

پتانسیل سنجی و طراحی بهینه سیستم ترکیبی انرژی های تجدیدپذیر جهت تامین برق مورد نیاز ایستگاه های پمپاژ آب سایت مشکین شهر

فرشید مستوفی^{۱*}، حسین شایقی^۲، حسین کاظمی کارگر^۳

چکیده:

در این مقاله، کمینه‌سازی هزینه نهایی نیروگاه ترکیبی مستقل از شبکه قدرت، هدف مورد بررسی می‌باشد. این نیروگاه از ترکیب واحدهای برق آبی کوچک، سیستم فتوولتایک، توربین‌های بادی بر پایه ذخیره‌سازی هیدروژن و استفاده از هیدروژن در پیل سوختی به منظور تأمین برق مورد نیاز ایستگاه پمپاژ آب سد سبلان به مزارع واقع در اطراف این سد پیشنهاد می‌شود. سیستم مورد بررسی با طول عمر ۲۰ ساله بوده و محاسبات مربوط به قابلیت اطمینان سیستم نیز در این مقاله اعمال شده است. اطلاعات مربوط به دبی آب خروجی از دریچه سد و شدت تابش خورشیدی و وزش باد از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی منطقه اخذ و در شیوه سازی اعمال شده است. مقایسه دو سیستم ترکیبی برق آبی، بادی، خورشیدی و هیدروژنی، و سیستم فوق بدون استفاده از سیستم برق آبی در این مقاله انجام شده است. کاهش هزینه احداث نیروگاه در کنار بهبود قابلیت اطمینان کل سیستم و نیز کاهش هزینه کل انرژی تولیدی، از مزایای اضافه کردن سیستم برق آبی به سیستم ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی در منطقه مورد مطالعه محسوب می‌شود. به منظور بهبود زمان بازدهی مساله، از یک مدل تقریبی قابلیت اطمینان در این مقاله استفاده شده است. برای یافتن ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی پیشنهادی از الگوریتم تجمعی زنبور عسل استفاده شده است. در ادامه، برای ارزیابی صحت و دقت الگوریتم پیشنهادی، نتایج حاصله با نتایج حاصل از نرم افزار HOMER مقایسه شده است. ارزیابی نتایج حاکی از دقت و کارایی مناسب الگوریتم تجمعی زنبور عسل در تعیین ظرفیت بهینه سیستم ترکیبی برق آبی، بادی، خورشیدی و هیدروژنی در مقایسه با نرم افزار HOMER است.

تاریخ دریافت مقاله:

۱۳۹۱/۲/۳۱

تاریخ پذیرش مقاله:

۱۳۹۱/۴/۷

کلمات کلیدی:

سیستم ترکیبی، بهینه سازی،
قابلیت اطمینان، الگوریتم
HOMER، نرم افزار ABC

^{۱*} fmos2fi@gmail.com

hshayeghi@gmail.com

h_kazemi_ir@gmail.com

(۱) کارشناس ارشد مهندسی انرژی، دانشکده محیط زیست و انرژی، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

(۲) دکتری برق - قدرت، دانشگاه محقق اردبیلی، دانشکده فنی و مهندسی، اردبیل

(۳) دکتری برق - قدرت، دانشگاه شهید بهشتی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوترا، تهران

مقدمه

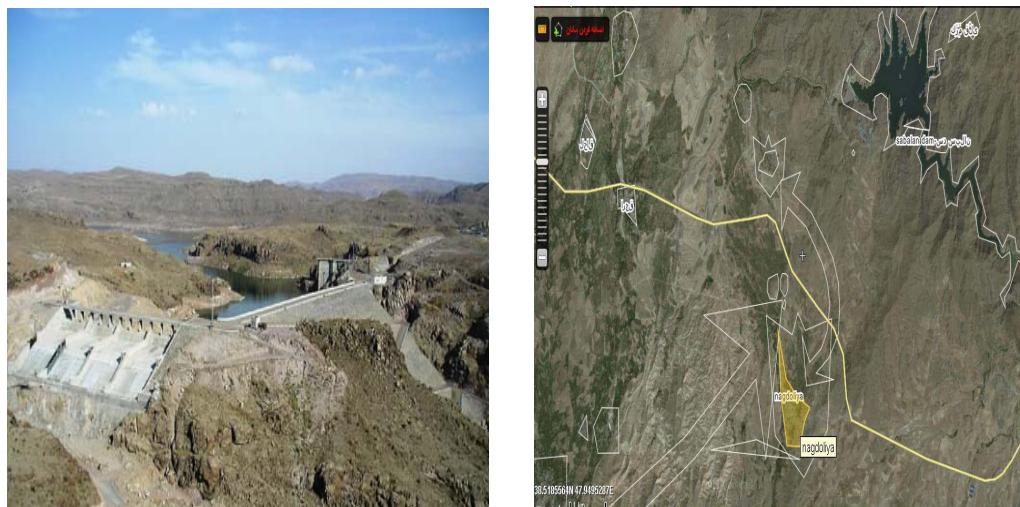
کمبود شبکه‌های برق رسانی در مناطق دور افتاده و هزینه بالای اتصال این مناطق به شبکه سراسری به جهت وضعیت جغرافیایی نامساعد، لزوم استفاده از منابع دیگر انرژی همچون انرژی های تجدید پذیر را به صورت مستقل از شبکه در این مناطق دو چندان می‌نماید. با این وجود، از مشکلات عمده استفاده از منابع تجدیدپذیر می‌توان به منقطع بودن شدت وزش باد در طول شبانه روز و عدم استفاده از انرژی خورشیدی در هنگام شب اشاره کرد که برای حل آن از ترکیب سیستم‌های بادی و خورشیدی استفاده می‌شود که این سیستم نیز در جای خود دارای عیوب دیگری همچون پایین بودن قابلیت اطمینان سیستم و عدم تامین بار در زمان پیک در طول سال است.

روش‌های مختلفی جهت کمینه‌سازی هزینه‌های نیروگاه‌های ترکیبی ارائه شده است. در مرجع [۱۵] از نرم افزار HOMER برای شبیه‌سازی سیستم هیبریدی خورشیدی و نیروگاه برق آبی کوچک در منطقه شمال آفریقا استفاده شده است. در مرجع [۱۳] از نرم افزار HOMER جهت کمینه‌سازی هزینه نیروگاه‌های مختلف بادی، خورشیدی و میکروهیدرو الکتریکی و دیزلی در کشور مالزی استفاده شده است. از معایب عمده این مقاله نیز می‌توان به عدم بررسی قابلیت اطمینان سیستم و استفاده از دیزل ژنراتور که باعث افزایش آلینده‌های زیستمحیطی می‌شود، اشاره کرد. مرجع [۱] به بررسی استفاده از انرژی برق آبی کوچک در یکی از جایگاه‌های استان مازندران پرداخته و به ارزیابی اقتصادی نیروگاه برق آبی کوچک می‌پردازد. استفاده از الگوریتم PSO جهت کمینه‌سازی هزینه تمام شده نیروگاه ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی، روش بکار گرفته شده در مرجع [۱۱و۲] می‌باشد.

