجوی کلاغ

یکی از رفتارهای هوشمندانه کلاغ‌ها مخفی کردن غذاهای اضافه و یافتن مجدد آنها در زمان‌های مورد نیاز است. از سوی دیگر، کلاغ‌ها یک رفتار حریصانه دارند که به موجب آن سایر پرندگان را به منظور یافتن غذاهای آنها دنبال می‌کنند. بدین طریق، کلاغ‌ها مخفیگاه سایر پرندگان را پیدا کرده و غذای آنها را می‌ربایند. الگوریتم جستجوی کلاغ، سعی می‌کند رفتار هوشمندانه کلاغ‌ها را برای فراهم آوردن یک جستجوگر توانمند تقلید کند [۱۸].

همان‌گونه که در پاراگراف قبل ذکر شد، کلاغ غذای اضافی خود را در مخفیگاه‌هایی پنهان می‌کند و زمانی که مجدداً به آنها نیاز داشته باشد، محل غذاها را به خاطر آورده و به سراغ آنها می‌رود. از سوی دیگر، کلاغ رفتار حریصانه‌ای دارد که به واسطهٔ آن سایر کلاغ‌ها را جهت یافتن محل غذای آنها دنبال می‌کند. زمانی که کلاغ تعقیب شونده محل مخفیگاه خود را ترک کند، کلاغ تعقیب کننده غذاهای پنهان شده را خواهد دزدید. نتیجتاً، به منظور جلوگیری از دزدیده شدن غذایشان، کلاغ‌ها اعمال محتاطانه‌ای از خود نشان می‌دهند. با الهام از این رفتارهای هوشمندانه، الگوریتم جستجوی کلاغ یک روش بهینه‌سازی توسعه داده شده جهت حل مسائل بهینه‌سازی دشوار دنیای مهندسی است. اصول اصلی CSA عبارتند از [۱۸]:

- کلاغ‌ها به شکل یک جمعیت زندگی می‌کنند.  
 - کلاغ‌ها جهت به خاطر سپردن موقعیت بهترین تجربه خود، از حافظه بهره می‌برند.  
 - کلاغ‌ها سعی می‌کنند به مخفیگاه سایر کلاغ‌ها نزدیک شوند.  
 - به منظور جلوگیری از به تاراج رفتن، کلاغ‌ها اعمال محتاطانه‌ای از خود نشان می‌دهند.  
 مانند سایر الگوریتم‌های فرا ابتکاری مبتنی بر جمعیت، ابتدا جمعیتی متشکل از  $N$  کلاغ در یک محیط  $d$  بعدی مقداردهی اولیه می‌شوند که  $d$  بعد مسئله (تعداد متغیرهای تصمیم) است. موقعیت هر کلاغ یک جواب شدنی مسئله تحت بررسی است. در تکرار  $iter$ ، موقعیت کلاغ  $i$  به صورت  $x^{i,iter} = [x_1^{i,iter}, x_2^{i,iter}, \dots, x_d^{i,iter}]$  نشان داده می‌شود. همچنین، فرض می‌شود که این کلاغ بهترین تجربه شخصی خود را که تاکنون به آن رسیده است در حافظه خود ( $m^{i,iter} = [m_1^{i,iter}, m_2^{i,iter}, \dots, m_d^{i,iter}]$ ) به خاطر سپرده است. به منظور روزآمد کردن موقعیت کلاغ  $i$ ، الگوی ذیل مورد استفاده قرار می‌گیرد:

- **گام شماره ۱:** یک کلاغ به صورت تصادفی از بین اعضای جمعیت انتخاب می‌شود (برای این منظور، یک عدد تصادفی صحیح بین ۱ و  $N$  تولید می‌شود). کلاغ  $i$  سعی می‌کند کلاغ  $j$  را برای یافتن مخفیگاهش ( $m^j$ ) دنبال (تعقیب) کند. در این حالت، با توجه به احتمال آگاهی کلاغ  $j$  از تحت تعقیب قرار گرفتن توسط کلاغ  $i$ ، دو حالت ممکن است به وقوع بپیوندد. برای شبیه‌سازی این حالت‌ها، یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ تولید می‌شود. اگر این عدد بزرگتر از یک پارامتر به نام احتمال آگاهی ( $AP$ ) باشد، به گام شماره ۲ می‌رویم. در غیر این صورت، به گام شماره ۳ خواهیم رفت.  
 - **گام شماره ۲:** در این حالت، کلاغ  $j$  اطلاع ندارد که کلاغ  $i$  در حال تعقیب آن است. بنابراین، کلاغ  $i$  به محل مخفیگاه کلاغ  $j$  مطابق رابطه (۲۱) نزدیک خواهد شد.

