

## مدیریت توان در سیستم های تولید توان ترکیبی برپایه نیروگاه های خورشیدی-بادی و دیزل ژنراتور در شبکه های توزیع تجدیدساختار با استفاده از توابع فازی

محمد عابدینی\*

دانشکده فنی و مهندسی، گروه برق، دانشگاه آیت الله بروجردی، بروجرد، ایران

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۲/۲۱

نوع مقاله: علمی-پژوهشی

**چکیده.** تقاضای رو به رشد برای برق قابل اطمینان و پایدار منجر به افزایش علاقه به سیستم های هیبریدی فتولتائیک-بادی-دیزلی برپایه منابع تولید پراکنده شده است. این سیستم ها منابع انرژی تجدیدپذیر را با منابع تولید پراکنده ترکیب می کنند تا برق، به ویژه در مناطق دور افتاده یا ریزشکه ها را تامین کنند. با این حال، بهینه سازی عملکرد چنین سیستم هایی برای به حداکثر رساندن مزایای آنها و دستیابی به تعادل بین هزینه، قابلیت اطمینان و اثرات زیست محیطی بسیار مهم است. از این رو در این مقاله یک روش بهینه سازی چند هدفه برای کاهش هزینه های تولید انرژی، بهبود سطح ولتاژ شبکه با توجه به تغییرات توان نیروگاه های تجدیدپذیر و در نهایت افزایش قابلیت اطمینان شبکه با هدف کاهش میزان قطعی بارهای شبکه مدل سازی شده است. هم چنین با توجه به ساختار متفاوت توابع هدف، از روش فازی جهت فازی کردن توابع هدف استفاده (ادامه دارد)

شده است و روش بهینه سازی استفاده شده بر پایه یک الگوریتم بهینه سازی فرا ابتکاری به نام بهینه سازی چند وجهی است که از رفتار به وجود آمدن ستاره های جدید الهام گرفته شده است. در نهایت نتایج بر روی شبکه تست ۳۳ باس در حالت جزیره ای استاندارد IEEE پیاده سازی می شود.

## ۱. مقدمه

در تلاش ما برای یک آینده با انرژی پایدار و قابل اعتماد، سیستم های قدرت هیبریدی که منابع انرژی تجدیدپذیر مانند **خورشیدی**<sup>۱</sup> و باد را با ژنراتورهای دیزلی سنتی ترکیب می کنند، در حال افزایش هستند. سیستم های **ترکیبی انرژی های تجدیدپذیر**<sup>۲</sup> با پیوستن به چندین سیستم قدرت برای افزایش عملکرد و کارایی سیستم طراحی شده اند. این سیستم ها چندین مزیت دارند [۱]: کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی؛ با یکپارچه سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، سیستم های هیبریدی می توانند وابستگی به گازوئیل و اثرات زیست محیطی مرتبط با آن را به میزان قابل توجهی کاهش دهند. افزایش قابلیت اطمینان: منابع بادی و خورشیدی می توانند مکمل یکدیگر باشند و زمانی که یک منبع کمتر در دسترس است، به صورت پشتیبان برای منبع دیگر عمل کند. این امر قابلیت اطمینان کلی سیستم را به ویژه در مناطق دورافتاده با دسترسی محدود به شبکه بهبود می بخشد. مقرون به صرفه بودن: در حالی که هزینه های سرمایه گذاری اولیه برای منابع انرژی تجدیدپذیر ممکن است بیشتر باشد، صرفه جویی عملیاتی بلند مدت ناشی از کاهش مصرف سوخت دیزل می تواند قابل توجه باشد [۲]. با این حال، بهینه سازی عملکرد سیستم ترکیبی بادی-خورشیدی و دیزلی برای به حداکثر رساندن مزایای آن بسیار مهم است. شرکت های برق در حال به روز رسانی روش های برنامه ریزی برای ارائه توان الکتریکی بدون وقفه، بدون اعوجاج، پایدار و ارزان تر برای مصرف کنندگان هستند [۳]. چندین الگوریتم بهینه سازی را می توان برای یافتن بهترین استراتژی عملیاتی برای یک سیستم ترکیبی استفاده کرد. در اینجا چند نمونه آورده شده است **برنامه ریزی خطی (LP)**<sup>۳</sup>: این تکنیک برای حل مسائل با توابع هدف خطی و محدودیت ها موثر است [۴]. **برنامه نویسی پویا (DP)**<sup>۴</sup>: این رویکرد مسئله بهینه سازی را به مراحل کوچکتر و مدیریت مناسب تر تقسیم می کند و آن را برای سیستم های پیچیده با عوامل متغیر زمان مناسب می کند [۵]. الگوریتم های فراابتکاری: این روش ها از رویکردهای تکراری برای یافتن راه حل های تقریباً بهینه که از نظر محاسباتی کارآمد