در این مقاله، سیستم برق آبی کوچک به سیستم ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی اضافه شده که هدف از ارائه این روش، دستیابی به قابلیت اطمینان بالای کل سیستم در کنار هزینه کمتر احداث نیروگاه در مقایسه با سیستم‌های ترکیبی قبلی بوده است. هزینه کل احداث نیروگاه در این حالت دارای مقدار بسیار پایینی در مقایسه با حالت ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی شده که به دلیل پایین بودن قیمت ژنراتورهای برق آبی در مقایسه با توربین‌های بادی و پنل‌های فتوولتائیک است. در این مقاله، ابتدا سیستم ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی مدل‌سازی شده و سپس سیستم برق آبی به ترکیب فوق اضافه شده که نتیجه حاصل از این کار، کاهش هزینه کل احداث نیروگاه ترکیبی پیشنهادی در کار بهبود قابلیت اطمینان سیستم در مقایسه با حالت ترکیبی بادی، خورشیدی و هیدروژنی شده است. شماتیک کلی سیستم ترکیبی پیشنهادی در شکل ۱ نشان داده می‌شود. اطلاعات مربوط به یکی از ایستگاه‌های پمپاژ آب واقع در روستای نقداویلی شهرستان مشکین شهر واقع در استان اردبیل مورد مطالعه قرار گرفته است. این منطقه دارای عرض جغرافیایی $۴۸/۱۷^{\circ}$ شمالی و طول جغرافیایی $۳۸/۱۵^{\circ}$ شرقی می‌باشد. صعب‌العبور بودن منطقه، فاصله ۱۸ کیلومتری آن از نزدیک‌ترین شبکه برق رسانی و نیز هزینه بالای احداث خط انتقال به ایستگاه مورد مطالعه، از دلایل عدمه انتخاب این منطقه به عنوان

سیستم مورد بررسی محسوب می‌شود. حداکثر بار مصرفی روزانه ایستگاه، ۵۰ کیلووات می‌باشد و در حال حاضر به دلیل عدم وجود برق لازم برای راه اندازی پمپ‌ها، این ایستگاه بلا استفاده مانده است.

در مطالعات بعمل آمده، این منطقه دارای پتانسیل بسیار مناسبی به لحاظ منابع آبی به منظور احداث نیروگاه برق‌آبی کوچک و نیز میزان دریافت مناسب انرژی خورشیدی و باد خیز بودن منطقه به منظور نصب پنل‌های فتوولتائیک و توربین‌های بادی است. لذا منطقه به لحاظ شرایط اقلیمی، برای احداث نیروگاه ترکیبی برق‌آبی کوچک و خورشیدی و بادی و هیدروژنی به صورت مستقل از شبکه برق رسانی مناسب می‌باشد. اطلاعات آب و هوایی منطقه برای یکسال از اداره هواشناسی منطقه اخذ و در شبیه‌سازی سیستم مورد استفاده قرار می‌گیرد. سیستم موردنظر با طول عمر ۲۰ ساله و با هدف کمترین هزینه عملیاتی و بهره‌برداری و به منظور تأمین مطمئن بار مورد نیاز ایستگاه پمپاژ پیاده‌سازی می‌شود.

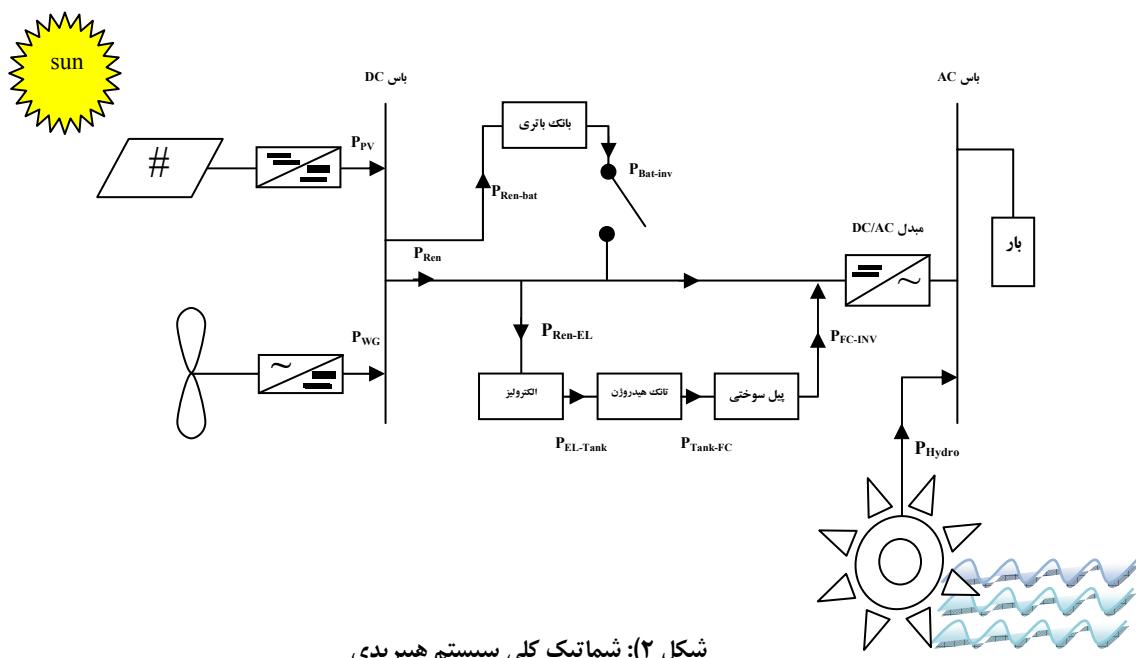


شکل ۱): نقشه ژئوگرافی و تصویر سد سبلان واقع در منطقه

به منظور یافتن ظرفیت بهینه سیستم پیشنهادی از الگوریتم تجمعی زنبور عسل و نرم افزار HOMER استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی یک روش قدرتمند بهینه‌سازی بر مبنای هوش جمعی می‌باشد که نسبت به سایر الگوریتم‌های هوشمند، از دقت و سرعت همگرایی بالایی برخوردار بوده و نیاز به تنظیم پارامترهای کنترلی کمتری دارد [۱۲]. به منظور طراحی بهینه سیستم ترکیبی منابع تجدید پذیر از تابع معیار مبتنی بر هزینه سالانه شامل احداث و بهره‌برداری با در نظر گرفتن شاخص‌های قابلیت اطمینان سیستم استفاده می‌شود [۶ و ۱۶]. نتایج حاصله حاکی از کارایی مناسب سیستم ترکیبی پیشنهادی برای تأمین بار سالانه ایستگاه پمپاژ آب بوده و دارای کمترین هزینه احداث و بهره‌برداری نسبت به هزینه بدست آمده از طریق نرم افزار HOMER است.

تشریح سیستم ترکیبی برق آبی کوچک، بادی، خورشیدی و پیل سوختی و مدل سازی سیستم

استفاده از پتانسیل آبی و انرژی قابل استحصال بادی و خورشیدی مناسب منطقه، بخوبی پاسخگوی تقاضای برق ایستگاه پمپاژ آب منطقه می باشد. سیستم پیشنهادی مشکل از پنل فتوولتائیک، ژنراتور آبی، توربین بادی، الکترولیزر، تانک هیدروژن، پیل سوختی و باتری جهت ذخیره سازی انرژی و نیز یک مبدل DC/AC جهت تأمین برق موردنیاز پمپ های آب می باشد. با توجه به شکل ۱، PV، WG، الکترولیزر و بانک باتری به باس DC متصل بوده و توسط مبدل AC/DC به باس AC متصل می شوند ولی خروجی ژنراتور آبی مستقیماً به باس AC متصل است. خروجی باس AC نیز مستقیماً جهت تأمین بار ایستگاه پمپاژ مورد استفاده قرار می گیرد. باید توجه داشت که اندازه یابی بهینه سیستم ترکیبی، بخش مهمی از طراحی آن است چرا که اندازه بزرگ تاثیرات زیان بخشی بر روی هزینه برق تولیدی به دنبال دارد و اندازه کوچک سیستم نیز باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم در زمان بهره برداری خواهد شد.