$$x^{i,iter+1} = x^{i,iter} + r_i \times f^j \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) \quad (21)$$

که  $x^{i,iter+1}$  موقعیت کلاغ  $i$  در تکرار  $iter+1$ ،  $x^{i,iter}$  موقعیت کلاغ  $i$  در تکرار  $iter$ ،  $m^{j,iter}$  موقعیت حافظه کلاغ  $j$  در تکرار  $iter$ ،  $r_i$  یک عدد تصادفی با توزیع یکنواخت بین ۰ و ۱ و  $f^j$  طول پرواز نامیده می‌شود.  
 - **گام شماره ۳:** در این حالت، کلاغ  $j$  متوجه می‌شود که کلاغ  $i$  در حال تعقیب کردن آن است. به منظور جلوگیری از به تاراج رفتن، کلاغ  $j$  با حرکت به سمت موقعیتی تصادفی از فضای جستجو، کلاغ  $i$  را گمراه خواهد کرد.  
 گام‌های شماره ۱ تا ۳ را می‌توان به صورت رابطه (۲۲) خلاصه کرد:

$$x^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter} + r_i \times f^j \times (m^{j,iter} - x^{i,iter}) & r_j \geq AP^j \\ a \text{ random position} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (22)$$

بعد از روزآمد کردن موقعیت خود، کلاغ  $i$  حافظه خود را بر طبق رابطه (۲۳) روزآمد می‌کند.

$$m^{i,iter+1} = \begin{cases} x^{i,iter+1} & f(x^{i,iter+1}) \text{ is better than } f(m^{i,iter}) \\ m^{i,iter} & \text{otherwise} \end{cases} \quad (23)$$

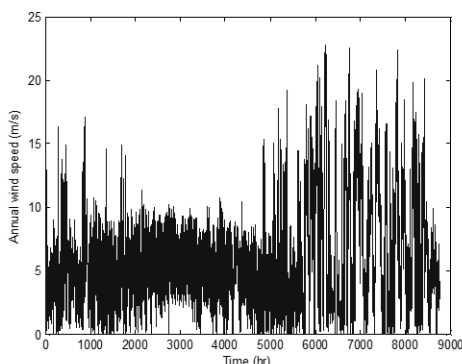
که  $f$  مقدار تابع هدف را نشان می‌دهد.

در الگوریتم CSA، همه کلاغ‌ها موقعیت و سپس حافظه خود را روزآمد می‌کنند. این مراحل تا زمانی ادامه می‌یابند که تعداد تکرار الگوریتم به بیشینه تعداد تکرارها ( $iter_{max}$ ) که یک پارامتر از پیش تعیین شده است، برسد [۱۸].

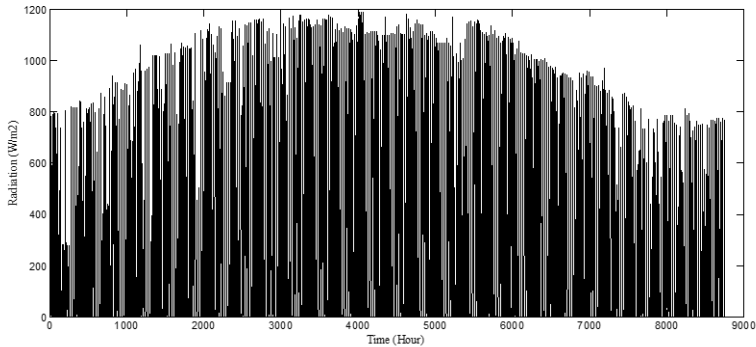
مانند هر الگوریتم جستجوی دیگری، CSA تعدادی جستجوگر ( $N$ ) دارد و الگوریتم پس از رسیدن به بیشینه تعداد تکرارها متوقف می‌شود.  $N$  و  $iter_{max}$  پارامترهای معمول سایر الگوریتم‌های بهینه‌سازی نیز هستند. دو پارامتر مختص CSA، طول پرواز و احتمال آگاهی هستند. پارامتر  $fl$  اندازه گام حرکت به سمت مخفیگاه مورد علاقه را تعیین می‌کند. با استفاده از مقادیر بین ۰ و ۱ برای  $fl$ ، موقعیت جدید یک کلاغ بین موقعیت فعلی (کنونی) و مخفیگاه مورد علاقه‌اش خواهد بود. اگر مقدار  $fl$  از ۱ بیشتر انتخاب شود، کلاغ قادر خواهد بود آن سوی مخفیگاه مورد علاقه‌اش را نیز ببیند. در واقع، مقادیر کوچک  $fl$  منجر به جستجوی محلی و مقادیر بزرگ  $fl$  سبب جستجوی سراسری خواهند شد. در CSA، پارامتر  $AP$  تعادل بین اکتشاف و بهره‌وری را برقرار می‌کند. با افزایش مقدار  $AP$ ، قدرت اکتشاف کاهش یافته و متعاقباً، قدرت بهره‌وری الگوریتم افزایش می‌یابد. اگر مقدار  $AP$  بر روی ۱ تنظیم شود، CSA به یک الگوریتم کاملاً تصادفی تبدیل می‌شود. با استفاده از  $AP$ ، نه تنها امکان جستجوی نواحی‌ای از فضا که تاکنون دیده نشده‌اند وجود دارد، بلکه جستجوگرها قادرند از جهت‌های مختلف به سمت بهترین جواب‌های کشف شده حرکت کنند [۱۸].

