

## کاربرد الگوریتم ژنتیک در بهینه‌یابی اقتصادی سیستم هیبریدی به منظور برق‌رسانی به مناطق دور افتاده در ایران<sup>۱</sup>

علی‌مراد شریفی

دانشیار دانشکده‌ی اقتصاد دانشگاه اصفهان، asharifi@istt.org

غلامحسین کیانی

استادیار دانشکده‌ی اقتصاد دانشگاه اصفهان، gh.kiani@ase.ui.ac.ir

رحمان خوش اخلاق

استاد دانشکده‌ی اقتصاد دانشگاه اصفهان، rahmankh44@yahoo.com

محمد رضا رضایی\*

دانشجوی کارشناسی ارشد علوم اقتصادی دانشگاه اصفهان، mrrezaee891@gmail.com

تاریخ دریافت: ۹۱/۱۰/۲۵ تاریخ پذیرش: ۹۲/۱۱/۲۷

### چکیده

در آستانه‌ی هزاره‌ی سوم میلادی، تحولات بنیادی در بسیاری از کشورهای توسعه یافته یا در حال توسعه به لحاظ صنعتی و اقتصادی به وقوع پیوسته است. با توجه به چشم انداز پیش روی این جوامع از دیدگاه اقتصادی، یکی از مهم‌ترین مسئله‌هایی که ذهن تمامی مسئولان این کشورها را به خود مشغول کرده، مسئله تأمین انرژی است. در این میان بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی و به‌کارگیری انرژی‌های نو به‌عنوان جایگزینی برای انرژی‌های فسیلی امری مهم به نظر می‌رسد. در این مطالعه با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک، ترکیب بهینه‌ی سیستم هیبریدی شامل انرژی‌های (باد / خورشید / دیزل / باتری) در شهرستان خور و بیابانک تعیین شده است. نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد برای حداقل شدن هزینه‌ها برای به‌کارگیری سیستم هیبریدی، با توجه به پتانسیل بالای تابشی باید تنها از سیستم هیبریدی شامل فتوولتائیک و باتری استفاده کرد.

طبقه‌بندی JEL: C61 ، L94 ، C02

کلید واژه: الگوریتم ژنتیک، انرژی باد، انرژی خورشید، سیستم هیبریدی، بهینه‌یابی

---

۱- این مقاله حاصل پژوهش‌های مرتبط با پایان‌نامه کاشناسی ارشد نویسنده مسئول (محمدرضایابی) در دانشگاه اصفهان است. نویسندگان به ترتیب استاد راهنما و مشاور در این پژوهش بوده‌اند.

\*- نویسنده‌ی مسئول

## ۱- مقدمه

تا پایان قرن بیست و یکم، اگر اوضاع بر همین منوال کنونی باشد، جمعیت جهان دو برابر شده و ثروت آن هشت تا شانزده برابر خواهد و تقاضای انرژی جهانی با وجود بهبود در بازدهی انرژی به دو تا چهار برابر خواهد رسید، این تقاضای عظیم انرژی چگونه به صورت پاک، ایمن و پایدار تأمین خواهد شد؟ حتی با سطح مصرف انرژی کنونی، سامانه‌های انرژی کنونی، عوارض زیانباری روی سلامتی انسان‌ها و محیط زیست دارد. منابع انرژی‌های نو اساساً بدون کربن بوده و پایدارتر از انرژی‌های فسیلی هستند، بنابراین از آن جا که از لوازم توسعه‌ی پایدار تأمین منابع قابل اتکای انرژی و تأمین فضای زندگی سالم برای آحاد جامعه است، توجه به انرژی‌های نو از جمله انرژی خورشیدی از گام‌های مورد نیاز جهت نیل به توسعه پایدار به شمار می‌رود. در حال حاضر انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۱</sup> کم‌تر از یک درصد از کل مصرف کشور را تأمین می‌کنند، طبق مطالعات انجام شده به این نتیجه رسیده‌اند که برای کاهش هزینه‌های جانبی باید سهم این انرژی‌ها در سال‌های آینده افزایش چشمگیری داشته باشد. اگرچه هنوز تمام فناوری‌های آن تکامل و توسعه نیافته و قیمت برخی از آن‌ها هنوز بالا است (بوئل<sup>۲</sup>، ۱۳۸۷).

در میان کشورهای در حال توسعه، ایران به‌عنوان کشوری که قسمت عمده‌ای از انرژی الکتریکی تولیدی خود را از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌کند؛ و مناطق دور افتاده و دور از شبکه‌ی زیادی در آن وجود دارد، نیاز روز افزونی به توجه انرژی‌های نو را طلب می‌کند، چرا که تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز خانوارها، چاه‌های آب کشاورزی و معادن صنعتی در مناطق دور افتاده که گسترش شبکه‌ی انتقال و توزیع نیرو به آن مستلزم صرف هزینه‌های هنگفت می‌باشد که یکی از مسائل عمده در صنعت برق کشورهای در حال توسعه به ویژه ایران است. در حال حاضر انرژی الکتریکی در مناطق دور افتاده ایران به ویژه مناطق مرکزی آن به‌طور عمده از طریق نیروگاه‌های دیزلی تأمین می‌شود که دارای هزینه‌های عملیاتی قابل توجهی می‌باشد و علاوه بر این که قیمت تمام شده انرژی الکتریکی را گران می‌سازد آلودگی صوتی و مشکلات زیست محیطی از پیامدهای آن است. همگی این هزینه‌ها هزینه‌های جانبی تولید انرژی هستند.

براساس پیش‌بینی‌های انجام شده تقاضای بار الکتریکی طی سال‌های آینده در مناطق مرکزی ایران افزایش خواهد یافت؛ این مسئله نیاز به سرمایه‌گذاری‌های جدید

1- Renewable Enrgy

2- Boyle Godfrey

برای افزایش ظرفیت تولیدی و هم‌چنین جایگزینی نیروگاه‌های با سوخت فسیلی را امری اجتناب‌ناپذیر ساخته است. با توجه به این‌که ایران در منطقه‌ای قرار گرفته که میزان انرژی قابل استحصال از منبع انرژی خورشیدی و باد اقتصادی بوده و از سوی دیگر یکی از اهداف اساسی توسعه‌ی بخش کشاورزی و برنامه‌ریزی‌های کلان انرژی استفاده از انرژی‌های نو در ایران می‌باشد، استفاده از این منابع برای جایگزینی با سوخت‌های فسیلی ضروری به نظر می‌رسد. برای عملیاتی کردن و به‌کارگیری انرژی‌های نو با توجه به میزان نیاز به مقدار انرژی مورد نیاز هر واحد طراحی اقتصادی آن‌ها بیش از پیش لازم به نظر می‌رسد؛ چرا که با این کار هزینه‌ی اجرای چنین کاری به حداقل می‌رسد. بنابر این در این پژوهش تلاش می‌شود با در نظر گرفتن شرایط مختلف مانند نرخ تنزیل اجتماعی<sup>۱</sup> و هم‌چنین هزینه‌ی تمام شده‌ی آن اقتصادی‌ترین شیوه به‌کارگیری آن محاسبه شود. در حقیقت این پژوهش به دنبال بهینه‌یابی اقتصادی سیستم مورد نظر به منظور تأمین برق مورد نیاز مناطق دور افتاده در منطقه‌ی مرکزی ایران می‌باشد تا به این روش هزینه به‌کارگیری این سیستم‌ها به حداقل برسد و استفاده از آن‌ها مبنای اقتصادی بیش‌تری پیدا کند.

در ادامه مطالب ابتدا پیشینه‌ی پژوهش و مطالعات انجام شده ذکر شده و در پی آن مبانی نظری پژوهش تبیین خواهد شد پس از بیان مبانی نظری نحوه‌ی کاربرد الگوریتم ژنتیک در این مطالعه بیان می‌شود پس از آن نیز آمار و اطلاعات و محاسبات انجام شده و در انتها نتایج حاصل از پژوهش ذکر می‌شود.

## ۲- پیشینه‌ی پژوهش

با توجه به اهمیت روز افزون انرژی‌های تجدیدپذیر پاک مانند انرژی‌های خورشیدی و بادی و اختلاف نظرهای موجود در مورد اقتصادی بودن استفاده از آن‌ها، صاحب‌نظران و کارشناسان مطالعات زیادی در این زمینه انجام داده‌اند که نتایج جالب توجهی داشته‌اند. در این رابطه‌ی مطالعات زیر به‌عنوان نمونه قابل ذکر است.