شکل ۲): شماتیک کلی سیستم هیبریدی

- 1) Photovoltaic
- 2) Wind Generator

سیستم برق آبی کوچک

برای محل مورد نظر ۲ پارامتر اصلی یعنی ارتفاع ریزش آب (متر) و S/L یا m^3/s ۱۴۶/۰ فلوی آب در خروجی دهانه سد اندازه‌گیری شده است [۱۳]. پتانسیل قابل دسترسی انرژی الکتریکی توسط منابع آبی از رابطه زیر به دست آمده است:

$$P_{total} = P_h \times \eta_t \times \eta_g \quad (1)$$

که در آن η_t و η_g راندمان توربین و راندمان ژنراتور بوده که با توجه به نوع توربین و مشخصات فنی آن به ترتیب ۰/۹ و ۰/۸۵ در نظر گرفته شده و P_h توان هیدرولیکی سیستم است [۱۴]. توان خروجی توری با توجه به محل استقرار توربین این چنین به دست می‌آید:

$$P_h = C_w \times \rho_e \times g \times h_f \quad (2)$$

که در آن، C_w دانسیته‌ی آب، ρ_e ضریب تخلیه الکتریکی، g شتاب گرانش زمین و h_f ارتفاع ریزش آب به ترتیب برابر ۱/۰۸ و ۰/۵۴ و ۰/۹ و ۰/۲ در نظر گرفته شده‌اند [۱۲]. با توجه به تپولوژی و خواص هیدرولوژیکی منطقه، از توربین نوع کاپلان (اندازه کوچک و سرعت بیشتر) می‌توان استفاده نمود [۱۰].

برای تولید سرعت متغیر، از ژنراتور القایی به علت مشخصه سرعت روتور متغیر آن نسبت به ژنراتور سنکرون استفاده می‌شود [۵]. بازده ژنراتور نیز معمولاً بالای ۰/۹ درنظر گرفته می‌شود. با توجه به دبی آب خروجی از دهانه سد و سرعت چرخش پره‌های توربین، ژنراتور القایی با سرعت متغیر که مشخصات فنی آن در جدول ۱ بیان شده، انتخاب می‌شود. با ارزیابی اقتصادی سیستم و پتانسیل آبی موجود منطقه و نیز توان مورد نیاز پمپ‌ها، ژنراتور با توان نامی KW ۷/۵ برای واحد برق آبی کوچک، انتخاب شده است [۱۳]. مشخصه‌های اصلی این ژنراتور در جدول ۱ نشان داده شده است :

جدول ۱): مشخصات فنی ژنراتور

نوع	توان نامی	بازده	فرکانس	ضریب قدرت	سرعت سنکرون	سرعت روتور	اینرسی روتور
ژنراتور القایی	۷/۵KW	۰/۹	۵۰Hz	۰/۸	۱۵۰۰Rpm	۱۵۶۰Rpm	۰/۰۲

سیستم فتوولتاییک

توان خروجی پنل‌های فتوولتاییک را می‌توان با استفاده از روابط (۳) الی (۵) محاسبه کرد که این مدل شامل تأثیرات تابش خورشید و دمای پنل بر روی توان خروجی آن است [۳]. این روابط در نقطه بیشینه توان خروجی عبارت است از:

$$P_{pv} = V_{mpp} \times I_{mpp} \quad (3)$$

$$V_{mpp} = V_{mpp,ref} \times P_{v,oc} \left(T_c - T_{c,ref} \right) \quad (4)$$

$$I_{mpp} = I_{mpp,ref} + I_{SC,ref} \left(\frac{G_T}{G_{ref}} \right) + P_{I,SC} \left(T_c - T_{c,ref} \right) \quad (5)$$

که P_{pv} توان پنل، V_{mpp} ولتاژ پتانسیل، I_{mpp} در شرایط عملکرد استاندارد (V)، G_T جریان پنل و $I_{SC,ref}$ جریان اتصال کوتاه در شرایط عملکرد استاندارد، G_{ref} میانگین روزانه تابش خورشید (w/m^2) و G_{ref} معادل 1000 برای عملکرد در شرایط استاندارد در نظر گرفته می‌شود. $P_{I,SC}$ و $P_{v,oc}$ به ترتیب ضرایب دمای برای ولتاژ مدار باز ($V^\circ C$) و جریان اتصال کوتاه ($A^\circ C$) دمای پنل فتوولتاییک در شرایط عملکرد استاندارد است که $25^\circ C$ در نظر گرفته شده و $T_C(t)$ دمای عملکرد پنل فتوولتاییک است که این چنین محاسبه می‌شود:

$$T_C(t) = T_a(t) + \frac{NOCT - 20}{800} \cdot G_T \quad (6)$$

در اینجا، $T_C(t)$ دمای محیط ($NOCT, {}^\circ C$) (دمای سلول در عملکرد نرمال) برای عملکرد پنل تحت شدت تابش $20^\circ C$ و دمای $500 w/m^2$ تعريف شده و معمولاً بین $40^\circ C$ تا $46^\circ C$ در نظر گرفته می‌شود [۱۵].

توربین بادی

برای تعیین سرعت باد برخورد کرده به پره‌های توربین در ارتفاع مورد نظر از معادله زیر استفاده می‌شود:

$$V(t) = V_r(t) \left(\frac{h}{h_r} \right)^\gamma \quad (7)$$

که در آن، V سرعت باد در ارتفاع V_r ، h سرعت باد در ارتفاع ثبت شده h_r ، h_r ارتفاع مرجع و γ نمای قانونی توان نام دارد که مقدار آن بین $۰/۰$ تا $۰/۲۵$ است [۱۷]. برای محاسبه توان خروجی توربین هم از رابطه (۸) استفاده می‌شود:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} av^r(t) - bP_r & V_{Ci} < V < V_r \\ P_r & V_r < V < V_{CO} \\ . & \text{otherwise} \end{cases} \quad (8)$$

که در آن، V_{CO}, V_r, V_{Ci} و P_r توان مجاز و $b = \frac{V_{Ci}}{(V_r^3 - V_{Ci}^3)}$ ، $a = \frac{P_r}{(V_r^3 - V_{Ci}^3)}$ سرعت نامی و سرعت قطع بالای توربین بادی است.

پیل سوختی

پیل سوختی یک مدل الکتروشیمیایی است که تولید الکتریسیته در آن توسط سوخت (در سمت آند) و اکسید کردن آن (در سمت کاتد) به دست می‌آید [۱۸]. توان خروجی پیل سوختی این چنین محاسبه می‌شود:

$$P_{FC-INV} = P_{Tank-FC} \times \eta_{FC} \quad (9)$$

که در آن $P_{Tank-FC}$ ، قدرت هیدروژن تحويل داده شده به پیل سوختی و η_{FC} بازده پیل سوختی است.

الکتروولیزر

الکتروولیزر مسئولیت تجزیه آب به منظور جداسازی هیدروژن و اکسیژن را بر عهده دارد. هیدروژن بدست آمده از الکتروولیزر در تانک هیدروژن ذخیره می‌شود که توان خروجی الکتروولیزر ($P_{EL-Tank}$) عبارتست از:

$$P_{EL-Tank} = P_{Ren-EL} \times \eta_{EL} \quad (10)$$

که در آن، P_{Ren-EL} توان الکتریکی تحويل داده شده به الکتروولیزر و η_{EL} بازده آن است [۸]. در این مطالعه، بازده الکتروولیزر در طول دوره عملکرد ثابت در نظر گرفته می‌شود.

