



Original Research Paper

Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems (HRES) Using Metaheuristic Methods

Soheil Nikroo^{1*}  and Seyed Hamed Hashemi Mehne² 

1. Faculty of Convergent Sciences and Technologies, Islamic Azad University Science and Research Branch, Tehran, Iran

2. Aerospace Research Institute, Ministry of Science and Technology, Tehran, Iran

ARTICLE INFO**ABSTRACT****Article History:**

Received 01 October 2025

Revised 07 October 2025

Accepted 16 November 2025

Available Online 08 December 2025

Keywords:

Renewable energy

Optimization

Metaheuristics

Modeling

Mathematical programming

This paper addresses the challenge of optimal design and planning for a hybrid renewable energy system (HRES). The system comprises a wind turbine, a photovoltaic array, a battery storage unit, and an electrical load. The primary objective is to determine the optimal technical sizing of the system components to minimize the total annualized cost, which includes capital investment, operation and maintenance, and depreciation costs, while simultaneously ensuring a reliable power supply to meet the consumer demand. The solar panel area, the wind turbine rotor swept area, and the battery bank capacity are considered as the key decision variables. This complex optimization problem is formulated as a mathematical programming model with linearized constraints and objective function. The proposed model is then simulated using real-world data for solar radiation and wind speed from a specific location in Khorasan Razavi Province, Iran. To identify the optimal configuration, several meta-heuristic optimization algorithms are employed to solve the model. The results demonstrate that all the applied methods are capable of finding solutions near the global optimum; however, a comparative analysis of algorithm performance reveals that the Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm yields the best results in terms of convergence accuracy and solution stability. This finding provides a valuable guideline for engineers and designers aiming to achieve economic optimization of hybrid energy systems in similar regions.

* Corresponding Author's E-mail: soheiln1234@gmail.com

How to Cite this Article:

S. Nikroo and S. H. Hashemi Mehne, "Optimization of hybrid renewable energy systems (HRES) using metaheuristic methods," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 95-104, 2026, (in Persian), <https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.2.7>.

**COPYRIGHTS**

© 2026 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)





مقاله پژوهشی

بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر ترکیبی با روش‌های فراابتکاری

سهیل نیک‌رو^{۱*} و سیدحامد هاشمی‌مهینه^۲

۱- کارشناسی، دانشکده علوم و فناوری‌های همگرا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران، ایران

۲- دانشیار، پژوهشگاه هوافضا، وزارت علوم، تحقیقات و فناوری، تهران، ایران

چکیده

اطلاعات مقاله

تاریخچه مقاله:

دریافت ۹ مهر ۱۴۰۴
بازنگری ۱۵ مهر ۱۴۰۴
پذیرش ۲۵ آبان ۱۴۰۴
اولین انتشار ۱۷ آذر ۱۴۰۴

واژه‌های کلیدی:

انرژی تجدیدپذیر
بهینه‌سازی
روش‌های فراابتکاری
مدل‌سازی
برنامه‌ریزی ریاضی

در این مقاله، مسئله طراحی و برنامه‌ریزی بهینه‌ی یک سیستم تولید انرژی تجدیدپذیر از نوع ترکیبی مطرح و بررسی می‌شود. این سیستم از یک توربین بادی، یک مجموعه فتوولتائیک، یک مجموعه باتری و یک مصرف‌کننده تشکیل شده است. هدف اصلی، تعیین ابعاد فنی بهینه‌ی اجزای این سیستم است به گونه‌ای که هزینه کل سالیانه (شامل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه، هزینه تعمیر و نگهداری و هزینه استهلاک) کمینه شود و در عین حال، تقاضای بار مصرفی به طور قابل اطمینان تامین گردد. برای این منظور، مساحت پنل خورشیدی، مساحت دیسک پره‌ی توربین باد و ظرفیت باتری به عنوان متغیرهای تصمیم‌گیری در نظر گرفته شده‌اند. این مسئله‌ی بهینه‌سازی غیرخطی در قالب یک مدل برنامه‌ریزی ریاضی با قیود و تابع هدف خطی‌سازی شده، فرمول‌بندی می‌شود. سپس مدل ارائه شده بر اساس داده‌های واقعی سرعت باد و میزان تشعشع خورشیدی یک منطقه در استان خراسان رضوی شبیه‌سازی شده و با استفاده از چند الگوریتم بهینه‌سازی فراابتکاری جهت یافتن بهترین پیکربندی ممکن حل می‌شود. نتایج حل نشان می‌دهد که تمام روش‌ها قادر به یافتن پاسخی نزدیک به بهینه‌ی سراسری هستند، با این حال، مقایسه‌ی کارایی الگوریتم‌ها حاکی از آن است که روش بهینه‌سازی تجمعی ذرات (PSO) از نظر دقت همگرایی و پایداری، بهترین عملکرد را ارائه می‌دهد. این یافته می‌تواند راهنمای مفیدی برای مهندسان و طراحان در جهت بهینه‌سازی اقتصادی سیستم‌های انرژی هیبرید در مناطق مشابه باشد.

* پست الکترونیکی نویسنده مسئول: soheiln1234@gmail.com

How to Cite this Article:

S. Nikroo and S. H. Hashemi Mehne, "Optimization of hybrid renewable energy systems (HRES) using metaheuristic methods," *Journal of Technology in Aerospace Engineering*, vol. 10, no. 2, pp. 95-104, 2026, (in Persian), <https://doi.org/1022034/jtae.2026.10.2.7>.