<sup>1</sup>Photovoltaic (PV)

<sup>2</sup>Hybrid renewable energy systems (HRS)

<sup>3</sup>Linear programming (LP)

<sup>4</sup>Dynamic programming (DP)

هستند، استفاده می‌کنند. به عنوان مثال می‌توان به الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام زنبور [۶]، بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) [۷] و الگوریتم ژنتیک [۸] (GA) اشاره کرد. در ادامه نگاهی به برخی مقالات در زمینه بهینه‌سازی سیستم‌های انرژی ترکیبی می‌اندازیم: در [۸] تجزیه و تحلیل فنی-اقتصادی یک سیستم HRS را برای یک روستای معمولی در مالزی مورد مطالعه قرار دادند. آنها سیستم را با استفاده از الگوریتم ژنتیک (GA) برای به حداقل رساندن هزینه انرژی بهینه می‌کنند. آنها همچنین یک تحلیل حساسیت را برای مشاهده اثرات پارامترهای ورودی بر روی هزینه انرژی گزارش کردند. در [۹] یک سیستم هیبریدی با باتری تجزیه و تحلیل شده است و نتایج نشان می‌دهد که سیستم مبتنی بر HRS هزینه کمتری نسبت به سیستم‌های خانگی بر پایه خورشیدی موجود دارد و قادر است تقاضای بار جامعه را با قابلیت اطمینان بالا برآورده کند. در [۱۰]، یک تکنیک جدید بهینه‌سازی به نام bonobo برای یافتن طراحی بهینه برای یک HRS خارج از شبکه که شامل یک منابع تولید پراکنده، PV، توربین بادی و باتری‌ها به عنوان یک سیستم ذخیره‌سازی است، استفاده شده است. تابع هدف ارائه شده بر اساس به حداقل رساندن هزینه سالانه سیستم و افزایش قابلیت اطمینان سیستم می‌باشد. یک روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات (MOPSO) در [۱۱] پیشنهاد شد که به مسئله بهینه‌سازی شامل کمیته‌سازی هزینه و تامین بار برای یک سیستم HRS می‌پردازد و بر روی سه ایستگاه منتخب در ایران آزمایش شده است. در [۱۲] از استراتژی پخش بار برای تجزیه و تحلیل عملکرد HRS های پیشنهادی برای یافتن تنظیمات بهینه استفاده کرده است. هر استراتژی مؤلفه‌های خاصی را پیشنهاد می‌کرد که با بقیه متفاوت بود و شبیه‌سازی برای یک منطقه خاص پیاده شده است. مطالعات بسیاری نیز از نرم افزار HOMER برای بررسی طراحی بهینه HRS های پیشنهادی با استفاده از استراتژی‌های برپایه بار استفاده کرده‌اند [۱۳-۱۵]. در [۱۶] قابلیت اقتصادی یک سیستم HRS خارج از شبکه را برای برق رسانی در روستاهای آفریقا تحلیل کرده است. نتایج نشان داد که سیستم‌های دیزل و PV از نظر اقتصادی مقرون به صرفه‌ترین وسیله برق رسانی روستایی در آفریقا هستند. در مرجع [۱۷]، حداقل هزینه سالانه به عنوان تابع هدف معرفی شده است و تعداد منابع مختلف برق به عنوان متغیر، و توان باتری و انتشار آلودگی به عنوان محدودیت در نظر گرفته شده است. از الگوریتم ژنتیک (GA) برای حل پیکربندی بهینه‌سازی مسئله پیشنهادی استفاده می‌شود. در [۱۸] ابعاد بهینه یک سیستم HRS مستقل را تحت محدودیت حداقل هزینه تولید برق تعیین کرده‌اند و بر این اساس مقایسه‌ای با سیستم‌های فقط دیزلی ارائه شده است. در [۱۹] سیستم هیبریدی باد / دیزل / باتری / PV را از نظر ملاحظات اقتصادی و زیست محیطی ارزیابی کرده است.