タンک هیدروژن

انرژی ذخیره شده در تانک هیدروژن برای سه گام زمانی را می‌توان از رابطه زیر محاسبه نمود :

$$E_{Tank(t)} = E_{Tank(t-1)} + (P_{EL-Tank} \times \Delta t) - (P_{ank-FC} \times \Delta t \times \eta_{storage}) \quad (11)$$

که Δt طول گام زمانی است و در اینجا یک روز در نظر گرفته می‌شود، $\eta_{storage}$ راندمان سیستم ذخیره‌سازی و برابر با ۹۵٪ است [۱۸]. حجم هیدروژن ذخیره شده در تانک نیز از رابطه (۱۲) به دست می‌آید :

$$M_{storage} = \frac{E_{storage(t)}}{HHV_{H2}} \quad (12)$$

در رابطه بالا HHV_{H2} ارزش حرارتی هیدروژن است که KWh/kg ۳۹/۷ است که گرفته می‌شود [۲]. حداکثر حجم هیدروژن که می‌تواند در تانک ذخیره شود، متناسب با میزان ظرفیت تانک هیدروژن است و علاوه بر این، به علت برخی مسائل فنی از جمله میزان فشار تانک هیدروژن، کل هیدروژن نمی‌تواند استخراج شود. بنابراین :

$$E_{Tank,min} \leq E_{Tank}(t) \leq E_{Tank,max} \quad (13)$$

مدل باتری

توان ورودی به بانک باتری با استفاده از رابطه زیر به دست می‌آید :

$$\Delta P(t) = P_{ren}(t) - P_L(t) \quad (14)$$

($P_{ren}(t)$ کل توان تولیدی توسط منابع تجدیدپذیر (پنلهای فتوولتائیک، توربینهای بادی، ژنراتور آبی و پیل سوختی) و $P_L(t)$ عبارتست از :

$$P_L(t) = \frac{P_{Load}(t)}{\eta_i} \quad (15)$$

که ($P_{Load}(t)$) توان مورد نیاز پمپ‌ها و η_i بازده مبدل DC/AC است.

در طول فرآیند شارژ، $\Delta p(t) > 0$ و برای فرآیند دشارژ $\Delta p(t) < 0$ است [۴]. وضعیت شارژ باتری (SOC) را می‌توان طبق رابطه زیر محاسبه کرد :

$$SOC(t+1) = SOC(t) + \eta_{bat} \left(\frac{P_{batt}^i(t)}{V_{bus}} \right) \Delta t \quad (16)$$

که در آن، ($SOC(t)$) میزان انرژی ذخیره شده در باتری در روز قبل و η_{bat} بازده باتری و ($P_{batt}^i(t)$) کل توان ذخیره شده در باتری در همان روز است.

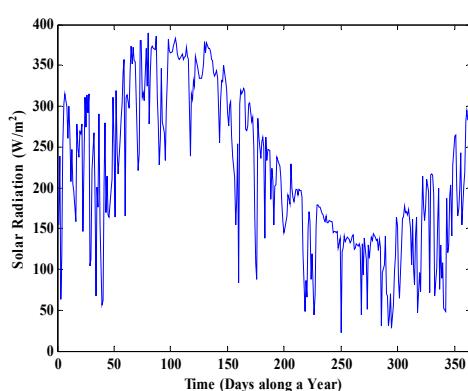
مبدل DC/AC

مبدل DC/AC به منظور تبدیل توان DC کل نیروگاه ترکیبی به برق AC با فرکانس مطلوب مورد استفاده قرار می‌گیرد. توان تأمین شده بار توسط مبدل نیز این چنین محاسبه می‌شود:

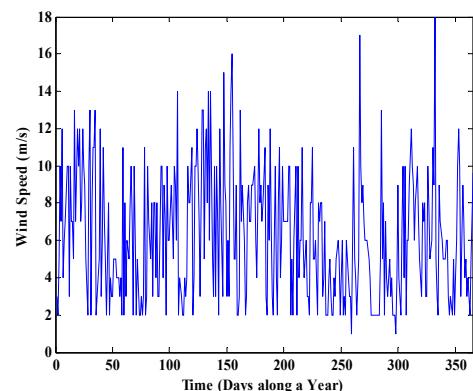
$$P_{INV-Load} = (P_{FC-INV} - P_{Ren-INV}) \times \eta_{INV} \quad (17)$$

که η_{INV} بازده مبدل می‌باشد.

اطلاعات لازم جهت انجام شبیه‌سازی همچون نمودارهای شدت تابش روزانه و شدت وزش باد به ترتیب در شکل‌های ۲ و ۳ نشان داده شده‌اند که به همراه میزان بار مصرفی، در فرآیند شبیه‌سازی اعمال می‌شوند.

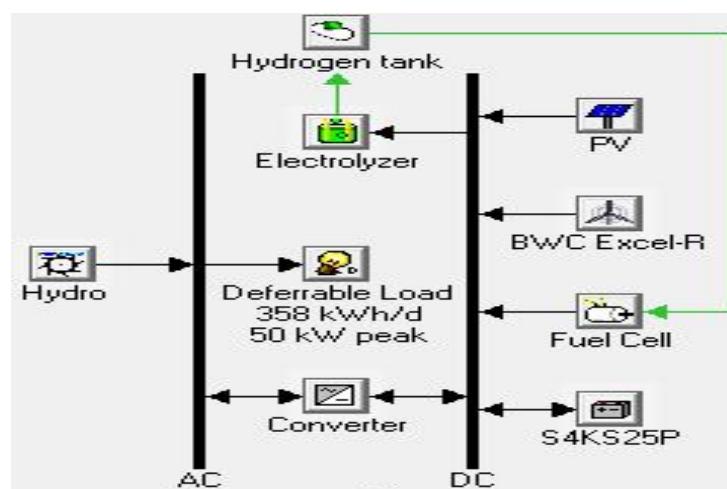


شکل ۴): نمودار شدت تابش روزانه و وزش باد در طول سال



شکل ۳): نمودار شدت تابش خورشیدی در طول سال

همچنین هزینه‌های مربوط به سرمایه‌گذاری، تعمیر و نگهداری، جایگزینی قطعات و هزینه‌های عملیاتی سیستم، همگی به صورت مقادیر واقعی در جدول ۲- (پیوست) ارائه شده است [۱۶]. شماتیک کلی سیستم ترکیبی اعمال شده در نرم افزار HOMER نیز در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵): شماتیک سیستم ترکیبی در نرم افزار HOMER

بررسی قابلیت اطمینان سیستم

در نظر گرفتن سود واقعی حاصل از استفاده از منابع تجدیدپذیر آبی، بادی و خورشیدی بر پایه ذخیره‌سازی هیدروژن و نیز اطمینان از کارکرد مداوم سیستم ترکیبی به منظور تأمین مطمئن توان مورد نیاز مصرف کننده، مستلزم محاسبه قابلیت اطمینان سیستم در طول کارکرد سیستم است. متناسب بودن انرژی حاصل از باد و خورشید در طول روز باعث پایین آمدن قابلیت اطمینان سیستم شده و لذا در این مقاله سیستم برق آبی کوچک به ترکیب فوق اضافه شده تا ضمن حفظ قابلیت اطمینان کل سیستم در یک حد مطلوب، هزینه بالای استفاده از توربین‌های بادی و پنلهای خورشیدی را نیز به‌طور قابل ملاحظه‌ای کاهش دهد. برای ارزیابی سطح قابلیت اطمینان سیستم، ضریب تلفات هم ارز (ELF)^۱ جهت به دست آوردن تعداد روزهای خاموشی سیستم پیشنهادی در طول سال، از رابطه (۱۸) محاسبه می‌شود:

$$ELF = \frac{I}{N} \sum_{i=1}^N \frac{Q(t)}{D(t)} \quad (18)$$

که در آن، $D(t)$ به ترتیب، کل تلفات بار و کل تقاضای بار در گام زمانی t بوده و N تعداد کل گام‌های زمانی استفاده شده است. حداقل سطح مجاز شاخص ELF معمولاً حدود ۰/۰۱۷ است^۲. علاوه بر آن، دو شاخص احتمال وقوع تلفات بار ($LOLE$)^۳ و احتمال عددی تلفات انرژی ($LOEE$)^۴ نیز در این مقاله استفاده شده است که این ضرایب توسط روابط زیر به دست می‌آیند:

$$LOLE = \sum_{i=1}^N E[LQL(t)] \quad (19)$$

در رابطه فوق $E[LOL(t)]$ ، احتمال عددی تلفات بار در فرآیند زمانی t است.

$$LOEE = \sum_{i=1}^N E[LQE(t)] \quad (20)$$

در رابطه فوق $E[LOE(t)]$ ، احتمال عددی تلفات انرژی در بازه زمانی t است.