COPYRIGHTS

© 2026 by the authors. Published by ARI. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of [The Creative Commons Attribution 4.0 International \(CC BY 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)



علائم و اختصارات

A	مساحت (دیسک توربین - صفحه خورشیدی)
$Batt_{min}, Batt_{max}$	کران‌های بالا و پایین ظرفیت باتری
$c_1, c_2, \dots, c_6$	ضرایب هزینه‌ای
C_{cap}	هزینه سرمایه‌ای تجهیزات
C_{OM}	هزینه تعمیر و نگهداری
C_{rep}	هزینه تعویض باتری
C_{salv}	استهلاک
CRF	ضریب بازگشت سرمایه
DR	نرخ تنزیل
f	هزینه سالیانه کل
G_0	ثابت خورشید
G_{exH}	تشعشع فرازمینی خورشید
L	عرض جغرافیایی
N	شماره روز
P	توان الکتریکی
$P_{Batt}(t)$	توان باتری
P_{diff}	تفاضل بار تولیدی و مصرفی
$P_{Load}(t)$	توان مصرفی مورد نیاز
$P_{PV}(t)$	توان تولیدی پنل خورشیدی
P_R	نسبت عملکرد پنل خورشیدی
$P_{Wind}(t)$	توان تولیدی توربین بادی
PL	طول عمر پروژه
PV_{min}, PV_{max}	کران‌های بالا و پایین مساحت پنل
SOC	وضعیت شارژ باتری
U_0	سرعت باد
$Wind_{min}, Wind_{max}$	کران‌های مساحت دیسک توربین
x_1	مساحت پنل خورشیدی
x_2	مساحت دیسک پره‌ی توربین باد
x_3	ظرفیت باتری
α	زاویه ارتفاع
δ	زاویه انحراف
η	ضریب کارایی (راندمان)
η_{ch}	بازده شارژ باتری
θ	زاویه آزیموت
ρ	چگالی هوا
φ	زاویه اوج خورشید
ω	زاویه ساعت

۱. مقدمه

باتوجه به افزایش نگرانی‌ها درباره تغییرات اقلیمی، کاهش منابع سوخت‌های فسیلی، و رشد تقاضای جهانی برای انرژی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر به‌عنوان راه‌کاری پایدار و دوست‌دار محیط‌زیست اهمیت روزافزونی یافته است. این منابع، نقشی کلیدی در گذار به سوی نظام‌های انرژی کم‌کربن و تحقق اهداف توسعه پایدار در آینده ایفا می‌کنند. توسعه و بهره‌برداری از فناوری‌های نوین در این حوزه، می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری و پایداری سیستم‌های انرژی شود.

در این راستا، یکی از رویکردهای مؤثر برای افزایش بهره‌وری و پایداری در استفاده از منابع تجدیدپذیر، بهره‌گیری از سیستم‌های ترکیبی انرژی‌های تجدیدپذیر^۱ (HRES) است.

سیستم‌های ترکیبی انرژی‌های تجدیدپذیر به سامانه‌هایی اطلاق می‌شود که با بهره‌گیری همزمان از دو یا چند منبع انرژی تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی، بادی، زیست‌توده یا آبی و در برخی موارد با ترکیب آن‌ها با منابع انرژی مرسوم نظیر ژنراتورهای دیزلی یا سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (باتری)، طراحی می‌شوند. هدف اصلی این سامانه‌ها بهینه‌سازی تولید انرژی، افزایش قابلیت اطمینان، کاهش نوسانات تولید، و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی است. به‌کارگیری سیستم‌های ترکیبی به‌ویژه در مناطق دورافتاده و فاقد شبکه برق سراسری، می‌تواند راه‌حلی پایدار، اقتصادی و زیست‌محیطی برای تأمین انرژی محسوب شود. انعطاف‌پذیری بالا، افزایش بهره‌وری، و کاهش هزینه‌های عملیاتی از دیگر مزایای کلیدی این نوع سیستم‌ها به‌شمار می‌روند.

طراحی سیستم‌های ترکیبی انرژی‌های تجدیدپذیر با وجود پتانسیل بالا در پایداری و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، با چالش‌هایی در حوزه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی مواجه است. یکی از چالش‌های اصلی، ماهیت ناپایدار و متغیر منابع انرژی تجدیدپذیر مانند خورشید و باد است که به‌طور مستقیم بر قابلیت اطمینان سیستم تأثیر می‌گذارد. علاوه بر این، تعیین ظرفیت بهینه برای هر یک از اجزای سیستم (شامل پنل‌های خورشیدی، توربین‌های بادی، باتری‌ها، ژنراتورهای پشتیبان و مبدل‌ها) به‌گونه‌ای که نیاز بار را به‌طور کامل و با حداقل هزینه تأمین کند، یکی از مسائل پیچیده در طراحی HRES به‌شمار می‌رود.

از دیگر چالش‌ها می‌توان به بالا بودن تعداد متغیرها و محدودیت‌های طراحی، تضاد بین اهداف چندگانه (مانند کمینه‌سازی هزینه و بیشینه‌سازی قابلیت اطمینان)، و ضرورت سازگاری سیستم با شرایط اقلیمی و الگوهای مصرف محلی اشاره کرد. همچنین، میزان ذخیره‌سازی مورد نیاز و نحوه مدیریت توان در شرایط بار بالا یا کمبود تولید نیز نیازمند تحلیل دقیق و مدل‌سازی‌های پیچیده است.

بین استفاده شده است.

یکی از مسائل مهم در طراحی یک HRES، مسئله تعیین اندازه باتری است که تاثیر مستقیمی بر هزینه، قابلیت اطمینان و کارایی سیستم دارد. مسئله تعیین اندازه باتری با هدف کمینه کردن هزینه مترتب در یک بازه زمانی مشخص در [۵] به صورت برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی و برای چند حالت مختلف حل شده است. یک روش مدل پایه نیز برای تعیین بهینه‌ی پارامترهای طراحی سیستم خورشیدی، توربین بادی، مولدهای دیزلی و باتری ارائه شده است [۶].