اکران و اکران<sup>۲</sup> (۲۰۱۰)، در مطالعه‌ای با کاربرد روش بهینه‌سازی (SA<sup>۳</sup>) سیستم یکپارچه ترکیبی PV<sup>۴</sup> / باد با در نظر گرفتن ذخیره‌سازی در باتری پرداخته‌اند، آن‌ها در این پژوهش با یک روش بهینه‌سازی پیشنهادی جدید که جستجو در شیب تصادفی

1- Social Discount Rate

2- Ekren & Ekren

3- Simulated Annealing (SA)

4- Wind/Photovoltaic

است به بهینه‌ی یابی کلی پرداخته‌اند. در این مطالعه هدف آن‌ها به حداقل رساندن تابع هزینه‌ی کل سیستم بوده است، آن‌ها در این مطالعه بر اساس متغیرهای محیطی تأثیرگذار برای تولید برق در سیستم ترکیبی را در کنار اطلاعات هزینه‌ای به‌کار برده‌اند تا به هدف تعیین شده برسند در نهایت نتیجه‌گیری مهم آن‌ها در این مطالعه داشتن قابلیت رقابت سیستم‌های ترکیبی تجدید پذیر با سیستم‌های به‌طور عمده فسیلی رایج بوده است. بالا و آذم سیددیکو<sup>۱</sup> (۲۰۰۹)، در مطالعه‌ای با کاربرد الگوریتم ژنتیک به بهینه‌یابی اقتصادی استفاده از سیستم ترکیبی پرداخته‌اند. آن‌ها با استفاده از اطلاعات بار و شرایط محیطی و شرایط محیطی تابش بهینه‌یابی را به انجام رسانده‌اند. از نظر هزینه‌ای هم عمده، سهم سرمایه‌گذاری برای پنل خورشیدی و باتری بوده است. رازاکو همکاران<sup>۲</sup> (۲۰۰۷)، در مطالعه‌ای با بهینه‌یابی سیستم هیبریدی، برای دسترسی ارزان قیمت، قابل اعتماد و مقرون به صرفه انرژی‌های جایگزین (انرژی‌های تجدیدپذیر) برای کاهش استفاده از دیزل ژنراتورها، به‌دلیل هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه‌ی بالا، نیاز اساسی به ترکیب بهینه آن‌ها برای بهره‌برداری مقرون به صرفه از آن‌ها به صورتی که هزینه‌ها در طول عمر استفاده از آن‌ها حداقل شود وجود دارد. نلسون و همکاران<sup>۳</sup> (۲۰۰۵)، در مطالعه‌ای به ارزیابی اقتصادی سیستم هیبریدی برای منطقه‌ای واقع در شمال اقیانوس آرام پرداخته‌اند. تجزیه و تحلیل به‌دست آمده نشان داده است که سیستم‌های ترکیبی تجدیدپذیر قابلیت رقابت با سیستم‌های تولید برق سنتی را دارا می‌باشند.

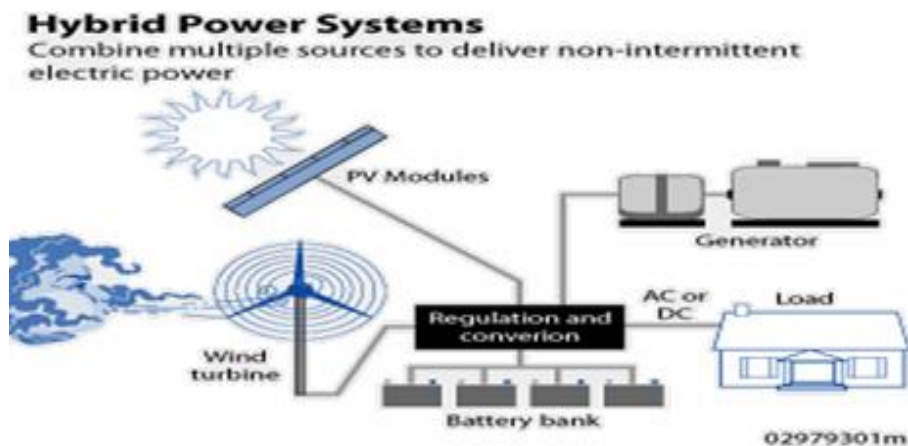
حسینی و کاظمی کارگر (۱۳۹۰)، مطالعه‌ای به منظور بهینه‌یابی نیروگاه ترکیبی فتوولتائیک و باد انجام و با توجه به اطلاعات فنی بهترین ترکیب بهینه‌ی تأمین انرژی منطقه‌ی اشتهارد را پیشنهاد داده‌اند. شریفی و همکاران (۱۳۸۴)، در مطالعه‌ای به ارزیابی اقتصادی استفاده از نیروگاه خورشیدی پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که نیروگاه فتوولتائیک با وجود هزینه‌های بالای سرمایه‌گذاری اولیه، به دلیل عدم نیاز به هزینه‌های جاری در طول عمر مفید آن نسبت به نیروگاه دیزلی مزیت اقتصادی دارد. در نهایت همان‌طور که اشاره شد هدف از این پژوهش تعیین ترکیب بهینه‌ی سیستم هیبریدی (پنل خورشیدی، توربین بادی، باتری، دیزل) می‌باشد. شکل شماتیک این سیستم به صورت زیر خواهد بود. کهربائیان و هرسینی (۱۳۸۲)، در مطالعه‌ای بررسی امکان استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک برای تأمین برق در مناطق دور از شبکه،

1- Bala & Siddique

2- Razak et al

3- Nelson et al

استفاده از شبکه‌ی برق و سیستم‌های متداول را برای این نقاط غیر اقتصادی دانسته و استفاده از سیستم‌های فتوولتائیک و انرژی باد و یا ترکیبی از آن‌ها را به همراه نیروگاه دیزلی به‌عنوان جایگزین معرفی کرده‌اند. شریفی و همکاران (۱۳۸۰)، در پژوهشی با استفاده از روش تحلیل هزینه‌ی عمر به این نتیجه رسیده‌اند که با توجه به پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در منطقه‌ی خور و بیابانک، امکان بهره‌برداری از نیروگاه خورشیدی وجود دارد. همان‌طور که مشاهده شد تقریباً در هیچ‌کدام از پژوهش‌های داخلی انجام گرفته به بررسی سیستم‌های ترکیبی انرژی‌های نو پرداخته نشده است و در آن‌ها سیستم‌های انرژی تنها ارزیابی اقتصادی شده‌اند و بحث استفاده‌ی کاربردی از آن‌ها نادیده گرفته شده است هم‌چنین در هیچ‌کدام از مطالعات داخلی از روش‌های بهینه‌یابی جدید استفاده نشده و پتانسیل‌های طبیعی منطقه‌ی مورد بررسی نیز در کنار اطلاعات اقتصادی استفاده به‌کار نرفته است، بنابراین با توجه به نیاز به توسعه‌ی این مطالعات و استفاده از روش‌های جدید در انجام مطالعات بعدی در این پژوهش از شیوه‌ی نو برای بهینه‌یابی استفاده کرده که در آن علاوه بر دقت انجام پژوهش سعی کرده از اطلاعات محیطی در کنار اطلاعات اقتصادی برای دست‌یابی به نتیجه‌ی مطلوب به‌کار رفته است. که علاوه بر داشتن مزیت‌های مطالعات قبلی، کاملاً کاربردی بوده و قابلیت استفاده در مناطق مختلف را داشته باشد.



### ۳- مبانی نظری

چارچوب اساسی برای مدل‌های طراحی بهینه سیستم‌های تولید انرژی به‌طور عمده متکی به روشی می‌باشد که چرخه‌ی عمر نامیده می‌شود. در این روش هدف به حداقل رساندن هزینه‌های کل چرخه‌ی عمر می‌باشد. بدین منظور هزینه‌های جاری در طول

دوره را با هزینه‌های اولیه معادل سازی می‌کنند تا تأثیرات نرخ تورم، نرخ بهره در طول عمر پروژه بر هزینه‌های سیستم در نظر گرفته شود. در روش تحلیل هزینه‌ی چرخه‌ی عمر<sup>۱</sup> ابتدا هزینه‌های جاری یا بهره برداری و نگهداری سالانه و پخش هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه در کل سال‌های بهره‌برداری از سیستم، هزینه‌ی سالانه‌ی کل به‌دست می‌آید. در این جا برای بهینه‌سازی سیستم از هر دو تابع هزینه<sup>۲</sup> سالانه و توابع تولید استفاده می‌شود هزینه‌های کل سالانه تابع هدف<sup>۳</sup> است و توابع تولید واحدها را به‌عنوان قید (شامل تابع تولید توان پنل خورشیدی و بادی به‌عنوان قید اولیه، نحوه‌ی مدیریت بار و پاسخ گویی به بار مورد تقاضا با استفاده از نحوه‌ی کار باتری و نحوه‌ی وارد شدن مولد دیزلی در مواقع ضروری برای تأمین تمام بار مورد تقاضا به‌عنوان قید بعد از توابع تولید هستند که با ترکیب آن‌ها قیدهای الگو تعیین می‌شود) و نیز میزان تقاضا در اوج بار و غیر بار نیز از دیگر محدودیت‌ها هستند. در ادامه ابتدا تابع هدف و اجزای آن توضیح داده شده و سپس توابع تولید بیان می‌شود و در نهایت نحوه‌ی حل مسئله بیان می‌شود. مسئله پژوهش به طور خلاصه به شکل زیر خواهد بود:

$$\min ACS = ACC + AFC + ARC + AOM \quad (1)$$

$$s. t: P_{PV} + P_{WT} + P_{DG} \geq P_L$$

در این مدل  $ACC$ <sup>۴</sup> هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم،  $AFC$ <sup>۵</sup> هزینه‌ی ثابت سالیانه‌ی ژنراتور دیزلی،  $ARC$ <sup>۶</sup> هزینه‌ی جایگزینی سیستم،  $AOM$ <sup>۷</sup> هزینه‌ی متوسط سالیانه‌ی تعمیر و نگهداری  $P_{PV}$  توان تولیدی پنل خورشیدی،  $P_{WT}$  توان تولیدی توربین بادی و  $P_{DG}$ <sup>۸</sup> توان تولیدی ژنراتور دیزلی می‌باشد.