### بحث و بررسی

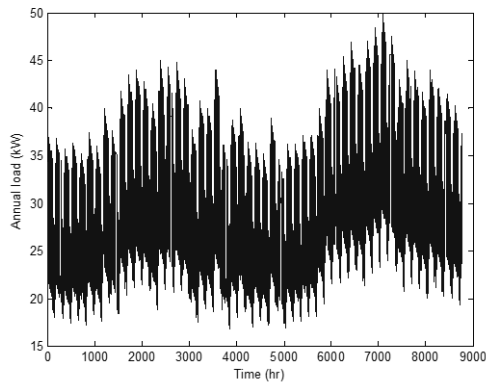
برای شبیه‌سازی سیستم مورد مطالعه از داده‌های سالانه وزش و تابش مربوط به یکی از مناطق استان کرمان و الگوی بار مربوط به سیستم تست قابلیت اطمینان IEEE [۳۶]، با پیک سالانه ۵۰ kW استفاده شده است. این سیستم برای مدت یک سال، با گام زمانی یک ساعت شبیه‌سازی و محاسبات اقتصادی آن با در نظر گرفتن دو سناریو مختلف (پیک بار زمستانی و تابستانی) انجام شده است. در این مطالعه با لحاظ کردن فاکتورهای اقتصادی، نتایج مربوط به یک دوره ۲۰ ساله، بسط داده شده است. برای این منظور نرم‌افزاری تحت محیط برنامه‌نویسی MATLAB آماده شده و داده‌های سیستم شامل اطلاعات تابش و وزش سالیانه (شکل‌های (۳) و (۴)) به همراه منحنی سالیانه بار (شکل (۵)) به عنوان ورودی برنامه در نظر گرفته شده است.



شکل ۳. منحنی سرعت سالیانه باد.



شکل ۴. منحنی تابش سالیانه.



شکل ۵. منحنی بار سالیانه IEEE با پیک ۵۰ kW.

## پیک زمستانی

سیستم هیبرید با فرض این که پیک بار ارایه شده برای فصل زمستان تطبیق داده شده باشد مطابق جدول (۷) بهینه شده و ترکیب بهینه در جدول (۸)، و همچنین هزینه‌ها و شاخص قابلیت اطمینان سیستم در جدول (۹) با به‌کارگیری دو الگوریتم CSA و PSO نشان داده شده است.

## جدول ۷. شرایط فرض شده سیستم هیبرید.

عمر سیستم	نرخ بهره واقعی	$ELF_{max}$	الگوی بار	پیک بار	هزینه بار از دست رفته
۲۰ سال	۷ درصد	۰/۰۱	IEEE RTS	۵۰ kW	۵/۶ kWh/\$

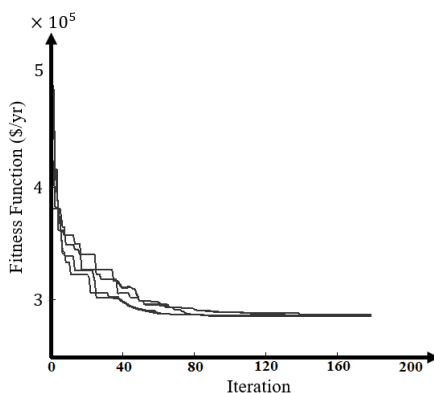
## جدول ۸. ترکیب بهینه سیستم هیبرید- پیک زمستانی.