این مسئله با هدف کمینه کردن هزینه پیشبینی شده کل و برقراری میزان بار مورد تقاضا مدل‌سازی و با یک الگوریتم متامدل حل شده است. نتایج شبیه‌سازی علاوه بر تایید روش در کاهش قابل ملاحظه هزینه از ۱۳۰۰۰ دلار تا ۱۹۰۰ هزار دلار، مشخص می‌کند که روش پیشنهادی در سناریوهای مختلف همگرایی سریع‌تری نسبت به دو روش تبرید شبیه‌سازی شده و نلدر-مید دارد. علاوه بر مراجع یاد شده، منابعی نیز موجودند که روش‌های بهینه‌سازی در طراحی HRES را به طور جامع بررسی و تحلیل کرده‌اند که از آن میان می‌توان به [۷] و [۸] اشاره کرد.

در مقاله حاضر مسئله تعیین سه پارامتر طراحی یک HRES شامل پنل خورشیدی، توربین باد و باتری طوری انتخاب می‌شوند که ضمن برقراری شرایط توازن بار و محدودیت‌های تولید انرژی الکتریکی از خورشید و باد و محدودیت باتری، هزینه کل سیستم بر واحد انرژی کمینه شود. مسئله با تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری، تابع هدف و قیود به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی غیرخطی مدل‌سازی می‌شود. برای حل این مسئله از چند روش فراابتکاری استفاده شده و نتایج آن‌ها با هم مقایسه خواهند شد.

۲. تعریف مسئله

تعریف مسئله از چهار مبحث به نام‌های معرفی سیستم HRES، مدل‌سازی، روش‌های فراابتکاری و شبیه‌سازی و نتایج می‌باشد که در ادامه به آن‌ها خواهیم پرداخت.

۲.۱ معرفی سیستم HRES

سیستم HRES مطالعه حاضر از همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، از یک توربین باد، یک مجموعه پنل خورشیدی (فتوولتائیک) و یک مجموعه باتری تشکیل شده که به کمک یک اینورتر انرژی الکتریکی یک بخش مسکونی یا یک واحد صنعتی کوچک را به صورت توزیع پراکنده تامین می‌کند.

لذا، استفاده از روش‌های بهینه‌سازی پیشرفته برای طراحی و بهره‌برداری از HRES امری ضروری است. این روش‌ها، با هدف یافتن ترکیب بهینه اجزا و استراتژی‌های بهره‌برداری، می‌توانند عملکرد سیستم را از نظر فنی و اقتصادی بهبود بخشیده و بهره‌وری کلی را افزایش دهند. بهینه‌سازی همچنین در کاهش هزینه سرمایه‌گذاری، کاهش اتلاف انرژی، افزایش سهم انرژی تجدیدپذیر، و ارتقاء پایداری سیستم نقش کلیدی دارد. به دلیل پیچیدگی ذاتی این سیستم‌ها، الگوریتم‌های تکاملی و فراابتکاری به طور گسترده برای حل این مسائل مورد استفاده قرار می‌گیرند.

به عنوان نمونه در [۱] طراحی سیستم HRES برای کاربرد خانگی با هدف کمینه‌سازی هزینه همسطح شده انرژی (LCOE) که هزینه کل سیستم برای تامین یک کیلووات انرژی است، مدل‌سازی شده است. مدل پیشنهادی روی یک سیستم ترکیبی متشکل از فتوولتائیک و توربین باد پیاده‌سازی و با بهره‌گیری از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) حل شده است. نتایج حاکی از کاهش قابل توجه هزینه‌های تولید برق و افزایش بهره‌وری سیستم بوده است. مسئله بهینه‌سازی طراحی HRES در [۲] نیز مطرح شده که سیستم مورد بررسی شامل انرژی خورشیدی و آبی برای جامعه‌ای روستایی در کشور فیلیپین بوده است. در این مسئله هزینه کل سیستم در یک روز متشکل از هزینه فتوولتائیک و میکرو هیدرو توربین است. کمینه‌سازی به کمک روش PSO بهبود یافته انجام شده و نتایج نشان داده که روش پیشنهادی نسبت به نرم‌افزارهای متداول، به طور متوسط باعث کاهش ۲۵ درصدی هزینه کل شده است.

یک رویکرد چند هدفه برای کمینه‌سازی همزمان هزینه، بیشینه‌سازی نرخ انرژی تجدیدپذیر و کمینه‌سازی انتشار سوخت در [۳] ارائه شده است. ویژگی این مدل در منظور کردن عدم قطعیت در داده سرعت باد، تشعشع خورشیدی و دمای محیط و میزان بار مصرفی است. در نهایت مسئله با روش ازدحام پرندگان چند هدفه دینامیک (DMOPSO) حل شده و به طور متوسط باعث افزایش ۵۶ درصد در هزینه، کاهش ۱۰۶ تن دی‌اکسید کربن در سال و کاهش ۶۴۰۰ دلاری در هزینه شده است.

از جمله کاربردهای هوش مصنوعی می‌توان به [۴] اشاره کرد که یک HRES متشکل از پنل خورشیدی و سیستم زمین گرمایی را همراه با پیل سوختی ترکیب کرده است. این سیستم در طول با انرژی خورشید انرژی زمین گرمایی، برق، گرما، آب و هیدروژن تولید کرده و در طول شب، پیل سوختی هیدروژن ذخیره شده را به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند تا تامین انرژی به طور پیوسته برقرار باشد. در این طرح از روش‌های یادگیری ماشین که با الگوریتم ژنتیک بهینه شده برای ایجاد مدل پیش