الگوریتم تجمعی زنبور عسل (ABC)

الگوریتم تجمعی زنبور عسل الهام گرفته از رفتار زنبورها در طبیعت می‌باشد^{۱۰}. این الگوریتم از سه دسته زنبورهای کارگر، ناظر و دیدهبان تشکیل شده است. در ابتدا، مجموعه‌ای از منابع غذایی به طور تصادفی انتخاب می‌شوند. زنبورهای

- 1) Equivalent Loss Factor
- 2) Loss of Load Expectation
- 3) Loss of Energy Expectation
- 4) Artificial Bee Colony

کارگر به منابع مراجعه کرده و میزان شهد آنها را محاسبه می‌کند. سپس این زبورها به کندو بازگشته و اطلاعات خود را با دیگر زبورها (ناظران) به اشتراک می‌گذارند. در مرحله دوم بعد از تبادل اطلاعات، هر زبور کارگر به سمت منبعی می‌رود که قبلاً دیده است و ممکن است بر اساس اطلاعات دیگری که از محیط می‌گیرد، یک منبع جدید در همسایگی منبع قبلی انتخاب کند. در مرحله سوم، ناظران با توجه به اطلاعاتی که از زبورهای کارگر در محل تجمع گرفته‌اند یک محدوده منبع غذایی را بر مبنای شهد آن ترجیح می‌دهند. زمانی که یک منبع تمام شود یا ترک شود، یک منبع جدید که توسط دیده‌بانان یافت شده است، جایگزین می‌شود. این چرخه تا برآورده شدن نیازها تکرار خواهد شد. در این مدل در هر چرخه حداقل یک دیده‌بان وجود دارد و تعداد زبورهای کارگر و ناظران برابر است. همان‌طور که گفته شد، هر کدام از زبورهای کارگر و یا ناظران ممکن است تغییراتی بر روی موقعیت منبع غذایی (راحل) در حافظه خود ایجاد کند و شایستگی آن را محاسبه نمایند. در صورتی که میزان شایستگی آن از راه حل قدیمی بیشتر باشد، راه حل جدید انتخاب می‌گردد و در غیر این صورت، همان راه حل قدیمی باقی می‌ماند. این تغییرات توسط رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\begin{cases} V_{ij} = X_{ij} + \varphi_{ij}(X_{ij} - X_{kj}) \\ i \neq k, k \in \{1, 2, \dots, BN\}, j \in \{1, 2, \dots, D\}, \varphi_{ij} \in [-1, 1] \end{cases} \quad (21)$$

در رابطه بالا، φ_{ij} یک عدد تصادفی در بازه $[10\% - 10\%]$ است. این متغیر تولید موقعیت منابع غذایی همسایه در اطراف i , X_i را کنترل می‌کند. در این رابطه، تعداد زبورهای کارگر و متغیر k به صورت تصادفی تولید می‌شود و با i متفاوت خواهد بود. بعد از اتمام فرایند جستجو، ناظران اطلاعات هر کدام از زبورهای کارگر را ارزیابی می‌کنند و با یک احتمال که متناسب است با میزان کیفیت شهد منبع، یکی از منابع غذایی را انتخاب می‌کنند. این احتمال از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$P_i = \frac{\tilde{fit}_i}{\sum_{n=1}^{SN} \tilde{fit}_n} \quad (22)$$

در این رابطه، \tilde{fit}_i میزان شایستگی منبع غذایی متناظر با زبور i و SN تعداد راه حل های موجود است.

تابع هدف مورد استفاده برای بهینه سازی

در روش پیشنهادی، خروجی الگوریتم اندازه‌یابی بهینه، تعداد پنل‌های PV ، تعداد توربین‌های WG ، تعداد باتری، توان پیل سوختی (FC)، توان الکترولیزر، ظرفیت تانک هیدروژن، توان ژنراتورهای برق‌آبی، توان اینورتر، تعداد باتری شارژرها و ارتفاع بهینه نصب توربین است. این مقادیر باید به گونه‌ای بهینه گردند که نهایتاً هزینه ۲۰ ساله سیستم برابر با کمترین

مقدار ممکن شود. هزینه کل سیستم $NPC(x)(\$)$ ، برابر با مجموع هزینه‌های سرمایه‌گذاری $C_c(x)(\$)$ و هزینه نگهداری $C_m(x)(\$)$ برای تک تک اجزای سیستم است. بنابراین،تابع معیار بهینه سازی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\min\{NPC\} = \min\{\sum_S NPC(S)\} \quad (23)$$

$$NPC(S) = N \times (Capital\ cost + (replacement\ Cost \times k)) \\ + \left(Operation\ & Maintenance\ Cost \times \frac{1}{CRF(ir, \pi)} \right)$$

که در آن:

$$S = \{hydro, PV, WG, Batt, FC, EL, M(Tank), INV, Batt-ch, h\}$$

بردار S به ترتیب شامل: میزان توان قابل استحصال از ژنراتور برق آبی، تعداد پنل‌های فتوولتائیک، تعداد توربین‌های بادی، تعداد باتری، توان پیل سوختی، توان الکترولیزر، ظرفیت تانک هیدروژن، توان اینورتر، تعداد باتری شارژر و ارتفاع بهینه نصب توربین‌های بادی است.

مقادیر CRF و K به ترتیب، ضریب بازگشت سرمایه و ارزش حال حاضر پرداختی می‌باشند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$y = \begin{cases} \left[\frac{R}{L} \right] - 1 & \text{if } R \text{ is dividable to } L \\ \left[\frac{R}{L} \right] & \text{if } R \text{ is not dividable to } L \end{cases} \quad (24)$$

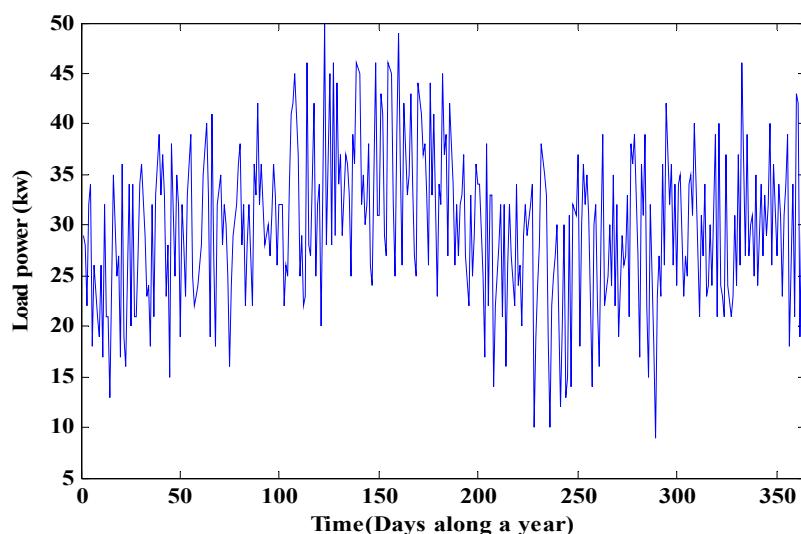
$$K = \sum_{n=1}^y \frac{1}{(1+ir)^{L \times n}}$$

$$CRF(ir, R) = \frac{ir(1+ir)^R}{(1+ir)^R - 1} \quad (25)$$

در رابطه فوق، ir نرخ تنزیل و R طول عمر مفید پروژه است.