نتایج نشان داد که سیستم هیبریدی باد / دیزل / باتری / PV می تواند هزینه انرژی را تا حدود ۷۵ درصد کاهش دهد. علاوه بر این، انتشار گازهای گلخانه ای را می توان تا حدود ۲۵ درصد در مقایسه با سیستم های قدرت دیزلی کاهش دهند.

در [۲۴] روشی را برای به حداقل رساندن تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ شبکه های توزیع با بازآرایی شبکه و قراردادن بهینه خازن با استفاده از الگوریتم های فرا ابتکاری فاخته و فرهنگی ارائه می کند. این مقاله با استفاده از تکنیک باز و بسته کردن کلیدهای شبکه توزیع، ساختار شبکه توزیع را به گونه ای تغییر می دهد که در ابتدا تمامی کلیدها بسته شوند. سپس یکی یکی باز می شوند و هر حالت کمترین تلفات را داشته باشد این حالت به عنوان بهترین توپولوژی انتخاب می شود. در [۲۵ و ۲۶]، تجزیه و تحلیل تقاضاهای پیک و بارگذاری مختلف بار شبکه را برای بهینه سازی بازآرایی، جایابی خازن و منابع تولید پراکنده برای کاهش تلفات به طور هم زمان ارائه می کنند. در این مطالعه بهینه سازی ریزشبکه جزیره ای برای مینیمم سازی هزینه انرژی منابع انرژی و نیز بهبود سطح ولتاژ در حضور منابع HRS به علاوه افزایش قابلیت اطمینان سیستم هدف گیری شده است که با تعیین تعداد و ظرفیت مناسب منابع HRS به دست می آید. برای حل مسئله پیشنهاد شده نیز با توجه به اینکه تابع هدف پیشنهادی دارای سه ترم می باشد و روش های فرا ابتکاری موجود ممکن است در نقطه بهینه محلی قرار بگیرند بنابراین از روش الگوریتم بهینه سازی چند نظمی استفاده شده است، هم چنین توابع هدف به صورت فازی مدل سازی شده اند تا بتواند جواب مناسب مسئله را که در واقع بهترین جواب مسئله بهینه سازی می باشد را پیدا کند. پخش های ادامه مقاله عبارت اند از: در قسمت دوم مدل سازی منابع HRS آورده شده است. توابع هدف و روش فازی سازی آن ها در بخش سوم نمایش داده شده است. معرفی روش حل مسئله پیشنهاد شده بر پایه روش بهینه سازی چند نظمی در بخش چهارم بیان می گردد و در بخش پنجم نتایج شبیه سازی بحث خواهد شد.

## ۲. مدل سازی یک سیستم هیبریدی شامل خورشیدی-بادی-دیزل (HRS)

یک مدل دقیق سیستم برای بهینه سازی عملکرد یک سیستم HRS بسیار مهم است. این مدل به صورت ریاضی رفتار هر بخش و نحوه تعامل آنها در سیستم را نشان می دهد. در اینجا یک تفکیک از عناصر مورد مطالعه آورده شده است:

۱.۲. مدل سیستم های خورشیدی. این مدل باید توان خروجی سیستم PV را بر اساس داده های تابش خورشیدی نشان دهد که به صورت زیر معرفی می گردد [۲۰]:

$$P_{PV}(t) = y_{PV} f_{PV} \left( \frac{i_t(T)}{i_s} \right) [1 + \alpha_p (T_c - T_s)] \quad (1)$$

که در آن  $y_{PV}$  خروجی توان نامی ماژول PV (کیلووات) است.  $f_{PV}$  به عنوان عامل کاهش در توان شناخته می شود که برحسب درصد می باشد،  $i_t(T)$  شدت تابش خورشید بر روی پنل خورشیدی برحسب  $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$  می باشد،  $i_s$  شدت تابش استاندارد برحسب  $\left(\frac{kW}{m^2}\right)$ ،  $\alpha_p$  ثابت دمایی از توان بر حسب درصد می باشد،  $T_c$  دمای سلول ماژول PV و  $T_s$  دمای سلول ماژول PV در شرایط استاندارد (۲۵ درجه سانتیگراد) است. توان تولید شده توسط N تعداد ماژول های خورشیدی برابر خواهد بود با:

$$p_{PV}(t) = N_{PV} \times P_{PV}(t) \quad (2)$$

۲.۲. مدل توربین بادی. رابطه بین خروجی توربین بادی و سرعت باد را می توان با فرمول زیر بیان کرد [۲۱]:

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ or } v > v_{co} \\ P_n & v_r < v < v_{co} \\ P_n \frac{v^3 - v_{ci}^3}{v_n^3 - v_{ci}^3} & v_{ci} < v < v_n \end{cases} \quad (3)$$

که در آن  $v_{co}$ ،  $v_{ci}$ ،  $v_n$  به ترتیب حداقل سرعت باد، حداکثر سرعت باد و سرعت باد نامی برحسب (m/s) می باشند،  $P_n$  توان نامی برحسب کیلووات است. توان تولید شده توسط N تعداد توربین بادی در زمان  $t$  برابر خواهد بود با:

$$p_{WT}(t) = N_{WT} \times P_{WT}(t) \quad (4)$$

۳.۲. مدل شارژ و دشارژ باتری. حالت شارژ باتری (SOC) با توجه به محاسبات بهره وری و زمان مصرف، بدین ترتیب به دست می آید:

$$soc(t) = (1 - \eta) soc(t - 1) + P_{bat}(t) \times \Delta(t) \times \eta_c / E_c \quad (5)$$

همچنین به روش مشابه برای فرآیند دشارژ باتری از رابطه (۶) استفاده می شود:

$$soc(t) = (1 - \eta) soc(t - 1) + \frac{P_{bat}(t) \Delta(t)}{\eta_d E_c} \quad (6)$$

که در آن  $SOC(t)$  و  $SOC(t-1)$  به ترتیب SOC در ابتدا و انتهای بازه  $t$  هستند.  $\eta$  نرخ تخلیه باتری است.  $P_{bat}$  قدرت شارژ و دشارژ برحسب  $kW$  است، اگر  $0 < P_{bat}$ ، باتری در حال شارژ است، در غیر این صورت در حال تخلیه است [۲۲]؛  $\eta_c$  و  $\eta_d$  به ترتیب بازده شارژ و تخلیه باتری هستند.  $Ec$  ظرفیت نامی بر حسب کیلووات ساعت است.

#### ۴.۲. مدل منبع تولید پراکنده از نوع دیزل ژنراتور. مصرف سوخت دیزل ژنراتور، به

توان خروجی بستگی دارد و با معادله زیر تعریف می شود:

$$\gamma_f = \sum_{t=1}^{time} P_{DG} \times K \quad (7)$$

در این رابطه  $P_{DG}$  بیان کننده توان خروجی منبع دیزل ژنراتور در زمان  $t$  می باشد و  $K$  نیز نرخ مصرف سوخت ژنراتور خواهد بود.