ضریب کارایی توربین است. لذا اگر پروفایل باد شکل ۱ را در این رابطه قرار دهیم با فرض اینکه شعاع دیسک روتور ۲/۵ متر باشد و $\eta = 0.35$ و آنگاه نمودار توان خروجی توربین به صورت نمودار خط چین شکل ۱ خواهد بود. همان گونه که ملاحظه می‌شود، انرژی تولید شده نیز متغیر بوده و تا ۴/۲ کیلووات در روز می‌رسد. اگر بخواهیم کل توان الکتریکی توربین را محاسبه کنیم باید انتگرال زیر نمودار قرمز رنگ را محاسبه کنیم که برای دو روز، ۵۴/۵۵ کیلووات ساعت و برای ۲۴ ساعت به طور متوسط ۲۷/۲۷ کیلووات ساعت تولید خواهیم داشت. به طور مشابه برای سیستم فتوولتائیک نیز باید میزان تشعشع خورشید در محل نصب و سپس میزان توان تولیدی را تخمین بزنیم. میزان تابش خورشید به عوامل مکانی و محیطی مانند دمای هوا بستگی دارد. از جمله عوامل مکانی، موقعیت پنل خورشیدی نسبت به خورشید است که با زاویه ارتفاع (α) و زاویه آزیموت (θ) مشخص می‌شود. زاویه ارتفاع را می‌توان به کمک عرض جغرافیایی مکان (L) و زاویه انحراف (δ) و زاویه ساعت (ω) با رابطه زیر محاسبه کرد [۱۰]:

$$\sin \alpha = \sin L \sin \delta + \cos L \cos \omega \quad (2)$$

زاویه آزیموت هم به صورت زیر تعیین می‌شود [۱۰]:

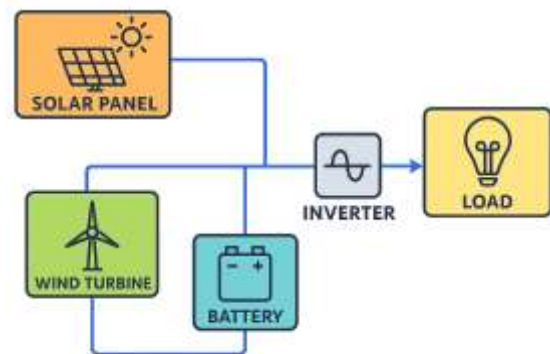
$$\sin \theta = \frac{\cos \delta \sin \omega}{\cos \alpha} \quad (3)$$

این زوایا را معمولاً در طول روز خورشیدی یعنی از طلوع تا غروب خورشید محاسبه می‌کنند تا بتوان میزان تشعشع را در طول روز تخمین زد. یکی از مدل‌های تخمین تشعشع فرازمینی خورشید (G_{exH}) روی یک سطح افقی که با استفاده از قانون پلانک به دست آمده به صورت زیر بیان می‌شود [۱۰]:

$$G_{exH} = G_0 \left(1 + 0.0333 \cos \left(\frac{2\pi N}{356} \right) \right) \cos \varphi \quad (4)$$

که در آن، G_0 ثابت خورشید و برابر با ۱۳۶۷ W/m است، N شماره روز مورد نظر در سال است بین ۱ تا ۳۶۵ و φ زاویه اوج خورشید است که به کمک L ، θ و δ قابل محاسبه است.

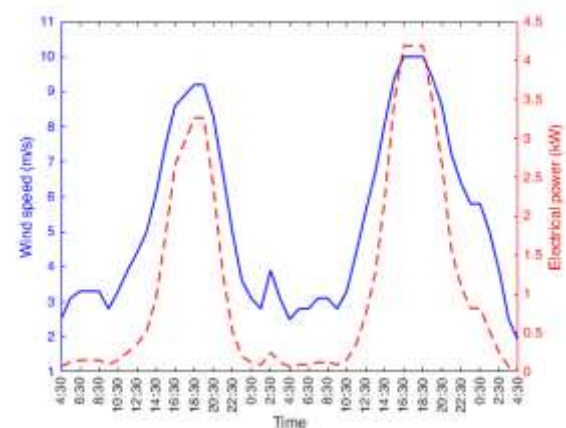
اکنون اگر به کمک روابط بالا، برای موقعیت انتخاب شده (دیزباد بالا در استان خراسان رضوی) محاسبات تشعشع خورشیدی را در روز ۱۸ مرداد ماه ۱۴۰۴ محاسبه کنیم، نموداری مطابق شکل ۲ حاصل خواهد شد. در این محاسبات موقعیت مکانی $(Lat, Lon) = (36.09, 59.28)$ استفاده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود، روز خورشیدی از دقیقه ۳۱۲ شروع شده و به دقیقه ۱۰۵۴ ختم می‌شود یعنی از حدود ۵:۱۲ صبح تا ۱۷:۳۴ عصر. اوج تشعشع نیز که حدود ۱۲۶۵/۵ وات بر متر مربع است در دقیقه ۶۹۵ رخ داده است. لذا تشعشع و در نتیجه آن میزان توان خروجی پنل خورشیدی هم در زمان متغیر



شکل ۱- شماتیک یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی.

Fig. 1. The schematic of a hybrid renewable energy system.

بدیهی است که میزان تولید انرژی الکتریکی توربین باد و فتوولتائیک متفاوت بوده به در طی روز نیز بسته به شرایط متغیر است. به عنوان مثال اگر نمودار باد در منطقه دیزباد بالا در استان خراسان رضوی در طی دو روز متوالی از ۱۴۰۴/۰۵/۱۸ تا ۱۴۰۴/۰۵/۱۹ را بر حسب زمان رسم کنیم، نموداری به صورت خط پیوسته در شکل ۱ خواهیم داشت.



شکل ۲- یک نمونه از نمودار سرعت باد و انرژی الکتریکی حاصل از آن.

Fig. 2. An example of a wind speed profile and the resulting electrical energy.