مسئله بهینه‌سازی به بررسی توانایی یا عدم توانایی ترکیب بدست آمده برای سیستم و نیز بررسی میزان قابلیت اطمینان سیستم در پاسخ‌گویی به تقاضای مصرف‌کننده که در شکل ۶ نشان داده شده است، می‌پردازد. این قیود در همه

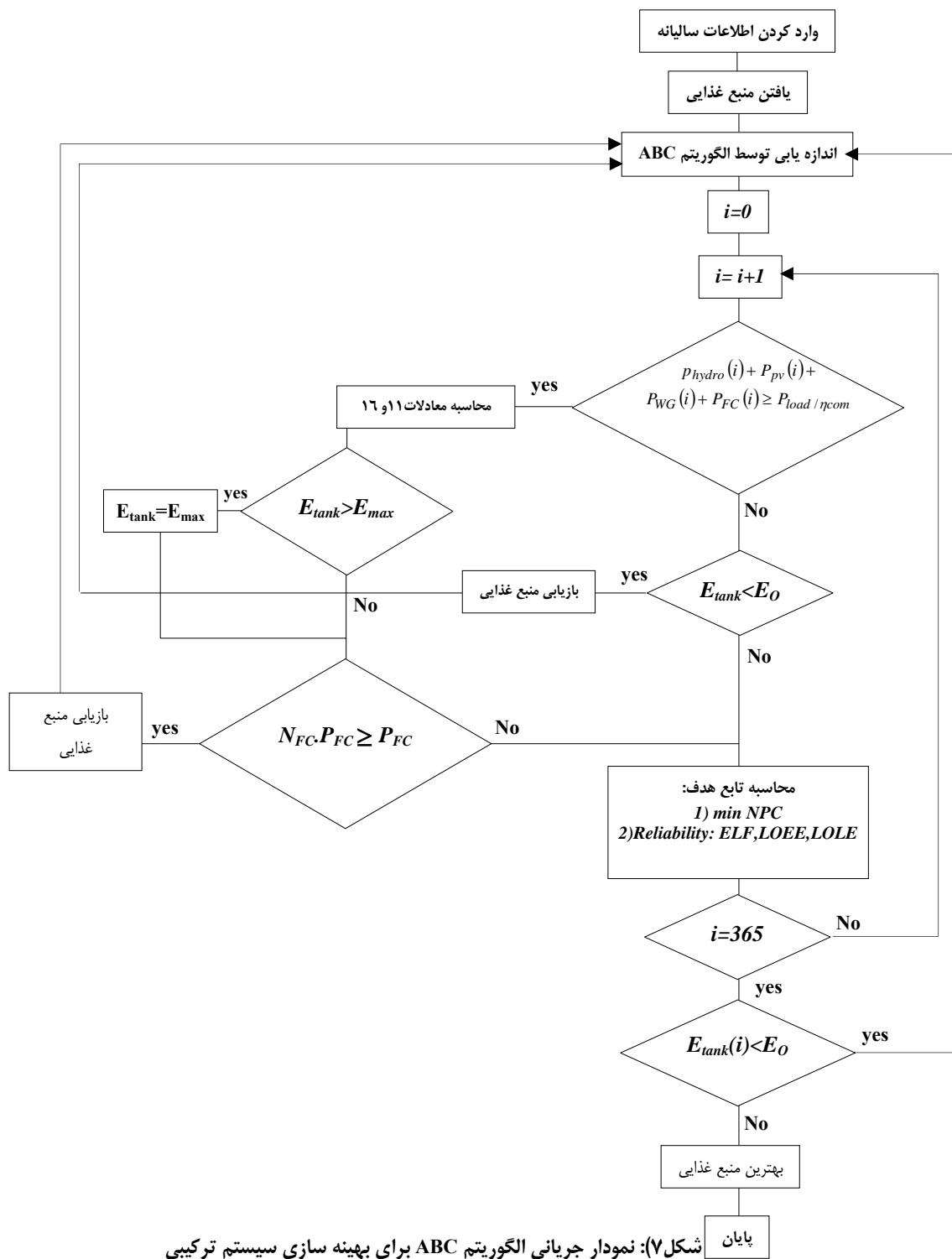
گام‌های شبیه‌سازی آزمایش شده و چنانچه حتی در یک گام اینا نشود، ترکیب بدست آمده نامناسب بوده و از میان طرح‌های ممکن حذف می‌شود. با توجه به مطالب ذکر شده، نمودار جریانی تهیه شده برای شبیه سازی سیستم ترکیبی در شکل ۷ نشان داده می‌شود.



شکل ۶): نمودار مصرف بار در طول سال

با توجه به شکل ۶ میزان اوج مصرف پمپ های آب مربوط به فصل تابستان است. لذا سیستم ترکیبی باید به گونه‌ای بهینه گردد تا قادر به تامین انرژی مورد نیاز ایستگاه در فصل آبیاری مزارع باشد. بر اساس مطالعات صورت گرفته، در این روزهای سال، منطقه دارای شرایط مناسبی به منظور نصب ژنراتور های برق آبی در مسیر کانال های انتقال آب و نیز دریافت مناسب انرژی خورشیدی و بادی به منظور نصب پنل های فتوولتایک و توربین های بادی و نهایتا تأمین مطمئن انرژی مورد نیاز ایستگاه در طول سال است.

تابع هدف مساله به صورت یک مدل ترکیبی بر اساس هزینه احداث نیروگاه و نیز قابلیت اطمینان سیستم پیشنهادی می‌باشد که در مساله بهینه سازی اعمال و بهترین ترکیب به دست آمده ادوات سیستم در کنار قابلیت اطمینان بالای سیستم، توسط الگوریتم ABC و نرم افزار بهینه سازی HOMER محاسبه و ارائه شده است.



نتایج شبیه سازی

به منظور یافتن ترکیب بهینه نیروگاه پیشنهادی از محیط برنامه نویسی MATLAB و نرم افزار HOMER استفاده شده است. برنامه فوق با جمعیت اولیه‌ای برابر با ۶۰ نفر و ۲۰۰ تکرار برای الگوریتم پیشنهادی انجام گرفت و ترکیب بهینه ارائه شده در جدول ۳ نشان داده شده است. اضافه کردن سیستم برق آبی کوچک به سیستم ترکیبی بادی و خورشیدی و هیدروژنی، نه تنها باعث بهبود قابلیت اطمینان کل سیستم شده بلکه هزینه کل احداث این نیروگاه (\$ ۴۵۶۵۶) کمتر از هزینه احداث نیروگاه بدون استفاده از سیستم برق آبی به دست آمده است. برای نشان دادن کارایی الگوریتم ABC جهت حل مساله، نتایج حاصل از آن با نرم افزار HOMER مقایسه شده است [۹]. اندازه یابی بهینه اجزای سیستم ترکیبی و هزینه احداث آن در شکل های ۸ و ۹ و جدول ۳ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصله، مشاهده می شود که کاهش هزینه احداث نیروگاه در کنار بهبود قابلیت اطمینان کل سیستم بعد از اضافه کردن سیستم برق آبی، از نتایج مشترک الگوریتم ABC و نرم افزار HOMER بوده است، ولی در الگوریتم ABC به دلیل دقیق بالای الگوریتم در محاسبه و یافتن نقاط بهینه، مقدار هزینه کل (NPC) سیستم هم در ترکیب بادی و خورشیدی و هیدروژنی و هم در سیستم ترکیبی برق آبی کوچک، بادی، خورشیدی و هیدروژنی دارای میزان کمتری نسبت به مقدار بدست آمده توسط نرم افزار HOMER بوده است.