هم‌چنین در این مدل علت یکسان بودن ضرایب واحدهای تولید کننده‌ی انرژی لزوم تأمین بار و حداقل شدن هزینه‌ها است، چرا که هر کدام از واحدهای تولیدی شرایط خاص خود را داشته و ممکن است با هم وارد مدار نشوند یا در نهایت با توجه به پتانسیل‌های طبیعی منطقه‌ی مورد مطالعه نیازی به نصب برخی از آن‌ها نباشد، بنابراین هر ترکیبی از اجزای که توانایی حداقل کردن هزینه‌ها و تأمین بار مورد نیاز را داشته باشد. در مدار می‌ماند که جواب نهایی این ترکیب را نیز مشخص می‌کند.

- 
- 1- Life Cycle Cost Analysis
  - 2- Cost Function
  - 3- Objective Function
  - 4- Annual Capital Cost
  - 5- Annual Fuel Cost
  - 6- Annual Replacement Cost
  - 7- Annual Operation and Maintenance
  - 8- Diesel Generator

تابع هدف هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم است که شامل ارزش حال هزینه‌ی سرمایه‌گذاری در همه‌ی طول عمر مفید سیستم از زمان نصب است. برای این محاسبات، طول عمر همه‌ی اجزا به صورت یکسان در نظر گرفته می‌شود، به جز باتری که در طول عمر خود نیاز به تعویض و جایگزینی دارد.

هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌ی خرید پانل خورشیدی، توربین بادی، باتری‌ها و مبدل انرژی؛ هزینه‌ی جایگزینی واحدها در طول عمر مفید سیستم؛ هزینه‌ی عملیات و نگهداری از ژنراتور دیزلی و واحدهای سیستم در طول عمر مفید آن و هزینه‌ی مصرف سوخت ژنراتور دیزلی در تمام طول عمر مفید سیستم می‌باشد.

**معادل یکنواخت سالانه هزینه‌های سیستم (ACS<sup>1</sup>):** یکنواخت سازی بر پایه‌ی مفهوم هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم انجام می‌گیرد. که در این مطالعه شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم (ACC)، هزینه‌ی جایگزینی سیستم (ARC)، هزینه‌ی ثابت سالیانه‌ی ژنراتور دیزلی (AFC) و هزینه‌ی متوسط سالیانه‌ی تعمیر و نگهداری (AOM) است. هزینه‌ی اجزای در نظر گرفته شده در سیستم را می‌توان با معادله‌ی زیر بیان کرد.

$$ACS = ACC + AFC + ARC + AOM \quad (2)$$

- **معادل یکنواخت سالانه هزینه‌ی سرمایه‌گذاری:** هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالانه‌ی هر یک از واحدها که در طول عمر پروژه نیاز به جایگزینی ندارند مانند پانل‌های خورشیدی و مبدل و توربین بادی را از معادله‌ی زیر می‌توان به دست آورد.

$$ACC_i = C_{cap} * CRF(i, Y_{project}) \quad (3)$$

که  $C_{cap}$  سرمایه‌ی مورد نیاز اولیه،  $Y_{project}$  طول عمر پروژه برحسب سال و  $CRF$  ضریب بازگشت سرمایه است.

$$CRF = \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad \text{و} \quad i = \frac{r-p}{1+p} \quad (4)$$

و  $i$  نرخ بهره‌ی واقعی،  $r$  نرخ بهره‌ی جاری و  $p$  نرخ تورم سالانه را نشان می‌دهد.

**معادل یکنواخت سالانه هزینه‌ی تعمیر و نگهداری:** هزینه‌ی نگهداری سالانه، هزینه‌ای است که برای نگهداری واحدها در طول عمر مفید سیستم انجام می‌گیرد. که به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$AOM = \frac{AOM(1) * (1+p)^{Y_{project}}}{Y_{project}} \quad (5)$$

**معادل یکنواخت سالانه هزینه‌ی جایگزینی:** هزینه‌ی جایگزینی سالانه، هزینه‌ی جایگزینی واحدهای سیستم در طول عمر مفید آن است. در این مطالعه، واحدهایی که

نیاز به جایگزینی دارند باتری‌ها هستند. دیگر واحدها در طول عمر پروژه نیاز به جایگزینی ندارند.

از نظر اقتصادی ARC را می‌توان با معادله‌ی زیر محاسبه کرد.

$$ARC_i = C_{rep} * SFF_i(i, Y_{rep}) \quad (۶)$$

$C_{rep}$  هزینه‌ی جایگزینی واحدها،  $Y_{rep}$  طول عمر واحدها بر حسب سال و  $SFF$  فاکتور استهلاک کردن سرمایه‌گذاری انجام شده، به شرطی که در پایان عمر مفید ارزش اسقاط آن صفر باشد، است.

$$SFF = \frac{i}{(1+i)^n - 1} \quad (۷)$$

(ارون و همکاران<sup>۱</sup>، ۲۰۰۸).

**هزینه‌ی تمام شده سالانه سوخت ژنراتور دیزلی:** مصرف سوخت سالانه‌ی ژنراتور دیزلی بر حسب مصرف سوخت ساعتی آن در طول سال محاسبه می‌شود، بنابراین فرض می‌شود که کل هزینه‌ی سالانه‌ی آن (AFC) تابعی از ضریب بازگشت سرمایه طی طول عمر مفید باشد توسط معادله‌ی زیر به دست می‌آید:

$$AFC = T_{FC} * CRF(i, Y_{project}) \quad (۸)$$

که  $T_{FC}$  کل مصرف سوخت در طول عمر مفید پروژه می‌باشد. (اسکرستین و اولهن<sup>۲</sup>،

۱۹۸۹)

### تبیین قیده‌های الگو

پس از معرفی و تبیین تابع هدف، قیده‌های الگو که به‌طور عمده توابع تولید سیستم هیبریدی شامل توابع تولید توان توربین بادی و پنل خورشیدی و ترکیب آن‌ها با نحوه‌ی مدیریت بار و پاسخ‌گویی به آن با استفاده از باتری‌ها و مولد دیزلی هستند، معرفی و تبیین می‌شوند. در ابتدا توابع تولید معرفی شده و پس از آن نحوه‌ی عملکرد باتری‌ها و مولد دیزلی برای پاسخ‌گویی به بار مورد تقاضا تبیین می‌شود. در قسمت پایانی این قسمت نیز نحوه‌ی ترکیب توابع تولید با استفاده از توان تولیدی خود و باتری‌ها به منظور پاسخ‌گویی به بار مورد نیاز تحت عنوان عملکرد عمومی سیستم هیبریدی بیان می‌شود.

**مدل تولید توان فتوولتائیک:** توان انرژی خروجی پانل خورشیدی به‌شرایط تابش و در معرض تابش بودن آن بستگی دارد، از این رو انتخاب یک مدل مناسب برای

1- Arun et al

2- Skrarstein & Ulhen



شبیه‌سازی بسیار ضروری می‌باشد. مدل ساده شده‌ی پانل خورشیدی که تابعی از شرایط تابش منطقه در نظر گرفته شده است به صورت زیر بیان می‌شود:

$$P_{PV}(t) = \eta * A_{PV} * N_{PV} * E(t) \quad (9)$$

که در آن  $\eta$  ضریب کارایی انرژی،  $A_p$  مساحت پانل خورشیدی برحسب  $m^2$ ،  $N_{pv}$  تعداد پانل‌های خورشیدی و  $E(t)$  توان خروجی  $w/m^2$  می‌باشد.

**قدرت عملی توربین بادی:** قدرت عملی توربین بادی از فرمول زیر محاسبه

می‌شود:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v(t) < v_c \\ \frac{1}{2} \rho A v^3(t) \beta \eta_w \eta_c N_{WT} & v_c \leq v(t) < v_r \\ P_{rated} N_{WT} & v_r \leq v(t) \leq v_f \\ 0 & v(t) > v_f \end{cases} \quad (10)$$

$\rho$  دانسیته‌ی هوا،  $(kg/m^3)$ ، سطح تحت جاروب  $(m^2)$ ،  $v(t)$  سرعت باد  $(m/s)$ ،  $\eta_w$  ضریب کارایی توربین  $(\%)$ ،  $\eta_c$  ضریب کارایی تبدیل AC/DC،  $v_c$  سرعت منطقه‌ای باد،  $v_r$   $(m/s)$ ، سرعت جاروب،  $v_f$   $(m/s)$ ، سرعت گردش باد،  $P_{rated}$  توان تولید توربین بادی،  $N_{WT}$   $(kW)$ ، تعداد توربین‌های بادی است.