الگوریتم	$N_{Wind\ Generator}$	$N_{PhotoVoltaic}$	$P_{Electrolyzer}$	$P_{Fuel\ Cell}$	$\theta_{PV}$
CSA	۱۰	۲۱۱	۱۰/۱/۴۴	۴۵/۲۱۰	۳۳/۱۶۲
PSO	۱۰	۲۱۱	۱۰/۱/۴۴	۴۵/۲۱۰	۳۳/۱۶۲

جدول ۹. هزینه‌ها و شاخص قابلیت اطمینان سیستم هیبرید- پیک زمستانی.

الگوریتم	هزینه خالص فعلی تولید انرژی (میلیون دلار)	هزینه خالص فعلی بار از دست رفته (میلیون دلار)	ELF
CSA	۲/۴۴۱	۰/۱۴۰۱	۰/۰۰۹۱
PSO	۲/۴۴۱	۰/۱۴۰۱	۰/۰۰۹۱

نکته جالبی که در جدول (۹) به چشم می‌خورد، مقدار ELF به دست آمده در نقطه بهینه می‌باشد. همان‌طور که پیش‌تر ذکر گردید، قسمتی از تابع هدف تعریف شده با رابطه (۱۶) نشان‌دهنده عدم رضایت و یا زبان وارد شده به مشترکین در اثر قطع بارشان می‌باشد. علاوه بر تابع هدف، رابطه (۱۷) نیز بر میزان بار قطع شده اثر گذاشته و میزان آن را محدود می‌کند، در نتیجه ضریب قابلیت اطمینان سیستم در سطح مطلوبی حفظ می‌شود. منحنی همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی CSA در شکل (۶) برای ۴ بار اجرای مستقل برنامه نشان داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، تقریباً پس از ۱۴۰ تکرار، الگوریتم همگرا می‌گردد.



شکل ۶. منحنی همگرایی الگوریتم CSA - پیک زمستانی.

### پیک تابستانی

با توجه به این‌که پیک سالانه بار در ایران در تابستان و عمدتاً در هفته اول مردادماه رخ می‌دهد، بار موجود را جایجا می‌کنیم تا پیک آن بر پیک سالانه ایران منطبق گردد. نتایج به دست آمده برای این حالت در جدول (۱۰) و (۱۱) با به‌کارگیری دو الگوریتم CSA و PSO آورده شده است.

جدول ۱۰. ترکیب بهینه سیستم هیبرید- پیک تابستانی.

الگوریتم	$N_{Wind\ Generator}$	$N_{PhotoVoltaic}$	$P_{Electrolyzer}$	$P_{Fuel\ Cell}$	$\theta_{PV}$
CSA	۸	۲۴۲	۱۲۱/۲۱۴	۴۸/۱۰۶	۳۰/۲۱۷
PSO	۸	۲۳۹	۱۲۵/۶۵۸	۵۶/۸۵۴	۳۰/۰۱

## جدول ۱۱. هزینه‌ها و شاخص قابلیت اطمینان سیستم هیبرید - پیک تابستانی.

الگوریتم	هزینه خالص فعلی تولید انرژی (میلیون دلار)	هزینه خالص فعلی بار از دست رفته (میلیون دلار)	ELF
CSA	۲/۶۸۷	۰/۰۵۴۷	۰/۰۰۳۳
PSO	۲/۷۰۱	۰/۰۵۵۵	۰/۰۰۳