#### ۳. مدل سازی توابع هدف

در این قسمت مدل ریاضی از توابع هدف مسئله ارائه می گردد که شامل مینیم سازی هزینه انرژی منابع  $HRS$ ، مینیم سازی قطع برق مشترکین و مینیم سازی ظرفیت نفوذ منابع  $HRS$  در شبکه می باشد به علاوه قیود تساوی و نامساوی حاکم بر مسئله بهینه سازی نیز آورده شده است. متغیرهای حاکم بر مسئله بازاریابی سیستم نیز شامل تعداد منابع  $HRS$  و تعداد باتری ها خواهد بود. برای یک مسأله بهینه سازی چندهدفه، یک جواب بهینه جوابی است که هیچ یک از مؤلفه هایش نمی توانند بهبود یابند مگر این که حداقل یکی دیگر از مؤلفه هایش بدتر شود. به این تعریف اغلب بهینگی پارتو گویند. در مسائل بهینه سازی معمولی فرض می کنیم همه ضرایب در توابع به صورت قطعی باشند. اما در واقعیت به دلیل این که تصمیم گیرنده اطلاعات دقیقی در دست ندارد یا نمی تواند آن ها را به صورت قطعی بیان کند، معمولاً این مسائل را به صورت فازی بیان می کنند. در این مقاله توابع هدف به صورت فازی مدل سازی شده است تا بتوان بازه گسترده تری از متغیرها را مورد مطالعه قرار داد و نیز بتوان توابع هدف را که به صورت غیرخطی می باشند را بدین روش خطی نمود به علاوه با توجه به بعد مختلف توابع هدف، با به کارگیری توابع فازی آن ها را در واقع به صورت بی بعد مورد استفاده قرار می دهیم.

#### ۱.۳. تابع هدف مینیم سازی هزینه انرژی منابع $HRS$ . عوامل تصمیم گیری برای

پیکربندی مینیم سازی هزینه انرژی  $HRS$  تعداد منابع تولید پراکنده، تعداد ماژول های فتوولتائیک، توربین بادی و باتری ها هستند. هزینه سالانه شامل هزینه سرمایه سالانه  $C_{cap}$ ،

هزینه نگهداری  $C_{mnt}$ ، هزینه جایگزینی  $C_{rep}$  است. تابع هدف زیر برای دستیابی به پیکربندی سیستم بهینه استفاده می شود [۲۳]:

$$obj Cost = C_I + C_R + C_M + C_F \quad (۸)$$

$$C_I = N_{PV}C_{PV} + N_{WT}C_{WT} + N_{bat}C_{bat} + N_{DG}C_{DG} \quad (۹)$$

$$C_R = N_{bat}C_{bat} \quad (۱۰)$$

$$C_M = (N_{PV}C_{PV_r} + N_{WT}C_{WT_r} + N_{DG}C_{DG_r})L_f \quad (۱۱)$$

$$C_F = L_f \times \gamma_f \times \beta \quad (۱۲)$$

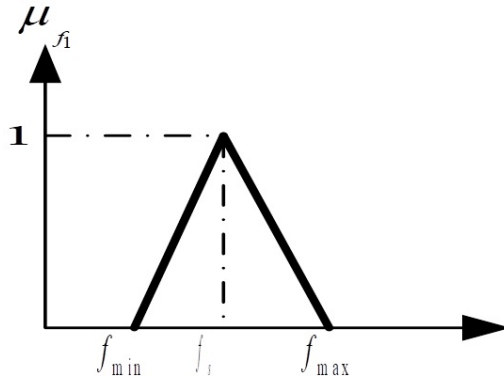
در این معادلات، هزینه خرید  $C_I$ ، هزینه تعویض  $C_R$ ، هزینه نگهداری  $C_M$  و هزینه سوخت  $C_F$  می باشد.  $N_{WT}$  و  $N_{PV}$  به ترتیب تعداد PV و WT هستند؛  $C_{DG}$ ،  $C_{bat}$ ،  $C_{WT}$ ،  $C_{PV}$  قیمت PV، WT، باتری، منابع تولید پراکنده هستند. اگر عمر WT، PV و منابع تولید پراکنده ۲۰ سال باشد، طول عمر سیستم می شود،  $L_f$  طول عمر سیستم است.  $C_{PV_r}$ ،  $C_{WT_r}$ ،  $C_{DG_r}$  هزینه تعمیر و نگهداری منابع تولید پراکنده، PV و WT هستند.  $\gamma_f$  قیمت سوخت است. به منظور تبدیل هزینه سرمایه اولیه ( $P$ ) به هزینه سرمایه سالانه ( $A$ )، ضریب بازیافت سرمایه ( $CRF$ ) که توسط معادله (۱۳) تعریف شده است. استفاده می شود.