همان گونه که مشاهده می‌شود، سرعت باد در خلال یک روز از ۲/۵ متر بر ثانیه تا حدود ۱۰ متر بر ثانیه متغیر است و در حدود ساعت ۱۶ تا ۲۰ به حداکثر خود می‌رسد. رابطه تبدیل سرعت باد ورودی به توان الکتریکی در یک توربین بادی محور افقی به قرار زیر است [۹]:

$$P = \eta \left(\frac{1}{2} \rho A U_0^3 \right) \quad (1)$$

که در آن، U_0 سرعت باد، A مساحت دیسک پره‌ها، ρ چگالی هوا و η

اما تابع هدف مسئله عبارت است از هزینه سالیانه کل که خود متشکل است از هزینه سرمایه‌ای تجهیزات (C_{cap})، هزینه تعمیر و نگهداری (C_{OM})، استهلاک (C_{satv}) و هزینه تعویض باتری (C_{rep}). در نتیجه تابع هدف مسئله که باید کمینه‌سازی شود، عبارت است از:

$$f = C_{cap} + C_{om} + C_{rep} - C_{satv} \quad (6)$$

که در آن،

$$C_{cap} = (c_1x_1 + c_2wx_2 + c_3x_3) \times CRF \quad (7)$$

$$C_{om} = c_4x_1 + c_5x_2 \quad (8)$$

$$C_{rep} = c_3c_6x_3 \quad (9)$$

$$C_{satv} = 0.1c_6(c_1x_1 + c_2x_2 + c_3x_3) \quad (10)$$

ثابت‌های هزینه‌ای در تعاریف بالا عبارتند از:

c_1 : هزینه خرید و نصب ۱ متر مربع پنل خورشیدی

c_2 : هزینه خرید و نصب ۱ کیلووات توربین باد

w : ضریب تبدیل توربین باد از مساحت دیسک به توان

c_3 : هزینه خرید ۱ کیلووات ساعت باتری

c_4 : هزینه تعمیر و نگهداری ۱ متر مربع پنل خورشیدی در سال

c_5 : هزینه تعمیر و نگهداری ۱ متر مربع توربین باد در سال

c_6 : ضریب تنزیل است که به صورت زیر تعریف می‌شود

$$c_6 = \frac{1}{(1 + DR)^{PL} - 1} \quad (11)$$

در این رابطه،

DR : نرخ تنزیل

PL : طول عمر پروژه

CRF : ضریب بازگشت سرمایه است که به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$CRF = \frac{DR(1 + DR)^{PL}}{(1 + DR)^{PL} - 1} \quad (12)$$

پس از تعریف متغیرهای تصمیم‌گیری و تابع هدف، باید قیود و محدودیت‌های مسئله را تعریف کنیم. اصلی‌ترین قید این مسئله توازن بین تولید و مصرف است. این قید به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$P_{PV}(t) + P_{Wind}(t) + P_{Batt}(t) \geq P_{Load}(t) \quad (13)$$

که در آن،

$P_{PV}(t)$: میزان توان تولیدی پنل خورشیدی در ساعت t ام روز

$P_{Wind}(t)$: میزان توان تولیدی توربین بادی در ساعت t ام روز

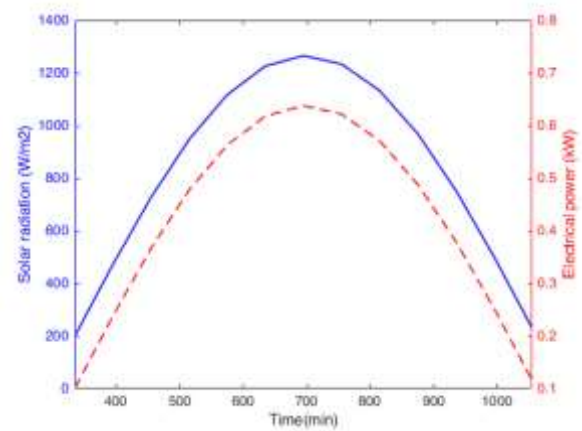
$P_{Batt}(t)$: میزان توان باتری در ساعت t ام روز

$P_{Load}(t)$: میزان توان مصرفی مورد نیاز در ساعت t ام روز

است. رابطه تبدیل تشعشع به توان الکتریکی به صورت زیر است [۱۰]:

$$P = \eta A G_{exH} P_R \quad (5)$$

که در آن، A مساحت پنل، η راندمان پنل و P_R نسبت عملکرد آن است. اگر برای داده تشعشع شکل ۲، توان را با فرض یک پنل با مساحت ۲.۸ متر مربع، با راندمان $\eta = 0.2$ و نسبت عملکرد $P_R = 0.9$ محاسبه کنیم، نمودار خط چین در این شکل به دست می‌آید. مجموع تولید این پنل در ۲۴ ساعت نیز برابر ۵/۴ کیلووات تخمین زده می‌شود.



شکل ۳- یک نمونه از نمودار تشعشع خورشید و انرژی الکتریکی حاصل از آن.

Fig. 3. An example of solar irradiation and the resulting electrical energy.

لذا تعیین اندازه پنل خورشیدی و ظرفیت نامی توربین باد در کنار ظرفیت باتری برای ذخیره‌سازی مازاد انرژی و تامین توان مورد نیاز در زمان لازم، در کارایی و عملکرد سیستم HRES نقش اساسی دارد. این ابعاد باید طوری تعیین شوند که در وهله اول نیاز مشتری را برآورده سازند و علاوه بر آن هزینه کل سیستم را کمینه کنند. این الزامات، متغیرهای تصمیم‌گیری، قیود و تابع هدف مسئله بهینه‌سازی را در بخش بعد تعیین می‌کنند.

۲.۲ مدل‌سازی

بر اساس آنچه در بخش پیش آمد، در طراحی سیستم HRES با سه مجهول مواجه هستیم: اندازه پنل خورشیدی، اندازه توربین باد و ظرفیت باتری. این مجهولات متغیرهای تصمیم‌گیری مسئله را به صورت زیر تعیین می‌کنند:

x_1 : مساحت پنل خورشیدی

x_2 : مساحت دیسک پره توربین باد

x_3 : ظرفیت باتری

$$Wind_{min} \leq x_2 \leq Wind_{max} \quad (22)$$

$$Batt_{min} \leq x_3 \leq Batt_{max} \quad (23)$$

بدین ترتیب، مسئله بهینه‌سازی طراحی HRES مشتمل بر کمینه‌سازی تابع هدف (۶) تحت قیود (۱۳) و (۲۳)–(۲۱) به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی ریاضی مدل‌سازی شد. این مسئله دارای یک تابع هدف خطی باید یک قید خطی و ۲۴ محدودیت اصلی و سه محدودیت روی مقدار متغیرهای تصمیم‌گیری است. در بخش بعد این مسئله را با روش‌های فراابتکاری حل خواهیم کرد.