- با مقایسه نتایج به دست آمده در دو سناریو، به نتایج جالبی می‌توان دست یافت. از جمله آن‌که:
- برای تأمین بار سیستم در سناریو تابستانی لازم است که بر تعداد آرایه‌های خورشیدی افزوده شود که با توجه به هم‌زمانی پیک بار با پیک تابش در ایران این امر منطقی به نظر می‌رسد.
  - ظرفیت الکترولایزر مورد نیاز در سناریو تابستانی حدوداً ۲۰ درصد بیشتر از سناریو زمستانی است. یکی از دلایل این امر این است که، با جابجایی پیک بار از زمستان به تابستان، پیک بار شبانه سیستم نیز به تابستان منتقل می‌گردد، همچنین، با توجه به این که سرعت باد در تابستان نسبتاً کمتر از زمستان است، در نتیجه، برای تأمین بار شبانه سیستم لازم است که در طول روز میزان انرژی بیشتری در تانک ذخیره گردد، که این امر نیز مستلزم استفاده از الکترولایزر بزرگتری خواهد بود.
  - مقایسه جداول مربوط به دو سناریو نشان می‌دهد، زاویه نصب آرایه‌ها در سناریو تابستانی حدود ۳/۴ درجه کمتر از زاویه نصب در سناریو زمستانی می‌باشد. این امر نیز با توجه به زمان پیک تابستانی بار توجیه پذیر است. بدیهی است که با افزایش زاویه نصب آرایه‌ها، بر نسبت بین انرژی دریافتی در زمستان به انرژی دریافتی در تابستان افزوده خواهد شد.
  - مقایسه جداول (۹) و (۱۱) نشان می‌دهد در شرایط پیک تابستانی، در اثر هم‌زمانی پیک بار و تولید، قابلیت اطمینان سیستم بهبود چشم‌گیری یافته و میزان ضریب قطع معادل سیستم به نحو قابل ملاحظه‌ای کاهش پیدا می‌کند.
  - الگوریتم CSA در مقایسه با الگوریتم PSO برای سناریو تابستانی جواب بهتری ارائه کرده است. که این موضوع نشان از عملکرد مطلوب این الگوریتم در حل مسایل بهینه‌سازی دارد.

## نتیجه‌گیری

در این مقاله از الگوریتم کلاغ برای اندازه‌یابی بهینه یک سیستم هیبرید تجدیدپذیر، متشکل از واحدهای تجدیدپذیر یعنی توربین بادی و آرایه خورشیدی، و سیستم ذخیره‌ساز شامل الکترولایزر، تانک هیدروژن و پیل سوختی برای دو سناریو بار (پیک زمستانی و تابستانی) استفاده شد. هدف از بهینه‌سازی کمینه‌کردن هزینه‌های سیستم طی یک دوره کارکرد ۲۰ ساله با در نظر گرفتن قیود فنی و قابلیت اطمینان سیستم بود. نکته‌ای که باید بدان توجه کرد این است که علاوه بر تأمین قیود سیستم و قابلیت اطمینان، تولید انرژی سیستم نیز باید از لحاظ اقتصادی توجیه پذیر باشد. در واقع هزینه‌های بالا آخرین مانع باقی مانده بر سر راه گسترش فراگیر نیروگاه‌های تجدیدپذیر به حساب می‌آیند. از این رو اندازه‌یابی بهینه سیستم‌های تولید انرژی مبتنی بر منابع تجدیدپذیر، در کنار بهبود فناوری تولید، جزء اصلی‌ترین راهکارها جهت کاهش هزینه‌های این نوع سیستم‌ها می‌باشند.