**باتری‌های قابل شارژ:** مکانیسم شارژ و دشارژ باتری‌ها بستگی به قدرت عمومی

سیستم هیبریدی دارد. در همین حال انرژی تولیدی توسط سیستم هیبریدی در زمان  $t$  را می‌توان از رابطه‌ی زیر به دست آورد؛

$$P_G(t) = P_{WT}(t) + P_{PV}(t) + P_{DG}(t) \quad (11)$$

با توجه به انرژی متناوب از پانل خورشیدی و توربین‌های بادی، ذخیره‌ی باتری‌ها در زمانی که آن‌ها قادر به تأمین بار مورد نیاز نیستند مورد استفاده قرار می‌گیرند. در هر ساعت تغییر شارژ باتری  $(C_t)$  و تغییرات شارژ مربوط به دوره‌ی گذشته  $(C_{t-1})$  است. تولید انرژی مصرف انرژی در طول زمان از  $t$  تا  $t-1$  است. دو شرط در نظر گرفته شده برای ذخیره‌ی انرژی در زمان  $t$  است. طی فرایند شارژ، اگر کل خروجی سیستم بیش‌تر از بار مورد نیاز در زمان  $t$  باشد، توسط معادله‌ی زیر در اختیار باتری قرار می‌گیرد.

$$C_B(t) = C_B(t-1) + (P_G(t) - P_L(t)) \quad (12)$$

هنگامی تقاضای بار بیش از قدرت موجود باشد، این تقاضای اضافی را پوشش می‌دهد، بنابراین ظرفیت در دسترس باتری‌ها در زمان  $t$  می‌تواند با معادله‌ی زیر محاسبه شود.

$$C_B(t) = C_B(t-1) - (P_G(t) - P_L(t)) \quad (13)$$

که در آن  $C_B(t)$  ظرفیت در دسترس باتری و  $C_B(t-1)$  ظرفیت موجود دوره‌ی قبل است. محدودیت‌هایی که در عملیات باتری‌ها وجود دارد عبارتند از ارزش  $C_B(t)$  نمی‌تواند کم‌تر از حداقل بار مورد نیاز باشد، هم‌چنین نمی‌تواند از حداکثر بار مورد نیاز نیز بیش‌تر باشد.

$$C_{B_{\min}} \leq C_B(t) \leq C_{B_{\max}} \quad (۱۴)$$

- **ژنراتور دیزلی:** تأمین کل بار مورد تقاضا توسط ژنراتور دیزلی در حالی که می‌توان آن را به وسیله‌ی پانل خورشیدی، توربین بادی و ذخیره باتری تهیه کرد شکست خورده است. معادله‌ی محاسبه‌ی هزینه‌ی ثابت ژنراتور دیزلی به صورت زیر است:

$$T_{FC} = C_{\text{سوخت}} * y_{\text{طول عمر پروژه}} * \sum_{t=1}^{8760} f(t) \quad (۱۵)$$

$f(t)$  مصرف سوخت در هر ساعت است (ساعت/لیتر)، که بر اساس مشخصات ژنراتور به شکل زیر به دست می‌آید.

$$f(t) = (0.246 * p_{\text{مولد دیزل}}(t) + 0.08415 * p_{\text{توان مولد}}) \quad (۱۶)$$

که  $P_R$  توان ژنراتور دیزلی،  $P_{DG}(t)$  توان تولید شده توسط ژنراتور دیزلی (kW) و  $C_f$  قیمت هر لیتر سوخت مصرفی است.

از معادله‌ی فوق ظرفیت اسمی و توانایی تولید انرژی در حداکثر مصرف است، بنابراین ژنراتور دیزلی نمی‌تواند با تنظیمات حداقل کار کند. معمولاً سازندگان آن‌ها پیشنهاد حداقلی و حداکثری را مطرح می‌کنند.

$$P_{DG_{\min}} \leq P_{DG}(t) \leq P_{DG_{\max}} \quad (۱۷)$$

(سوریوتموجو، ۲۰۱۰).

**عملکرد عمومی سیستم:** عملکرد عمومی سیستم هیبریدی را می‌توان به صورت زیر توضیح داد.

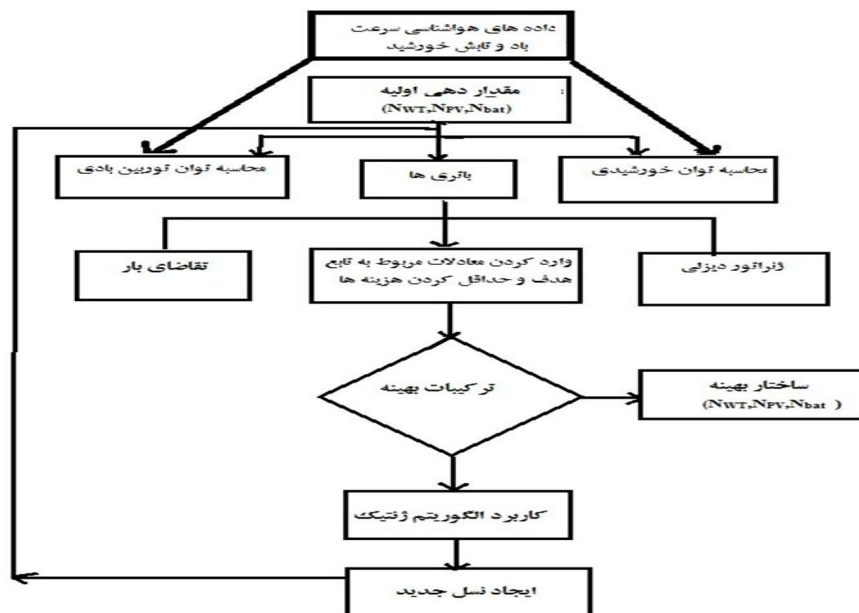
ابتدا اگر تقاضای بار کم‌تر از برق تولیدی توسط سیستم هیبریدی باشد، مجموع قدرت تولیدی توسط سیستم هیبریدی برای تأمین تقاضای بار مورد نیاز و شارژ باتری استفاده می‌شود. در صورتی که اضافه بار بیش‌تر از ظرفیت اینورتر باشد، باتری به اندازه‌ی ظرفیت اینورتر شارژ می‌شود، در غیر این صورت تنها بار مورد تقاضا تأمین می‌شود.

- اگر بار مورد تقاضا بیش‌تر از بار تولیدی توسط سیستم هیبریدی باشد و ظرفیت باتری هم بیش‌تر از حداقل باشد، در این صورت بار مورد نیاز با جمع ظرفیت باتری و

تولید سیستم هیبریدی تأمین می‌شود. در غیر صورتی که به اندازه‌ی حداقل است، مولد دیزلی شروع به کار کرده کمبود بار را تأمین و باتری را نیز شارژ می‌کند. اگر تقاضای بار بیش‌تر از بار تولیدی بوده و این اضافه نیز بیش‌تر از ظرفیت اینورتر نباشد در این صورت باتری کمبود بار را تأمین می‌کند در غیر این صورت باتری به کمک مولد دیزلی کمبود بار را جبران می‌کند.

#### ۴- کاربرد الگوریتم ژنتیک برای تعیین ترکیب بهینه‌ی سیستم هیبریدی

در این مطالعه از الگوریتم ژنتیک به منظور رسیدن به ترکیب بهینه‌ی اجزای سیستم ترکیبی به منظور حداقل کردن هزینه‌ها استفاده شده است. مفهوم الگوریتم ژنتیک با سایر روش‌های استفاده شده در مسائل مانند جستجوهای سنتی بهینه‌سازی، تفاوت دارد و احتمال درگیری و اشتباه آن در بهینه‌ی محلی کم‌تر است. ایده‌ی اصلی الگوریتم ژنتیک بر اساس فرایند ژنتیکی در علوم زیستی قرار دارد. که به طور مصنوعی از آن به منظور ساخت الگوریتم‌های جستجو استفاده شده است. در این الگوریتم راه حل بهینه بر مبنای انتخاب طبیعی قرار دارد. در مطالعه‌ی پیش رو، ساختار بهینه متشکل از تعداد مطلوبی از توربین‌های بادی، پانل‌های PV و هم‌چنین تعدادی باتری می‌باشد. نمودار ساختار بهینه‌ی استفاده شده در الگوریتم ژنتیک در زیر نشان داده شده است:



شکل ۱- نمای کلی از بهینه‌سازی توسط الگوریتم ژنتیک

اولین گام در فرایند بهینه‌یابی، ورود داده‌های میزان تابش انرژی خورشیدی روی سطوح افقی، سرعت باد و تقاضای بار است. در ابتدا تعدادی از مؤلفه‌های سیستم تجدیدپذیر مانند توربین باد، پانل خورشیدی و باتری‌ها به منظور شکل دهی کروموزوم‌های الگوریتم ژنتیک به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. هر کروموزوم (ترکیب) دارای سه ژن (متغیر) به شکل  $N_{WT}$ ،  $N_{PV}$  و  $N_{bat}$  باشد. که در آن به ترتیب تعداد توربین بادی، تعداد پانل خورشیدی و تعداد باتری‌ها هستند.