۲.۳ روش‌های فراابتکاری

روش‌های فراابتکاری مجموعه‌ای از روش‌های تقریبی برای حل مسائل بهینه‌سازی پیچیده هستند که یافتن جواب دقیق آن‌ها در زمان معقول دشوار یا ناممکن است. این روش‌ها به جای جستجوی کامل فضای پاسخ، با استفاده از قوانین ساده و مکانیزم‌های تصادفی یا شبه تصادفی، فضای جستجو را کاوش می‌کنند و معمولاً به جواب‌های نزدیک به بهینه می‌رسند.

عدم نیاز به محاسبه مشتق، استقلال از پاسخ اولیه، سادگی پیاده‌سازی و انعطاف‌پذیری از جمله ویژگی‌های روش‌های فراابتکاری بوده که باعث شده این روش‌ها به طور گسترده استفاده شده و توسعه یابد. الگوریتم ژنتیک^۱ (GA) [۱۱]، الگوریتم ازدحام ذرات [۱۲]، روش لانه مورچگان [۱۳]، الگوریتم بهینه‌سازی وال^۲ (WOA) [۱۴]، [۱۵]، الگوریتم بهینه‌سازی ملخ [۱۶] و روش شمع-شب پره^۳ (MFO) [۱۷] نمونه‌هایی از روش‌های فراابتکاری هستند.

روش‌های فراابتکاری معمولاً با یک جمعیت اولیه یا دسته‌ای از پاسخ‌های فرضی مسئله که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، شروع می‌شوند. سپس این جمعیت طی یک روال تکراری بهبود می‌یابد یعنی بر اساس مقدار تابع هدف این جمعیت و بهترین پاسخ‌های موجود بین آن‌ها، روش سعی می‌کند به پاسخ‌های بهتری با تابع هدف کمتر برسد. بخش تکراری الگوریتم دو هدف را دنبال می‌کند، یکی رسیدن به نقاط بهینه بهتر و دیگری پرهیز از افتادن نقاط بهینه محلی. این دو هدف معمولاً با دو گام با عنوان اکشاف^۴ و استخراج^۵ محقق می‌شود. در فرآیند اکشاف روش سعی در جستجوی وسیع‌تر فضا برای یافتن نقاط بهینه جدید است. حال آن‌که در استخراج، محدوده نزدیک به بهترین جواب موجود برای یافتن نقاط با تابع هدف کمتر بررسی می‌شود. تفادیت عمده روش‌های فراابتکاری در تعریف این فرآیندها مستتر است.

این قید تضمین می‌کند که توان تولیدی کمتر از توان مصرفی نباشد. اما اجزای این قید را باید بر حسب متغیرهای تصمیم‌گیری بنویسیم. نخست با توجه به رابطه (۵)، توان پنل خورشیدی برابر است با:

$$P_{PV}(t) = \eta_{PV} x_1 G_{exH}(t) PR \quad (14)$$

و توان توربین باد با توجه به (۱) برابر است با

$$P_{Wind} = \eta_{Wind} \left(\frac{1}{2} \rho x_2 U_0(t)^3 \right) \quad (15)$$

برای تخمین میزان توان باتری، باید ابتدا وضعیت شارژ (SOC) آن را محاسبه کنیم. اگر توان تولیدی پنل و توربین بیشتر از توان مصرفی باشد، باتری در حال شارژ است و میزان شارژ آن برابر است با

$$charge = \min\{P_{diff} \eta_{ch}, 0.9x_3 - SOC(t-1)\} \quad (16)$$

که این مقدار به SOC ساعت قبل اضافه می‌شود تا SOC فعلی به دست آید:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + charge \quad (17)$$

در اینجا،

P_{diff} : تفاضل بار تولیدی و مصرفی

η_{ch} : بازده شارژ باتری

و اگر توان مصرفی بیشتر از توان تولیدی باشد، یعنی $P_{diff} < 0$ ، آنگاه باتری در حالت دشارژ قرار دارد و میزان آن برابر است با:

$$dis = \min\left\{\frac{|P_{diff}|}{\eta_{dis}}, SOC(t-1) - 0.2x_3\right\} \quad (18)$$

و وضعیت جدید برابر است با:

$$SOC(t) = SOC(t-1) - dis \quad (19)$$

و در نهایت، توان موجود باتری برابر خواهد بود با:

$$P_{Batt}(t) = \max\{0, SOC(t) - 0.2x_3\} \quad (20)$$

یک دسته قید هم برای ابعاد توربین، پنل خورشیدی و ظرفیت باتری که مجاز به انتخاب آن‌ها هستیم، خواهیم داشت که به شکل زیر بیان می‌شوند:

$$PV_{min} \leq x_1 \leq PV_{max} \quad (21)$$

مربع و بار مصرفی بر حسب کیلووات است.

جدول ۳- اطلاعات ساعتی تابش خورشید، سرعت باد و بار مصرفی.

Table 3. Hourly data of irradiation, wind speed and load.

Time(h)	Irradiation(W/m ²)	Wind(m/s)	Load(kW)
1:00	0	2.5	0
2:00	0	2.8	0
3:00	0	2.8	0
4:00	0	3.1	0.9
5:00	0	3.1	1.8
6:00	200.2	2.8	2.7
7:00	472.7	3.3	3.6
8:00	727.5	4.4	4.5
9:00	947.4	5.6	5.4
10:00	1117.4	6.7	6.3
11:00	1225.9	8.1	7.2
12:00	1265.5	9.4	7.2
13:00	1233.5	10.0	6.3
14:00	1132.1	10.0	6.3
15:00	968.2	10.0	5.4
16:00	752.9	9.4	5.4
17:00	501.0	8.6	7.2
18:00	229.5	7.2	6.3
19:00	0	6.4	5.4
20:00	0	5.8	4.5
21:00	0	5.8	2.7
22:00	0	5.0	0.9
23:00	0	3.9	0
24:00	0	2.5	0

نتایج شبیه‌سازی‌ها شامل ابعاد پنل‌های خورشیدی لازم (متر مربع)، قطر توربین باد (متر) و ظرفیت باتری (کیلووات ساعت) در جدول ۴ نشان داده شده است.