## References

- [1] Swisher, R., Azua, C. R. D., & Clendenin, J. (2001). Strong winds on the horizon: wind power comes of age. *Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers*, 89(12), 1757-1764. <https://doi.org/10.1109/5.975903>
- [2] Sayed, E. T., Olabi, A. G., Alami, A. H., Radwan, A., Mdallal, A., Rezk, A., & Abdelkareem, M. A. (2023). Renewable Energy and Energy Storage Systems. *Energies*, 16(3), 1415. <https://doi.org/10.3390/en16031415>
- [3] Agajie, T. F., Ali, A., Fopah-Lele, A., Amoussou, I., Khan, B., Velasco, C. L. R., & Tanyi, E. (2023). A Comprehensive Review on Techno-Economic Analysis and Optimal Sizing of Hybrid Renewable Energy Sources with Energy Storage Systems. *Energies*, 16(2), 642. <https://doi.org/10.3390/en16020642>
- [4] Ayesha, Numan, M., Baig, M. F., & Yousif, M. (2023). Reliability evaluation of energy storage systems combined with other grid flexibility options: A review. *Journal of Energy Storage*, 63, 107022. <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.107022>
- [5] Kumar, S., Saket, R. K., Dheer, D. K., Holm-Nielsen, J. B., & Sanjeevikumar, P. (2020). Reliability enhancement of electrical power system including impacts of renewable energy sources: a comprehensive review. *The Institution of Engineering and Technology Generation, Transmission & Distribution*, 14(10), 1799-1815. <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2019.1402>
- [6] Zhou, P., Jin, R. Y., & Fan, L. W. (2016). Reliability and economic evaluation of power system with renewables: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58, 537-547. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.344>
- [7] Ntziachristos, L., Kouridis, C., Samaras, Z., & Pattas, K. (2005). A wind-power fuel-cell hybrid system study on the non-interconnected Aegean islands grid. *Renewable Energy*, 30(10), 1471-1487. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.11.007>
- [8] Noori, A., Jafari Shahbazadeh, M., & Eslami, M. (2020). Designing of wide-area damping controller for stability improvement in a large-scale power system in presence of wind farms and SMES compensator. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 119(82), 105936. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.105936>
- [9] Mahesh, A., & Sandhu, K. S. (2020). A genetic algorithm based improved optimal sizing strategy for solar-wind-battery hybrid system using energy filter algorithm. *Frontiers in Energy*, 14(1), 139-151. <https://doi.org/10.1007/s11708-017-0484-4>
- [10] Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2005). Pre-feasibility study of stand-alone hybrid energy systems for applications in Newfoundland. *Renewable Energy*, 30(6), 835-854. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.09.001>
- [11] Mellit, A., Benghanme, M., Hadjarab, A., & Guessoum, A. (2004, June 5). *An adaptive wavenet model for sizing of stand-alone photovoltaic systems*. Proceedings of the Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Mechatronics, 2004, Istanbul, Turkey. <https://doi.org/10.1109/ICMECH.2004.1364402>
- [12] Torres, L. A., Rodríguez, F. J., & Sebastian, P. J. (1998). Simulation of a solar-hydrogen-fuel cell system: results for different locations in Mexico. *International Journal of Hydrogen Energy*, 23(11), 1005-1009. [https://doi.org/10.1016/S0360-3199\(98\)00024-X](https://doi.org/10.1016/S0360-3199(98)00024-X)
- [13] Li, J., Zhao, J., Chen, Y., Mao, L., Qu, K., & Li, F. (2023). Optimal sizing for a wind-photovoltaic-hydrogen hybrid system considering levelized cost of storage and source-load interaction. *International Journal of Hydrogen Energy*, 48(11), 4129-4142. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.271>

- [14] Hedström, L., Wallmark, C., Alvfors, P., Rissanen, M., Stridh, B., & Ekman, J. (2004). Description and modelling of the solar-hydrogen-biogas-fuel cell system in GlashusEtt. *Journal of Power Sources*, 131(1-2), 340-350. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2003.11.094>
- [15] Ghosh, P. C., Emonts, B., & Stolten, D. (2003). Comparison of hydrogen storage with diesel-generator system in a PV-WEC hybrid system. *Solar Energy*, 75(3), 187-198. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2003.08.004>
- [16] Khan, M. J., & Iqbal, M. T. (2005). Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. *Renewable Energy*, 30(3), 421-439. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2004.05.013>
- [17] Ghaemi, S., & Moghaddas-Tafreshi, S. (2007, February 14-16). *Optimal sizing of grid-connected hybrid power system in qeshm island in persian gulf of Iran*. Internationale Energiewirtschaftstagung an der Technische Universität Wien, Vienna, Austria. [http://www.researchgate.net/publication/228421287\\_OPTIMAL\\_SIZING\\_OF\\_GRID-CONNECTED\\_HYBRID\\_POWER\\_SYSTEM\\_IN\\_QESHM\\_ISLAND\\_IN\\_PERSIAN\\_GULF\\_OF\\_IRAN](http://www.researchgate.net/publication/228421287_OPTIMAL_SIZING_OF_GRID-CONNECTED_HYBRID_POWER_SYSTEM_IN_QESHM_ISLAND_IN_PERSIAN_GULF_OF_IRAN)
- [18] Askarzadeh, A. (2016). A novel metaheuristic method for solving constrained engineering optimization problems: Crow search algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12. <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2016.03.001>
- [19] Boucenna, K., Sebbagh, T., & Benchouia, N-E. (2023). Modeling, Optimization, and Techno-Economic Assessment of a Hybrid System Composed of Photovoltaic-Wind-Fuel Cell and Battery Bank. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, 56(1), 29-34. <https://doi.org/10.18280/jesa.560104>
- [20] Yuan, H.-B., Zou, W.-J., Jung, S., & Kim, Y.-B. (2022). Optimized rule-based energy management for a polymer electrolyte membrane fuel cell/battery hybrid power system using a genetic algorithm. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(12), 7932-7948. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.12.121>
- [21] Arsalis, A., Papanastasiou, P., & Georghiou, G. E. (2022). A comparative review of lithium-ion battery and regenerative hydrogen fuel cell technologies for integration with photovoltaic applications. *Renewable Energy*, 191, 943-960. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.04.075>
- [22] El-Sattar, H. A., Kamel, S., Sultan, H. M., Zawbaa, H. M., & Jurado, F. (2022). Optimal design of Photovoltaic, Biomass, Fuel Cell, Hydrogen Tank units and Electrolyzer hybrid system for a remote area in Egypt. *Energy Reports*, 8, 9506-9527. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.07.060>
- [23] Khan, A., & Javaid, N. (2020). Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic, wind turbine and fuel cell systems. *Computers & Electrical Engineering*, 85, 106682. <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2020.106682>
- [24] El-Sharkh, M. Y., Tanrioven, M., Rahman, A., & Alam, M. S. (2006). Cost related sensitivity analysis for optimal operation of a grid-parallel PEM fuel cell power plant. *Journal of Power Sources*, 161(2), 1198-1207. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.06.046>
- [25] O'hayre, R., Cha, S.-W., Colella, W., & Prinz, F. B. (2016). *Fuel cell fundamentals* (3 ed.). John Wiley & Sons. <https://doi.org/10.1002/9781119191766>
- [26] Rahmat, M. K., & Jovanovic, S. (2009). Reliability modelling of uninterruptible power supply systems using fault tree analysis method. *European Transactions on Electrical Power*, 19(2), 258-273. <https://doi.org/10.1002/etep.211>