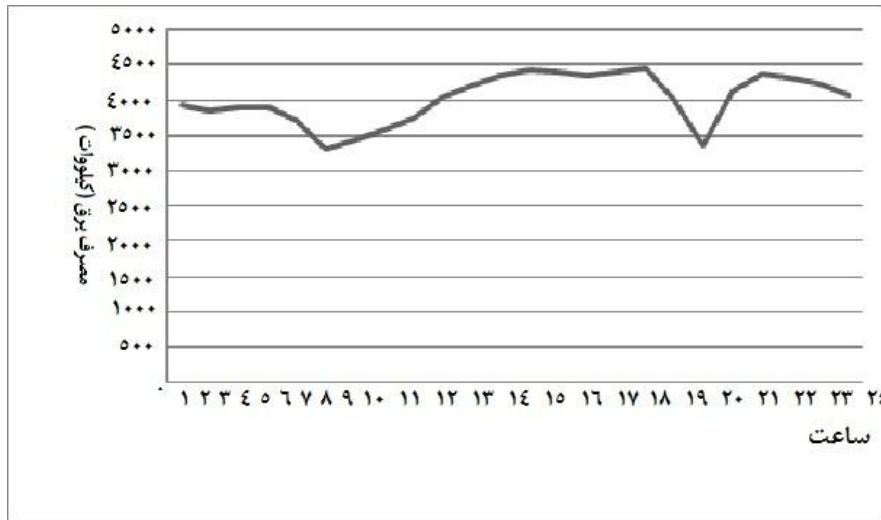
پس از تعیین جامعه‌ی (ترکیب) اولیه، معادله‌های محاسبه‌ی توان به منظور دسترسی به ساختار بهینه‌ی نهایی و مطابق با ساختار پیشنهادی برای کارکرد سیستم اجرا می‌شوند. هزینه‌ی سالانه نیز بر اساس ساختار بهینه مشخص می‌شود. لازم به ذکر است که شاخص محاسبه‌ی هزینه در این جا بر اساس حداقل هزینه است. پس از طی فرایند گفته شده الگوریتم ژنتیک به طور خودکار بهترین کروموزوم (ساختار بهینه شامل تعداد مختلف اجزا) را در هر نسل (هربار گردش برای انتخاب آزمایش ترکیب) انتخاب خواهد کرد، از این رو در پایان فرایند محاسبه، کروموزوم با کم‌ترین هزینه انتخاب خواهد شد.

**منطقه‌ی مورد مطالعه:** یکی از مهم‌ترین کاربردهای انرژی خورشیدی، استفاده از آن برای برق رسانی به مناطق دور افتاده و آفتاب خیز کشور است، که به دلیل پراکندگی و فاصله‌ی زیاد از شبکه‌ی سراسری، گسترش شبکه یا امکان پذیر نبوده یا با هزینه‌های زیادی همراه می‌باشد که به‌طور عمده به دلیل دور افتاده بودن ایجاد می‌شود، یکی از این مناطق شهرستان خور و بیابانک است که در کویر مرکزی ایران قرار گرفته است. خور مرکز شهرستان وسیع خور و بیابانک می‌باشد. در منطقه‌ی خور و بیابانک ۱۲۶ آبادی بزرگ و کوچک وجود دارد. خور در ۵۸ درجه و ۲۰ دقیقه طول جغرافیایی و ۳۲ درجه و ۴۷ دقیقه عرض جغرافیایی قرار دارد. فاصله‌ی آن از مرکز استان (اصفهان) ۴۲۰ کیلومتر است. آب خور از قنات‌های کلاغو و دهزیر و چشمه دریاشو تأمین می‌شود (شرکت توزیع برق استان اصفهان، ۱۳۹۱).

### اطلاعات بار منطقه‌ی مورد بررسی

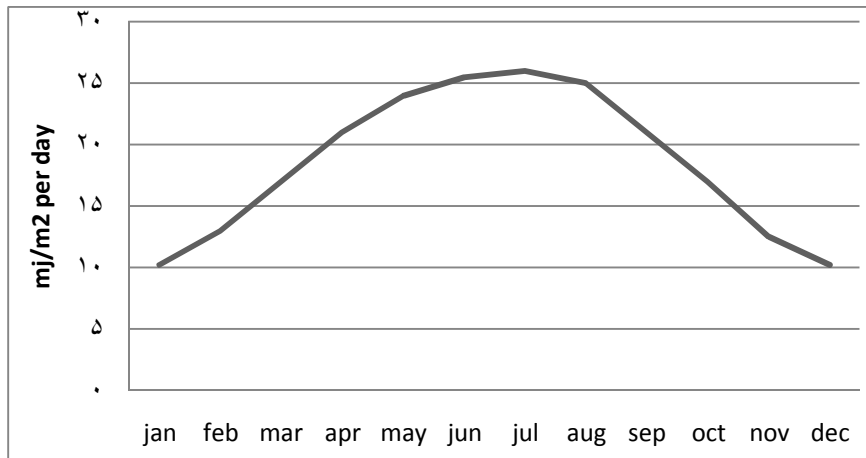
برای عرضه‌ی انرژی الکتریکی به اطلاع از تقاضای بار در منطقه‌ی مورد بررسی (خور و بیابانک) نیاز است. به همین منظور از اطلاعات بار در روزی که پیک بار وجود داشته به‌عنوان نمونه استفاده شده است. در نمودار (۱) تقاضای بار در روز ۱۷ تیر ماه ۱۳۹۰ که به‌عنوان نمونه‌ی انتخاب شده آمده است. باید در نظر داشت که طبق بررسی‌های انجام گرفته این شهرستان از ظرفیت بالای انرژی تجدیدپذیر برخوردار می‌باشد که از

نظر اقتصادی مقرون به صرفه است. مطابق بررسی‌های انجام گرفته میانگین تابش انرژی خورشیدی در این منطقه ( $1.1 \pm 0.19 \text{ Mj/m}^2 \text{ day}$ ) است. که امکان مناسبی را برای بهره برداری از نیروگاه خورشیدی فراهم می‌کند (شریفی و همکاران، ۱۳۸۱).



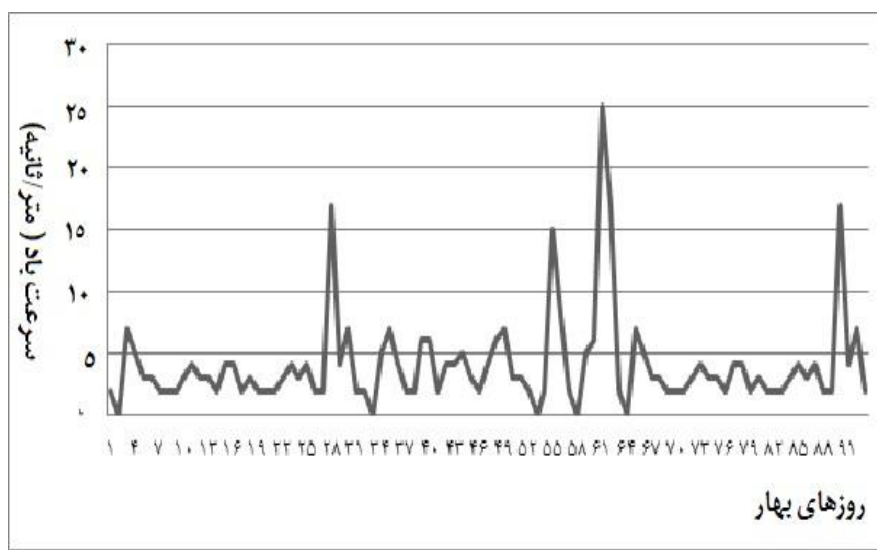
منبع: شرکت توزیع برق استان اصفهان

شکل ۲- منحنی بار در ۱۷ تیر ماه ۱۳۹۰ شهرستان خور



منبع: فتوحی (۱۳۸۰)

شکل ۳- میانگین ماهانه تابش انرژی خورشیدی برای سطوح افقی در منطقه خور و بیابانک



منبع: اداره‌ی کل هواشناسی شهرستان خور و بیابانک (۱۳۹۱)

شکل ۴- پراکنش وزش باد در بهار ۱۳۸۹

**آمار و اطلاعات مورد استفاده:** در این مطالعه بنا بر ضرورت آن نیاز به اطلاعات هزینه‌ای و همچنین اطلاعات فنی مربوط به اجزا سیستم هیبریدی بوده است. این اطلاعات برای اجزا به صورت جداگانه در جدول‌های یک تا ۳ آمده است.