جدول ۴- نتایج شبیه‌سازی.

Table 4. The simulation results.

Method	x_1	x_2	x_3	f
PSO	21.88	25.0	14.64	7425.58
GA	21.88	25.0	14.64	7425.99
WOA	30.00	25.0	14.18	7444.24
MFO	21.89	25.0	14.64	7425.60

در کنار مزایایی که ذکر شد، باید به معایب این روش‌ها از جمله حساسیت به پارامترها و کندی همگرایی در برخی مسائل نیز اشاره کرد. با این وجود، روش‌های فراابتکاری هر روزه در حل مسائل پیچیده مهندسی استفاده می‌شوند. در بخش بعد از این روش‌های برای حل مسئله HRES استفاده خواهد شد.

۲.۴ شبیه‌سازی و نتایج

در این بخش مسئله بهینه‌سازی HRES را که مدل‌سازی آن در بخش پیش انجام شد، حل خواهیم کرد. نخست مقادیر و ضرایب ثابت که در محاسبه تابع هزینه کل نقش دارند را مطابق جدول ۱ بیان می‌کنیم. ضرایب هزینه‌ای c_1 تا c_5 به دلار هستند.

جدول ۱- مقادیر ضرایب هزینه‌ای.

Table 1. The values of cost coefficients.

Coefficient	Value	Coefficient	Value
c_1	800	c_5	30
c_2	1500	c_6	0.4531
c_3	600	DR	0.06
c_4	20	PL	10 years

جدول ۲ نیز مقادیر پارامترهای فنی مربوط به پنل خورشیدی، توربین باد و باتری را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مقادیر پارامترهای فنی.

Table 2. The values of technical parameters.

Parameter	Value	Parameter	Value
η_{PV}	0.18	PV_{max}	10
η_{Wind}	0.35	$Wind_{min}$	0
η_{ch}	0.9	$Wind_{max}$	20
η_{dis}	0.9	$Batt_{min}$	10
PR	0.9	$Batt_{max}$	100
PV_{min}	0	w	0.2551

این مسئله با چهار روش فراابتکاری WOA، GA، PGS و MFO روی یک رایانه یکسان و با شرایط مشابه حل شده است. تعداد تکرار برای همه روش‌ها ۱۰۰ تکرار و تعداد عوامل جستجو، ۵۰ عدد در نظر گرفته شده است.

از اطلاعات دیزباد بالا که شکل‌های ۱ و ۲ بیان شده برای پروفایل باد و خورشید استفاده شده و یک بار فرضی نیز به‌عنوان مصرف کننده منظور شده است. جزئیات این داده نیز در جدول ۳ مشخص شده است. سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، تشعشع خورشید بر حسب وات بر متر

به‌طوری که بار مورد نیاز نیز تامین شود. برای حل این مسئله استفاده از روش‌های بهینه‌سازی فراابتکاری که نیاز به محاسبه مشتق تابع هدف ندارند، پیشنهاد شد. در نهایت مسئله برای داده واقعی از منطقه‌ای در استان خراسان رضوی با چهار روش بهینه‌سازی PSO، GA، WOA و MFO حل شد. هر چهار روش با دقت مناسبی نتایج نزدیک به هم ارائه دادند. بر اساس نتایج استفاده از بهینه‌سازی در مسئله طراحی HRES می‌تواند تا ۱۲/۷ درصد هزینه سالیانه را کاهش دهد. بنابراین استفاده از رویکردهای بهینه می‌تواند باعث کاهش هزینه‌های نصب، راه‌اندازی و نگهداری سیستم‌های HRES شود و به توسعه پایدار آن‌ها کمک کند.

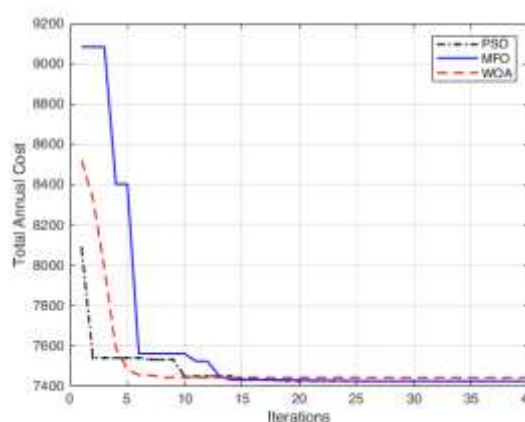
تعارض منافع

هیچ‌گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است

مراجع

- [1] M. Amer, A. Namaane, and N. M'sirdi, "Optimization of hybrid renewable energy systems (HRES) using PSO for cost reduction," *Energy Procedia*, vol. 42, pp. 318-327, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2013.11.032>.
- [2] K. M. K. C. Bismark, L. G. C. Caballa, C. M. F. Yap, R. A. S. Peña, R. C. Parocha, and E. Q. B. Macabebe, "Optimization of a hybrid renewable energy system for a rural community using PSO," in *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, vol. 1199, no. 1, 2023, Paper 012034, <https://doi.org/10.1088/1755-1315/1199/1/012034>.
- [3] M. Sharafi and T. Y. ElMekkawy, "Stochastic optimization of hybrid renewable energy systems," in *International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, Boston, Massachusetts, USA, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.08.010>.
- [4] M. Korpeh, A. Lotfollahi, S. N. Faraji, A. Gharehghani, and S. Ahmadi, "Machine learning-assisted optimization of a novel hybrid solar-geothermal system supported by proton exchange membrane fuel cell for sustainable and continuous energy supply," *Renewable Energy*, vol. 247, 2025, Art. no. 123034, <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123034>.
- [5] S. de la Torre, J. M. González-González, J. A. Aguado, and S. Martín, "Optimal battery sizing considering degradation for renewable energy integration," *IET Renewable Power Generation*, vol. 13, no. 4, pp. 572-577, 2019, <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5489>.
- [6] K. H. Chang and G. Lin, "Optimal design of hybrid renewable energy systems using simulation optimization," *Simulation Modelling Practice and*