جدول (۳): نتایج شبیه سازی

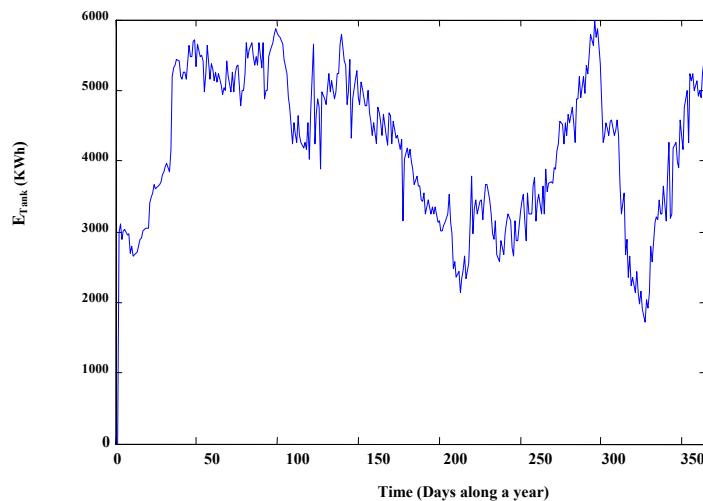
پارامتر		N _{PV}	N _{WG}	P _{FC} (kw)	P _{EL} (kw)	M _{Tank} (kg)	N _{Batt}	P _{Hydro} (kw)	P _{INV} (kw)	N _{Batt-ch}	h(m)	هزینه (\$)
نتایج الگوریتم ABC	بدون برق آبی	۱۱	۱۰	۸	۱۴	۹/۲۴	۲۲	-	۱۸	۳	۱۸	۲۶۸۱۸۹
	با برق آبی	۷	۹	۱۰	۱۳	۲۳/۶	۲۴	۱۲/۸	۱۶	۲	۱۷	۲۲۲۵۳۳

PV (kW)	XLR (kW)	fc (kW)	S6CS25P (kW)	Conv. (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	fc (hrs)	Batt. Lf. (yr)
12	9	10	45	16	5	12	\$ 235,583	3,934	\$ 271,288	0.284	1.00	23	12.0

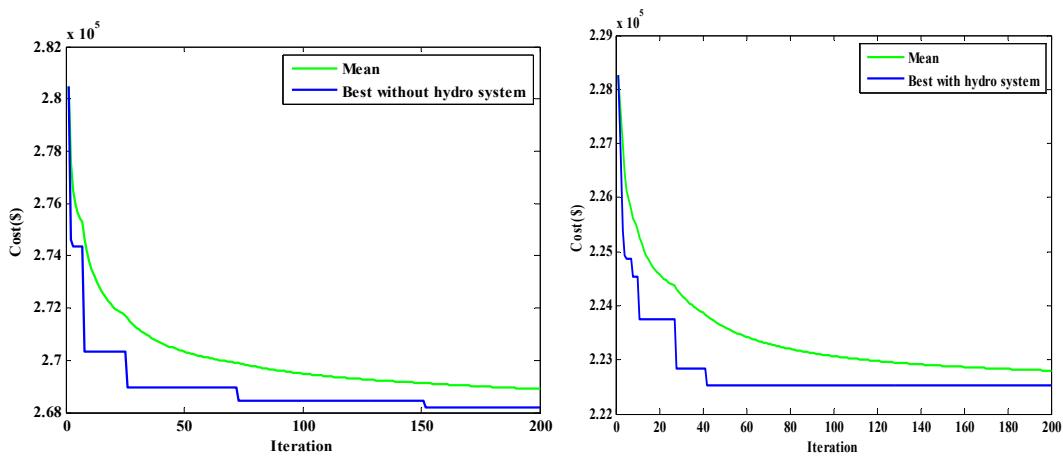
شکل ۸: (الف)- نتایج حاصل از نرم افزار HOMER (سیستم بادی، خورشیدی، هیدروژنی)

PV (kW)	XLR	Hydro (kW)	fc (kW)	S6CS25P	Conv. (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	fc (hrs)	Batt. Lf. (yr)
12	6	10.3	10	36	14	15	40	\$ 189,727	4,340	\$ 229,119	0.261	1.00	272	12.0

شکل ۸: (ب)- نتایج حاصل از نرم افزار HOMER (سیستم برق آبی، بادی، خورشیدی، هیدروژنی)



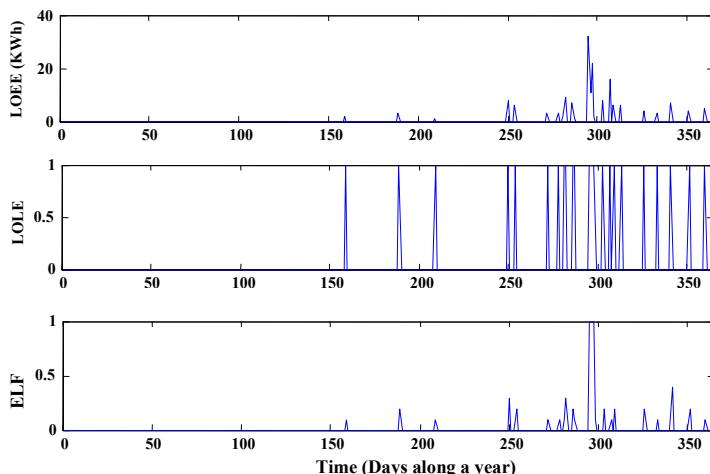
شکل ۹: ظرفیت هیدروژن ذخیره شده در تانک در طول سال



شکل ۱۰: روند همگرایی الگوریتم زنبور عسل برای دو سیستم، استفاده از برق آبی و بدون استفاده از برق آبی

با توجه به نتایج حاصله، هزینه تمام شده انرژی (COE)، در سیستم برق آبی، بادی، خورشیدی، هیدروژنی $\$261/\text{KWh}^0$ و در سیستم بادی، خورشیدی و هیدروژنی $\$284/\text{KWh}^0$ به دست آمده است. انرژی دریافتی از خورشید، در اوقات روز قابل دسترس می‌باشد. به همین دلیل، از انرژی حاصل از آن اکثراً جهت شارژ باتری‌ها، مصرف در ساعت‌های اوج بار و در مواقع مواجه با فقدان برق نیروگاه ترکیبی مواجه استفاده می‌شود. سیستم مورد بررسی با هدف تامین مطمئن‌بار در زمان اوج بار (۵۰ کیلووات) و با ترکیبی بهینه که منجر به دستیابی به حداقل هزینه احداث نیروگاه گردید، پیاده‌سازی می‌شود. برای ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم، شاخص‌های ELF، LOEE و محاسبه LOLE در شکل

۱۱ نشان داده شده است. ملاحظه می‌شود که قابلیت اطمینان سیستم بسیار مطلوب بوده و برای پیاده سازی طرح در منطقه مورد بررسی مناسب می‌باشد و در نمودارهای شکل ۱۱ نشان داده می‌شود. سیستم فوق با طول عمر ۲۰ ساله بوده و تمامی قیمت‌ها واقعی و براساس استانداردهای روز وارد مساله بهینه‌سازی می‌شود[۱۶۲]. طبق نمودارهای شکل ۱۱ شاخص ELF بدست آمده از ارزیابی سیستم، بسیار کمتر از حد مجاز آن است به طوری که تنها برای ۲ روز سال آن هم برای اوج میزان مصرف(۵۰ کیلووات)، سیستم قادر به تامین بار نمی‌باشد. لذا سیستم ترکیبی پیشنهادی دارای ضریب اطمینان بالایی به منظور تامین مطمئن بار در طول دوره یکساله محسوب می‌شود.