جدول ۱- مشخصات پانل PV

مقدار	شرح
۱۲۰	حداکثر توان خروجی (W)
۱۶	کارایی مدول PV (%)
۱/۰۷	سطح مقطع پانل خورشیدی ( $m^2$ )
۴۰۰	هزینه‌های سرمایه‌گذاری (\$)
۴	هزینه‌های تعمیر و نگهداری (\$/سال)
۰	هزینه‌های جایگزینی (\$)
۲۰	عمر مفید پانل PV (سال)

منبع: شرکت توزیع برق استان بوشهر (۱۳۹۰) و سوریاتموجو (۲۰۱۰)

جدول ۲- مشخصات فنی و هزینه‌ای باتری و اینورتر

مقدار	شرح
۲۵۰۰	حداکثر توان باتری (kw)
۴۰۰۰۰۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری باتری (\$)
۱۰۰۰	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری باتری (\$)
۱۰	عمر مفید باتری (سال)
۴۰۰۰۰۰	هزینه‌ی جایگزینی (\$)
۵۰۰۰	ظرفیت اینورتر (kw)
۴۰۰۰۰۰۰	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری اینورتر (\$)
۱۳۰۰	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری اینورتر (\$)
۰	هزینه‌ی جایگزینی (\$)
۲۰	عمر مفید اینورتر (سال)

منبع: سورباتموجو (۲۰۱۰)

در توضیح جدول (۲) لازم به توضیح است که دلیل بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری باتری و اینورتر، این است که چنین باتری‌ها و اینورترهایی در بازار موجود نبوده و باید به صورت سفارشی ساخته شوند، چرا که اینورترهای موجود در بازار دارای ظرفیت پایینی بوده و برای مصارف بزرگ مناسب نیستند. در مورد باتری‌ها نیز می‌توان با جمع‌بندی باتری‌های موجود، چنین ظرفیتی ایجاد کرد، اما عمر مفید این نوع از باتری‌ها کم می‌باشد (۲ تا حداکثر ۴ سال در بهترین شرایط)، هم‌چنین هزینه‌ی تعمیر و نگهداری زیادی نیز تحمیل می‌کنند، که این عوامل سبب افزایش هزینه‌های آن‌ها می‌شوند. به همین دلیل کارشناسان توصیه کرده‌اند برای مصارف بزرگ بهتر است باتری‌های با ظرفیت بالا که به صورت سفارشی ساخته می‌شوند و عمر مفید خوبی (در حدود ۱۰ سال) دارند استفاده شود.

جدول ۳- مشخصات فنی توربین بادی

مقدار	نماد	شرح
۶۶۰	P	حداکثر توان خروجی (kw)
۴	$v_c$	حداقل سرعت باد (m/s)
۱۵	$v_r$	حداکثر سرعت باد برای تولید توان نامی (m/s)
۲۵	$v_f$	حداکثر سرعت مجاز باد برای تولید توان (m/s)
۱۷۳۵	A	سطح جاروب شده ( $m^2$ )
۱.۲۲۵	$\rho$	دانسیته هوا ( $kg/m^3$ )
۲۰		عمر مفید (سال)

منبع: صبا نیرو (۱۳۹۱)

**مشخصات هزینه‌ای توربین بادی:** بر اساس نظر کارشناسان شرکت برق منطقه‌ای اصفهان هزینه‌ی سرمایه‌گذاری یک واحد توربین بادی کیلووات ۶۶۰ ساخت شرکت صبا نیرو در حدود \$۹۷۹۰۰۰ می‌باشد. همچنین بر اساس اطلاعات به‌دست آمده بین‌المللی هزینه‌های تعمیر و نگهداری آن‌ها در حدود \$۴۰۰ است. عمر مفید توربین‌های بادی ساخت شرکت صبا نیرو بنا به اطلاعات به دست آمده از سازنده ۲۵ سال است.

##### ۵- نتایج تعیین ترکیب بهینه سیستم هیبریدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مشخصات بهینه‌ی سیستم هیبریدی شامل توربین‌های بادی، پانل خورشیدی و باتری‌های ذخیره‌ی انرژی و ژنراتور دیزلی در این شبیه‌سازی به کار برده شده‌اند. مدت زمان شبیه‌سازی برای کل سال انجام شده است. عمر مفید پروژه نیز ۲۰ سال در نظر گرفته شده است. نتایج بهینه‌سازی در جدول زیر آمده است. برای رسیدن به جواب بهتر دو سناریو برای حل مسئله تعریف شده است، در سناریوی اول فرض می‌شود کل برق مورد نیاز توسط سیستم هیبریدی تأمین می‌شود، اما در سناریوی دوم فرض می‌شود سیستم هیبریدی تنها در ۱۲ ساعت روز مورد استفاده قرار می‌گیرد و در شب تنها از شبکه‌ی برق رسانی سراسری استفاده می‌شود، دلیل این موضوع بالا بودن هزینه‌ی تولید و تزیع برق از طریق شبکه‌ی سراسری است. در ادامه ابتدا نتایج سناریوی اول در جدول ۴ و نتایج سناریوی دوم در جدول ۵ نشان داده شده است.

##### نتایج سناریوی اول

در جدول ۴ نتایج یکی از حالت‌هایی است که برای الگوریتم ژنتیک در مورد تعداد حداکثر هر کدام از اجزا در نظر گرفته شده است و کم‌ترین هزینه را نیز در میان حالت‌های مختلف داشته است. نتایج نشان می‌دهد تأمین تقاضای برق مورد نیاز با استفاده از ۷۱۷۲ پانل خورشیدی، ۲۲۶۶ عدد توربین بادی و یک واحد باتری، قابل انجام است. در جدول ۴ می‌توان مشاهده کرد که هزینه‌ی سالانه‌ی سیستم ۲۰۹۳۸۶ هزار دلار است. صفر بودن ظرفیت مولد دیزلی به چند دلیل قابل توجیه است. دلیل اول بالا بودن هزینه‌ی آن‌ها است، در صورتی که هزینه‌ها کاهش یابند وارد مدار خواهد شد. دلیل دوم بالا بودن پتانسیل انرژی تابشی این منطقه از کشور که توانایی تأمین تقاضای مورد نیاز را دارا می‌باشد.



جدول ۴ - نتایج بهینه سازی الگوریتم ژنتیک در حالت کم‌ترین هزینه برای تمام شبانه روز

مقدار	شرح	مقدار	شرح
۰	حداقل قدرت مولد دیزلی (مگاوات)	۱۲۰*۷۱۷۲	حداکثر توان پانل خورشیدی (W)
۱۵۳۸۱۵	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالانه (هزار دلار)	۶۶۰*۲۲۶۶	حداکثر توان توربین بادی (کیلووات)
۰	هزینه‌ی سوخت سالانه (هزار دلار)	۵.۲*۱	ظرفیت ذخیره‌ی باتری (مگاوات)
۱۷۹۶.۸۳	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه (هزار دلار)	۰	ظرفیت مولد دیزلی (مگاوات)
۳۴.۴۰۰	هزینه‌ی جایگزینی سالانه (هزار دلار)	۲۴	نرخ تورم انتظاری (%)
۲۰۹۳۸۶	هزینه‌ی سالانه سیستم (هزار دلار)	۲۰	نرخ بهره (%)

منبع: نتایج پژوهش

### نتایج سناریوی دوم

نتایج نشان می‌دهد تأمین تقاضای برق مورد نیاز با استفاده از ۷۴۷۷ پانل خورشیدی قابل انجام است. و این به دلیل تابش خوب مناطق مرکزی ایران میسر شده است. در جدول ۵ می‌توان مشاهده کرد که هزینه‌ی سالانه‌ی سیستم ۵۴۲.۹۱۵ هزار دلار است. صفر بودن ظرفیت ذخیره باتری، ظرفیت مولد دیزلی و توربین بادی در درجه‌ی اول به دلیل بالا بودن هزینه‌ی آن‌هاست، در صورتی که هزینه‌ها کاهش یابند آن‌ها نیز وارد مدار خواهند شد.