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، کمترین مقدار تابع هدف با روش PSO و پس از آن با روش MFO به‌دست آمده است. البته پاسخ سایر روش‌ها به پاسخ PSO نزدیک است. لذا با یک سیستم خورشیدی به مساحت تقریبی ۲۲ متر مربع، یک توربین باد با قطر روتور ۲/۸ الی ۳ متر و باتری با ظرفیت ۱۴/۷ کیلووات ساعت می‌توان به هزینه بهینه ۷۴۲۶ دلار رسید و در عین حال بار مورد نیاز را هم با این مجموعه تامین کرد. برای مقایسه نرخ همگرایی این روش‌ها، نمودار مقدار تابع هدف یا همان هزینه سالیانه را بر حسب شماره تکرار در شکل ۳ رسم کرده‌ایم. در واقع این مقدار بهترین مقدار به‌دست آمده تا تکرار مورد نظر است.



شکل ۴- مقایسه همگرایی سه روش PSO، WOA و MFO.

Fig. 4. The convergence comparison of PSO, WOA, and MFO methods.

همان‌طور که ملاحظه می‌شود، در شروع، پاسخ به دست آمده توسط MFO و سپس WOA بیشتر بوده است و بهترین شروع را روش PSO نشان داده که از حدود ۸۵۰۰ دلار شروع شده است. در ادامه از تکرار ۵ تا ۱۰ بهترین کاهش را روش WOA داشته و نمودار هزینه آن زیر دو نمودار دیگر است و در نهایت در تکرار دهم، روش PSO به آن رسیده است. در ادامه نیز همگرایی بعد از تکرار پانزدهم برای سه روش مشخص است و مقدار هزینه روش WOA اندکی بیشتر از روش دیگر بوده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، استفاده از بهینه‌سازی می‌تواند هزینه را از پاسخ‌هایی در سطح ۸۵۰۰ دلار تا سطح ۷۴۲۵ دلار کاهش دهد که به معنای ۱۰۸۰ دلار یا ۱۲/۷ درصد صرفه‌جویی در هزینه است نسبت به زمانی که از بهینه‌سازی استفاده نکنیم.

۳. نتیجه‌گیری

مسئله طراحی بهینه یک سیستم انرژی تجدیدپذیر ترکیبی به‌صورت ریاضی مدل‌سازی شد. هدف کمینه‌سازی هزینه کل سالیانه با انتخاب مناسب ابعاد توربین باد، پنل‌های خورشیدی و ظرفیت باتری است

- [13] H. Hashemi Mehne, H. Jafari, and A. Shams Taleghani, "A hybrid method for optimal arrangement of turbine blades," *Engineering Optimization*, vol. 57, no. 12, pp. 3610-3630, 2025, <https://doi.org/10.1080/0305215X.2024.2448199>.
- [14] S. H. Hashemi Mehne and S. Mirjalili, "A direct method for solving calculus of variations problems using the whale optimization algorithm," *Evolutionary Intelligence*, vol. 12, no. 4, pp. 677-688, 2019, <https://doi.org/10.1007/s12065-019-00275-w>.
- [15] I. Shafieenejad, "Maximizing the velocity deflection of asteroid Didymos using the Whale optimization algorithm," *Planetary and Space Science*, vol. 258, 2025, Art. no. 106075, <https://doi.org/10.1016/j.pss.2025.106075>.
- [16] I. Shafieenejad, "Design of swarm guidance for aerial spherical robots with social intelligence inspired by grasshopper' optimal motion and fuzzy logic," *Aerospace Knowledge and Technology Journal*, vol. 14, no. 1, pp. 193-216, 2025, (in Persian).
- [17] M. Shehab, L. Abualigah, H. Al Hamad, H. Alabool, M. Alshinwan, and A. M. Khasawneh, "Moth-flame optimization algorithm: variants and applications," *Neural Computing and Applications*, vol. 32, no. 14, pp. 9859-9884, 2020, <https://doi.org/10.1007/s00521-019-04570-6>.
- Theory*, vol. 52, pp. 40-51, 2015, <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2014.12.002>.
- [7] A. Giedraityte, S. Rimkevicius, M. Marciukaitis, V. Radziukynas, and R. Bakas, "Hybrid renewable energy systems—A review of optimization approaches and future challenges," *Applied Sciences*, vol. 15, no. 4, 2025, Art. no. 1744, <https://doi.org/10.3390/app15041744>.
- [8] S. Bahramara, M. P. Moghaddam, and M. Haghifam, "Optimal planning of hybrid renewable energy systems using HOMER: A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 62, pp. 609-620, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.05.039>.
- [9] D. Wood, *Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application*. London: Springer, 2011.
- [10] T. Khatib and W. Elmenreich, *Modeling of Photovoltaic Systems Using MATLAB: Simplified Green Codes*. John Wiley & Sons, Inc. 2016.
- [11] G. Papazoglou and P. Biskas, "Review and comparison of genetic algorithm and particle swarm optimization in the optimal power flow problem," *Energies*, vol. 16, no. 3, 2023, Art. no. 1152, <https://doi.org/10.3390/en16031152>.
- [12] T. M. Shami, A. A. El-Saleh, M. Alswaitti, Q. Al-Tashi, M. A. Summakieh, and S. Mirjalili, "Particle swarm optimization: A comprehensive survey," *IEEE Access*, vol. 10, pp. 10031-10061, 2022, <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3142859>.