- [27] Billinton, R., & Allan, R. N. (1992). *Reliability evaluation of engineering systems*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7728-7>
- [28] Askari, F. (2021). Assessment of the Impact of Distributed Generation and Distribution Network Faults on Generation Reliability Indices. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 18(3), 13-33. <https://doi.org/10.48301/kssa.2021.277262.1427>
- [29] Cervan, D., Coronado, A. M., & Luyo, J. E. (2023). Cluster-based stratified sampling for fast reliability evaluation of composite power systems based on sequential Monte Carlo simulation. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 147(17), 108813. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2022.108813>
- [30] Hosseini, A., Hedayati, M., & Khaledian, A. (2022). Multi-Objective Planning of Distributed Generation in the Electricity Network Considering the Interests of the Resource Investor and Network Operator. *Karafan Quarterly Scientific Journal*, 19(3), 279-303. <https://doi.org/10.48301/kssa.2022.328036.1988>
- [31] Jia, H., Peng, R., Yang, L., Wu, T., Liu, D., & Li, Y. (2022). Reliability evaluation of demand-based warm standby systems with capacity storage. *Reliability Engineering & System Safety*, 218, 108132. <https://doi.org/10.1016/j.res.2021.108132>
- [32] Zhang, J., Liu, J., Chen, L., Zhang, L., Zeng, P., & Li, Y. (2023). Reliability evaluation of high permeability renewable energy distribution network considering energy storage charge and discharge strategy. *Energy Reports*, 9(3), 361-368. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.006>
- [33] Garcia, R. S., & Weisser, D. (2006). A wind–diesel system with hydrogen storage: Joint optimisation of design and dispatch. *Renewable Energy*, 31(14), 2296-2320. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2005.11.003>
- [34] Hakimi, S. M., Tafreshi, S. M. M., & Kashefi, A. (2007, August 18-21). *Unit Sizing of a Stand-alone Hybrid Power System Using Particle Swarm Optimization (PSO)*. 2007 Institute of Electrical and Electronics Engineers International Conference on Automation and Logistics, Jinan, China. <https://doi.org/10.1109/ICAL.2007.4339116>
- [35] Shahirinia, A. H., Tafreshi, S. M. M., Gastaj, A. H., & Moghaddomjoo, A. R. (2005, November 18). *Optimal sizing of hybrid power system using genetic algorithm*. 2005 International Conference on Future Power Systems, Amsterdam, Netherland. <https://doi.org/10.1109/FPS.2005.204314>
- [36] Billinton, R., & Allan, R. N. (1984). *Reliability evaluation of power systems*. Springer <https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7731-7>