جدول ۵ - نتایج بهینه سازی الگوریتم ژنتیک در حالت کم‌ترین هزینه برای ۱۲ ساعت روز

مقدار	شرح	مقدار	شرح
۰	حداقل قدرت مولد دیزلی (mw)	۱۲۰*۷۴۷۷	حداکثر توان پانل خورشیدی (W)
۴۸۳.۰۶۴	هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سالانه (هزار دلار)	۶۶۰*۰	حداکثر توان توربین بادی (kw)
۰	هزینه‌ی سوخت سالانه (هزار دلار)	۰	ظرفیت ذخیره‌ی باتری (mw)
۵۹.۸۲۱۸	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری سالانه (هزار دلار)	۰	ظرفیت مولد دیزلی (mw)
۰	هزینه‌ی جایگزینی سالانه (هزار دلار)	۲۴	نرخ تورم انتظاری (%)
۵۴۲.۸۸۵۸	هزینه‌ی سالانه سیستم (هزار دلار)	۲۰	نرخ بهره (%)

منبع: نتایج پژوهش

نتایج نشان می‌دهد که در سیستم ترکیبی بهینه (در هر سناریو) بیش‌ترین هزینه مربوط به هزینه‌های سرمایه‌گذاری است، که این به دلیل نو بودن این تکنولوژی‌ها در مقایسه با تکنولوژی‌های رایج است. که با توسعه‌ی تکنولوژی و سرمایه‌گذاری بیش‌تر در پژوهش‌های توسعه‌ای شاهد کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری خواهیم بود. کم‌ترین هزینه نیز مربوط به هزینه‌های جایگزینی است که به دلیل عمر نسبتاً خوب باتری‌ها در نظر گرفته شده است. هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز در حد وسط قرار دارند.

### مقایسه‌ی هزینه‌ی سیستم هیبریدی با هزینه‌های سیستم دیزلی

در این جا به منظور مقایسه‌ی هزینه‌ی این دو سیستم، ابتدا هزینه‌های سوخت و تعمیر و نگهداری سیستم دیزلی در طول عمر مفید پروژه محاسبه شده و با هزینه‌ی سیستم هیبریدی مقایسه می‌شود. لازم به ذکر است دلیل استفاده نکردن از هزینه‌ی سرمایه‌گذاری سیستم دیزلی در دسترس نبودن اطلاعات نیروگاه فعلی خور و بیابانک بوده است.

### محاسبه‌ی اقتصادی هزینه‌ی مولد دیزلی

در این جا هزینه‌ی ثابت با توجه به قیمت‌های مختلف سوخت محاسبه می‌شود. اگر هزینه به صورت زیر محاسبه شود:

$$AFC = T_{FC} * CRF \quad (۱۹)$$

که  $T_{FC}$  کل هزینه‌ی سوخت در طول عمر پروژه است.

$$T_{FC} = c_{\text{سوخت}} * y_{\text{طول عمر پروژه}} * \sum_{t=1}^{8760} f(t)$$

کل سوخت مصرفی در یک سال است.

اگر برای بررسی نیروگاه فعلی خور را مبنای محاسبه قرار دهیم: طبق اطلاعاتی که از زمان کارکرد آن وجود دارد سوخت مصرفی سالانه‌ی آن در حدود ۷۵۰۰۰۰۰ لیتر خواهد بود، با در نظر گرفتن دو فرض گفته شده به صورت زیر می‌باشد.

اگر قیمت‌ها قیمت جاری باشد:

با سوخت نفت گاز بدون در نظر گرفتن هزینه‌ی حمل:

$$= ۲۰ * ۷۵۰۰۰۰۰ * ۲۹ .۰ = ۴۳۵۰۰۰۰۰ \$$$

$$AFC = ۴۳۵۰۰۰۰۰ * ۰۰۶۹۱ = ۳۰۰۵۸۵۰$$

اگر قیمت سوخت بین‌المللی باشد:

$$= ۲۰ * ۷۵۰۰۰۰۰ * ۵۹ .۰ = ۸۸۵۰۰۰۰۰ \$$$

$$AFC = ۸۸۵۰۰۰۰۰ * ۰۰۶۹۱ = ۶۱۱۵۳۵۰$$

### هزینه‌ی تعمیر و نگهداری نیروگاه دیزلی

هزینه‌ی مولد دیزلی طبق محاسبات انجام شده در سال ۲۰۱۱ برای هر کیلووات ۱۰۰۰ دلار در سال برآورد شده است، که اگر یک افزایش ۲۰ درصدی در هزینه‌ها لحاظ شود، این رقم به ۱۲۰۰ خواهد رسید، بنابراین هزینه‌ی تعمیر و نگهداری به صورت زیر خواهد بود.

$$\text{AOM}_{\text{مولد دیزلی}} = (1200 * (1 + 0.2)^2) / 20 = 2300 \$/\text{کیلووات}$$

همان‌طور که نتایج محاسبات نشان می‌دهد، هزینه‌ی سیستم هیبریدی در سناریوی اول و دوم به ترتیب ۲۰۹۳۸۶ هزار دلار و ۵۴۲/۸۸۵۸ هزار دلار بوده است که از هزینه‌ی سالانه‌ی سیستم دیزلی بیش‌تر است. همچنین لازم به ذکر است محاسبات انجام شده با نرخ‌های تنزیل ۸ و ۱۵ درصد نیز به همین نتایج منجر شده است و در مقایسه با شبکه‌ی توزیع در مطالعه‌ی جداگانه که توسط شریفی، رضایی و باقری تودشکی (۱۳۹۱) انجام گرفته نتایج نشان‌دهنده‌ی قابلیت رقابت‌پذیری سیستم‌های ترکیبی با هزینه‌های شبکه‌های توزیع برای مناطق دور افتاده بوده است.

### ۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادات

نتایج نشان می‌دهد برای حداقل کردن هزینه، برای تأمین برق مورد نیاز در این منطقه از کشور یا هر نقطه‌ی دیگری که از پتانسیل بالای تابشی برخوردار است، می‌توان از نیروگاه خورشیدی استفاده کرد. همچنین می‌توان برای داشتن قابلیت اطمینان بالا در تأمین برق مورد نیاز، در کنار استفاده از نیروگاه خورشیدی از توربین‌های بادی (در صورت داشتن پتانسیل خوب وزش باد در منطقه‌ی مورد بررسی) و باتری استفاده کرد؛ و از شبکه‌ی برق رسانی در صورت وجود داشتن و مانند مورد مطالعه‌ی این پژوهش، تنها برای ساعات پیک یا ساعات شب استفاده کرد. چرا که در ساعات شب تقاضای بار کم‌تری وجود دارد. همچنین به دلیل طولانی بودن طول شبکه‌ی انتقال تلفات زیادی در طول شبکه وجود دارد. با این کار یعنی استفاده از سیستم تجدیدپذیر در ساعات روز، علاوه بر کاهش تلفات به کم‌تر از نصف می‌توان از ظرفیت آن برای برق رسانی به صنایع برای گسترش صنایع جدید در شهرستان خور و بیابانک استفاده کرد.

همچنین نتایج نشان داد با فرض این که نیروگاه دیزلی موجود در شهرستان خور به تنهایی بخواهد برق مورد نیاز را تأمین کند این تکنولوژی مزیت اقتصادی نداشته و علاوه بر هزینه‌های مستقیم هزینه‌های جانبی فراوانی نیز خواهد داشت.

در مجموع نتایج نشان دهنده‌ی آن است که با وجود بالا بودن هزینه‌های سرمایه‌گذاری، نیروگاه هیبرید خورشیدی نسبت به نیروگاه‌های سنتی و فسیلی مزیت اقتصادی دارد. بنابراین پیشنهاد می‌شود:

۱- استفاده از سیستم‌های تأمین انرژی تجدیدپذیر به‌ویژه نیروگاه هیبرید خورشیدی به منظور برق‌دار کردن مناطق دورافتاده‌ای مانند خور و بیابانک که دارای پتانسیل بالای تابشی هستند و امکان احداث نیروگاه خورشیدی در مقیاس بزرگ وجود دارد، یا مناطقی که دارای تقاضای کمی هستند، بهتر است به‌جای گسترش شبکه‌ی برق رسانی یا استفاده از نیروگاه به دلیل هزینه‌های بالایی که دارند، از نیروگاه‌های خورشیدی استفاده کنند.

۲- پیشنهاد می‌شود برای رسیدن به رشد و توسعه‌ی اقتصادی در شهرستان خور و بیابانک و بهره‌برداری بیش‌تر از پتانسیل‌های اقتصادی منطقه، با توجه به این‌که این منطقه از کشور از پتانسیل بالای تابشی برخوردار است، تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز در ساعات روز توسط نیروگاه هیبرید خورشیدی (به یکی از دو شیوه پانل‌های PV /باتری یا PV/باتری/توربین بادی البته با در نظر گرفتن شرایط جغرافیایی منطقه از نظر تابش و وزش باد، شیوه‌ی اول هم از نظر قابلیت تأمین بار در ساعات روز و هم از نظر اقتصادی اولویت دارد، البته شیوه‌ی دوم مطمئن‌تر است؛ چرا که در ساعات شب یا روزهایی که هوا ابری است امکان وزش باد وجود دارد و می‌توان در این شیوه بهره‌بیش‌تری از پتانسیل‌های منطقه‌ی کرد) انجام‌گیرد و در ساعات شب نیز توسط شبکه‌ی برق رسانی موجود انجام شود. با این شیوه تأمین بار مورد نیاز بیش از ۱۲ ساعت از ظرفیت شبکه‌ی برق رسانی موجود آزاد شده و می‌تواند برای توسعه‌ی صنایع از آن استفاده شود.