شکل (۱۱): قابلیت اطمینان سیستم ترکیبی

نتیجه‌گیری

هدف اصلی از ارائه ترکیب بهینه واحدهای بادی و خورشیدی و نیروگاه برق آبی کوچک و هیدروژنی، از یک سو، تامین مطمئن برق پمپ‌های آب تحت شرایط جوی متفاوت و از سوی دیگر، کاهش هزینه‌های احداث و بهره برداری از سیستم است. مطالعه انجام شده به بررسی دقیق هزینه‌های یک نیروگاه مستقل از شبکه طی مدت ۲۰ سال پرداخته است. در این مقاله، از اطلاعات مربوط به یکی از مناطق دور افتاده استان اردبیل(واقع در شمالغرب ایران) استفاده شده است. دبی آب خروجی از دریچه سد موجود در این منطقه 146 L/S محاسبه و بهترین ارتفاع ریزش آب در این منطقه 2 متر شناسایی شد که بهترین نقطه به منظور نصب ژنراتور برق آبی محسوب می‌شود. به منظور استفاده از نرم افزار HOMER، اطلاعات مربوط به دبی آب و شدت تابش خورشیدی و وزش باد، به صورت میانگین ماهانه در طول فرایند بهینه سازی به کار گرفته شده است. ضمن برخورداری از قابلیت اطمینان بالای سیستم پیشنهادی در طول فرایند بهینه سازی، هزینه احداث کل

نیروگاه ترکیبی برق آبی، بادی، خورشیدی و هیدروژنی، (\$(\$)) ۴۵۶۵۶ توسط الگوریتم ABC و (\$) ۴۲۱۶۹ در نرم افزار HOMER، کمتر از حالت بدون استفاده از سیستم برق آبی در ترکیب فوق به دست آمده که این به دلیل کمتر بودن هزینه خرید و نصب ژنراتورهای آبی در مقایسه با پنل های فتوولتائیک و توربین های بادی است. با توجه به نتایج حاصل از نرم افزار HOMER، هزینه تمام شده انرژی (COE(\$/KWh)) در سیستم برق آبی، بادی، خورشیدی، هیدروژنی \$/KWh ۲۶۱ و در سیستم بادی، خورشیدی و هیدروژنی \$/KWh ۲۸۴ به دست آمده است. بنابراین، اضافه کردن سیستم برق آبی علاوه بر کاهش هزینه کل احداث سیستم و افزایش قابلیت اطمینان سیستم، کاهش هزینه انرژی تولیدی را نیز به دنبال دارد. قیدی که در روند حل مساله همواره مورد بررسی قرار گرفته، پوشش کامل بار پمپ های آب و بهبود قابلیت اطمینان سیستم در طول سال بوده است. نتایج حاصل از بهینه سازی سیستم می تواند در منطقه مورد مطالعه پیاده سازی شده و با اجرای طرح نیروگاه ترکیبی بادی و خورشیدی و هیدروژنی و برق آبی کوچک در این سایت ضمن تأمین الکتریسیته لازم از منابع تجدیدپذیر و دائمی، آلودگی زیست محیطی ناشی از استفاده از سوخت های فسیلی رو به پایان را کاهش داد.

پیوست

جدول (۲): مشخصات فنی تجهیزات بکار رفته در سیستم [۱۶]

تجهیزات	هزینه سرمایه گذاری (\$/unit)	هزینه جایگزینی (\$/unit)	هزینه سالانه (تعییر و نگهداری) \$/unit-yr	طول عمر (yr)	قابلیت دسترسی (%)	بازده (%)
سیستم برق آبی	۶۰۰۰	۲۰۰۰	۱۰۰	۲۰	--	۶۰
PV پنل های	۷۰۰۰	۶۰۰۰	۲۰	۲۰	۹۶	--
توربین های بادی WG	۱۹۴۰۰	۱۵۰۰۰	۷۵	۲۰	۹۶	--
الکتروولیزر	۲۰۰۰	۱۵۰۰	۲۵	۲۰	۱۰۰	۷۵
タンک هیدروژن	۱۳۰۰	۱۲۰۰	۱۵	۲۰	۱۰۰	۹۵
پیل سوختی	۳۰۰۰	۲۵۰۰	۱۷۵	۵	۱۰۰	۵۰
DC/AC اینورتر	۸۰۰	۷۵۰	۸	۱۵	۹۹/۸۹	۹۰

منابع

- [۱] عنایتی، عباسعلی، کاظم نژاد، سید محمد. مرادی، سید حسین. محسنی، حسین. (۱۳۸۷)، بکارگیری نیروگاه برق آبی کوچک در مازندران، عاونت نظارت بر توزیع شرکت برق منطقه‌ای مازندران.
- [۲] کاشفی کاویانی، علی. بقایی، حمیدرضا. ریاحی، غلامحسین. (۱۳۸۷)، اندازه‌یابی بهینه یک نیروگاه مختلط بادی—خورشیدی با استفاده از الگوریتم PSO، آزمایشگاه تحقیقاتی انرژی باد، قطب علمی قدرت، دانشکده مهندسی برق دانشگاه صنعتی امیرکبیر.
- [۳] Abedi S. Ahangar H.G. Nick M. Hosseini S.H. 1995. "Economic and reliable design of a hybrid PV-wind-fuel cell energy system using differential evolutionary algorithm", In Proceeding of IEEE International Conference on Neural Networks, Perth, Australia, Vol. 4, pp. 1942-1948.
- [۴] Belfkira R. Barakat G. Nicolas T. Nichita C. 2010."Design study and optimization of a grid independentwind/pv/dieselsystem".University of Le Havre 25, rue Philippe Lebon, BP 540,france.
- [۵] Diaf S. 2008. "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various meteorological conditions", Applied Energy ,Vol.10, pp.968–987.
- [۶] Dehghan S. Saboori H. Parizad A. Kiani B. 2009. "Optimal sizing of a hydrogen-based wind/pv plant considering reliability indices", IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 20, pp. 654–660.
- [۷] El-Sharkh M. Y. Tanrioven M. Rahman A. Alam M. S. 2006. "Cost related sensitivity analysis for optimal operation of a grid-parallel PE fuel cell power plant" ,Journal of Power Sources Vol.16, pp. 1198–1207.
- [۸] El-Shatter T. F. Eskander M. N. El-Hagry M. T. 2006. "Energy flow and management of a hybrid wind/PV/fuel cell generation system" ,Energy Conversion and Management ,Vol.47, pp. 1264–1280.
- [۹] Ghosh G.C, Emonts B. Stolen D. 2003. "Comparison of hydrogen storage with diesel generator system in a PV/WEC hybrid system", Solar Energy, Vol.75, pp.187–98.
- [۱۰] Juhari R. Kamarazzuman S. Yousoff A. 2009."Optimization of PV-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity ".European Journal of Scientific Research, , I Vol.25 No.4 .
- [۱۱] Kashefi Kaviani A. Riahy G.H. Kouhsari SH.M. 2009."Optimal design of a reliable hydrogen-based stand-alone wind/PV generating system, considering component outages", Renewable Energy ,Vol.34, pp.2380–2390.
- [۱۲] Karaboga D. Akay B. 2009." A comparative study of Artificial Bee Colony algorithm",Journal of Mathematics and Computation ,Vol.21, pp.108–132.
- [۱۳] Kenfack J. Neirac F.P. Tatietse T. Mayer D. Fogue M.d. Lejeune A. 2009. "Microhydro-PV hybrid system: Sizing a small hydro-PV-hybrid system for rural electrification in developing countries", Renewable Energy Vol.34, pp.2259–2263.

- [14] Krause P.C. Wasynczuk O. Sudhoff S. D. 2002,"Analysis of electric Machinery and drive systems", IEEE Press Power Engineering Series, pp 141-187.
- [15] Kusakana K. Handa J.L. Jimoh A.A. 2009."Feasibility study of a hybrid PV-Micro Hydro system for rural electrification", South Africa,IEEE Africon.
- [16] Mostofi F. Javadi M. Ghezeli G. Shayeghi H. Javidan J. 2012, "Modeling and design of hybrid renewable energy sources for rural electrification", 17 th Electric Power Distribution Conference (EPDC) ,Tehran, Iran, May 12-13.
- [17] Razak J.A. Sopian K. Ali Y. 2009. "Optimization of PV-Wind-Hydro-Diesel Hybrid System by Minimizing Excess Capacity ",European Journal of Scientific Research, Vol.25, pp.119-136.
- [18] Strunz K. Brock E. K. 2006. "Stochastic energy source access management: infrastructure-integrative modular plant for sustainable hydrogen electric cogeneration" International Journal of Hydrogen Energy,Vol.31, pp. 1129–1141.