دولت می‌تواند با استفاده از نیروگاه فتوولتائیک در برق رسانی به روستاهای منطقه‌ی خور و بیابانک، بخشی از ظرفیت شبکه‌ی برق رسانی موجود را آزاد کرده و از آن در توسعه‌ی صنایع استفاده کند و به این طریق ضمن توجه به رشد و توسعه‌ی اقتصادی منطقه، با رشد اشتغالی در منطقه، از مهاجرت ساکنان آن نیز در حد مطلوبی جلوگیری نماید.

### فهرست منابع

احمدی آهنگر، رویا حائری، همایون (۱۳۸۹)، محاسبات اقتصادی و پیش‌بینی وضعیت آینده‌ی نیروگاه‌های بادی در شبکه‌ی الکتریکی ایران، بیست و ششمین کنفرانس بین‌المللی برق تهران، ص ص ۱-۶.

- اداره‌ی کل هواشناسی استان اصفهان. (۱۳۹۱). [www.isfahanmet.ir](http://www.isfahanmet.ir).
- بویل. گادفری (۱۳۸۷/۲۰۰۴)، انرژی‌های نو: انرژی برای آینده‌ای پایدار (ترجمه: عبدالرحیم پرتوی)، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- پورذاکر عربانی، سودابه (۱۳۸۵)، مفاهیم هوش مصنوعی و شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک، تهران، نشر ندای سبز شمال.
- ثقفی، محمود، (۱۳۸۸)، انرژی‌های قابل تجدید، تهران، انتشارات دانشگاه تهران.
- خوش اخلاق، رحمان، شریفی، علیمراد و کوچک زاده، میثم (۱۳۸۴)، ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه دیزلی، فصلنامه‌ی پژوهش‌های اقتصادی ایران، سال هفتم شماره‌ی ۲۴، صص ۱۹۲-۱۷۱.
- خوش اخلاق، رحمان، شریفی، علیمراد و کوچک زاده، میثم (۱۳۸۳)، ارزیابی اقتصادی نیروگاه خورشیدی در ایران، مجموعه‌ی مقالات اولین سمینار تخصصی اقتصاد و منابع طبیعی، دانشگاه اصفهان، صص ۳۹-۶۵.
- سازمان انرژی‌های نو ایران (۱۳۸۹)، نشریه‌ی سازمان انرژی‌های نو ایران، سازمان انرژی‌های نو ایران. [www.sana.ir](http://www.sana.ir).
- شرک سهامی برق منطقه‌ای اصفهان، (۱۳۹۱)، معاونت فنی.
- شرکت توزیع برق استان اصفهان (۱۳۹۱)، معاونت بهره برداری و دیسپاچینگ.
- شرکت توزیع برق استان بوشهر، (۱۳۹۰)، معاونت برنامه‌ریزی و مهندسی.
- شریفی، علیمراد، فتوحی، دارا، تیموری (۱۳۸۱)، مدل هزینه‌ی نهایی انرژی الکتریکی در منطقه‌ی خور و بیابانک، سومین همایش ملی انرژی تهران، صص ۵-۹.
- شریفی، علیمراد، رضایی، محمد رضا، باقری تودشکی، محمد مهدی (۱۳۹۱)، بهینه‌یابی اقتصادی برق رسانی به مناطق دور افتاده‌ی مرکزی ایران، تهران، بیست و هفتمین کنفرانس بین‌المللی برق تهران. صص ۴-۹.
- صبا نیرو (۱۳۹۱)، [www.sadid.ir](http://www.sadid.ir).
- فتوحی، دارا (۱۳۷۹)، بررسی فنی و اقتصادی برق‌رسانی به منطقه‌ی خور و بیابانک با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر. اصفهان، کمیته‌ی مرکزی تحقیقاتی منطقه‌ی اصفهان، شورای تحقیقات برق، وزارت نیرو.

فلاح، مجید و معصوم علی، سمانه (۱۳۹۰)، گزارش برآورد حداکثر بار و انرژی مورد نیاز شرکت برق منطقه‌ای اصفهان تا سال ۱۳۹۹. اصفهان، شرکت برق منطقه‌ای اصفهان، دفتر برنامه‌ریزی توسعه‌ی توانیر و دفتر برنامه‌ریزی فنی برآورد بار شرکت برق منطقه‌ای اصفهان.

کوچک‌زاده، میثم (۱۳۸۴)، ارزیابی اقتصادی استفاده از نیروگاه هیبرید خورشیدی در ایران. اصفهان، دانشگاه اصفهان، دانشکده‌ی علوم اداری و اقتصاد.

کهربابیان، احمد، هرسینی، ایرج (۱۳۸۲)، بررسی امکان استفاده از سیستم فتوولتائیک برای تأمین برق روستاهای دور از شبکه، مجموعه‌ی مقالات چهارمین همایش ملی انرژی، شورای جهانی انرژی-کمپته‌ی ملی انرژی جمهوری اسلامی ایران، صص ۱۳۵-۱۳۹.

نوروزی، مهدی، کاظمی کارگر، حسین (۱۳۹۰)، بررسی امکان احداث نیروگاه ترکیبی فتوولتائیک و بادی به همراه سیستم ذخیره‌ی باتری با استفاده از تکنیک‌های قابلیت اطمینان DPSP و LPSP در منطقه‌ی اشتهارد، هشتمین همایش ملی انرژی تهران، صص ۵-۸.

وزارت نیرو (۱۳۹۱)، انرژی خورشیدی، تهران، معاونت انرژی، سازمان انرژی‌های نو ایران.

هاپت، رندی ال، هاپت، سو ال (۱۹۹۷/۱۳۸۹). الگوریتم‌های ژنتیک کاربردی، ترجمه‌ی امین نجاریور و مهدی صادق زاده، تهران. شرکت انتشاراتی پارس پیدورا.

Arun. P, Rangan Banerjee, Santanu Bandyopadhyay (2008). Optimum Sizing of Battery-Integrated Diesel Generator for Remote Electrification Through Design-Space Approach, Energy, Vol. 33, pp. 1155-1168.

Ashok, S (2007), Optimized Model for Community-based Hybrid Energy System, Renewable Energy, www. elsevier. com/locate/renene, pp.1155-1164.

Bala. BK, Azam Siddique. Saiful (2009), Optimal Design of a PV-Diesel Hybrid System for Electrification of an Isolated Island-Sandwip in Bangladesh Using Genetic Algorithm, Energy for Sustainable Development, pp.137-142.

Ekren. O, Yetkin Ekren. B (2010), Size Optimization of a PV/Wind Hybrid Energy Conversion System with Battery Storage Using Simulated Annealing, Applied Energy 87, pp.592-598.

Hearps. Patrick, McConnell. Dylan (2010), Renewable Energy Technology Cost Review, Melbourne Energy Institute, Technical Paper Series.

- Ingber. L. & Rosen. B. E. (1992), Genetic Algorithms and Very Fast Simulated Reannealing. mathematical and computer modeling, vol. 16 Issue 11, pp. 87-100.
- Nelson. D. B, Nehrir. M. H, Wang. C (2006), Unit Sizing and Cost Analysis of Stand-Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation Systems. Renewable Energy 31, www.elsevier.com/locate/renene, pp.1641–1656.
- Ould Bilal. B, Ndiaye P. A, Kébé C. M. F, Sambou. V and Ndongu. M (2012), Methodology to Size an Optimal Standalone Hybrid Solar-Wind-Battery System using Genetic Algorithm, International Journal of the Physical Sciences, Vol. 7(18), Available Online at <http://www.academicjournals.org/IJPS>, pp. 2647-2655.
- Razak. J. A, Nopiah. Z. M, Sopian. K, Ali. Y. (2007). Genetic Algorithms for Optimization of Hybrid Renewable Energy System, Regional Conference on Engineering Mathematics, Mechanics, Manufacturing & Architecture (EM3ARC), pp.186 – 193.
- Razak. J. A. Sopian. K, Ali. Y, Alghoul. M. A, Zaharim. A, Ahmad. I (2009), Optimization of Pv-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity, European Journal of Scientific Research, 25, pp.663-671.
- Renewable Energy (2012), Fact Book, RWE, Theergyto Lead.
- Skarstein, O, Ulhen. K (1989), Design Considerations With Respect to Long Term Diesel Saving in Wind/Diesel Plants, Wind Engineering, vol. 13.
- Suryoatmojo. H. (2010). Artificial Intelligence Based Optimal Configuration of Hybrid Power Generation System. Japan, Kumamoto University. Department of Computer Science and Electrical Engineering Graduate School of Science and Technology.
- Suryoatmojo. Heri, Hiyama. Takashi, Elbaset. Adel A, Ashari. Mohammad (2010) Optimal Design of Wind-PV-Diesel-Battery System using Genetic Algorithm, Extended Summary, pp.413–420.
- Tomas sav. G. (1988). Economic Analysis of Thermal Energy Systems, United States. Solar Energy.
- World Wind Energy Report. (2010). [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org).
- World Wind Energy Association. (2011). [www.wwindea.org](http://www.wwindea.org).