$$CRF = \frac{A}{P} = \frac{j(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (۱۳)$$

در این معادله  $n$  نشان دهنده طول عمر و  $j$  نرخ بهره سیستم است. در این مقاله طول عمر منابع HRS بیست سال در نظر گرفته شده است. در نرم افزار HOMER همیشه سیستم هایی را که محدودیت ها را برآورده می کنند بر اساس میزان هزینه متوسط تحویل انرژی ( $COE$ ) سطح بندی شده دسته بندی می کند و این یک امتیاز اقتصادی برای HRS است.  $COE$  (\$/kWh) را می توان به صورت زیر محاسبه کرد:

$$COE = \frac{obj Cost}{load\ served} \quad (۱۴)$$

در این مطالعه مینیم سازی هزینه انرژی HRS به عنوان یک تابع هدف فازی معرفی می گردد که در شکل (۱) نمایش داده شده است.



شکل ۱: تابع هدف فازی برای مینیمم سازی هزینه انرژی HRS

به منظور فازی سازی معادله (۱۵) از رابطه (۱۶) استفاده شده است:

$$f_1 = \frac{obj_{optimized}}{obj_{base}} \tag{15}$$

$$\mu_{f_1} = \begin{cases} 0 & f_1 < f_1^{min} \\ \frac{f_1 - f_1^{min}}{f_s - f_1^{min}} & f_1^{min} < f_1 < f_s \\ \frac{f_1^{max} - f_1^{min}}{f_1^{max} - f_s} & f_s < f_1 < f_1^{max} \\ 0 & f_1 > f_1^{max} \end{cases} \tag{16}$$

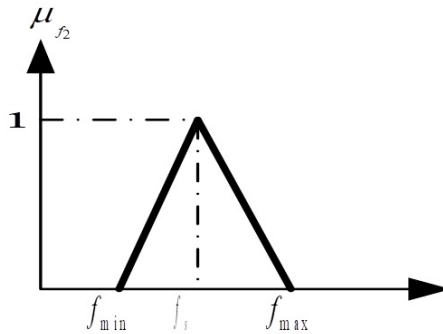
۲.۳. تابع هدف بهبود سطح ولتاژ در حضور منابع HRS. باد و خورشید از منابع تجدیدپذیر متغیر هستند. توان خروجی آنها به شرایط آب و هوایی بستگی دارد که منجر به نوسانات در سطوح ولتاژ در شبکه می شود. این می تواند باعث کاهش ولتاژ یا افزایش ولتاژ بسته به تزریق آنی توان شود. [۲۴]، بر خلاف منابع تولید سنتی قابل توزیع (به عنوان مثال، نیروگاه های حرارتی)، خروجی HRS را نمی توان به طور مستقیم در صورت تقاضا کنترل کرد. این امر حفظ سطوح ولتاژ ثابت را چالش برانگیزتر می کند. ادغام سیستم های ذخیره انرژی با HRS می تواند به کاهش تغییرات توان خروجی آنها کمک کند. انرژی ذخیره شده را می توان در طول دوره های تولید HRS پایین به شبکه تزریق کرد تا سطوح ولتاژ حفظ شود. هم چنین حضور دیزل ژنراتور نیز می تواند در تثبیت ولتاژ موثر باشد. در این قسمت

تابع هدف تنظیم ولتاژ برای هدایت فرآیند بهینه سازی فرموله شده است. هدف این تابع به حداقل رساندن انحرافات ولتاژ می باشد که با تغییرات خروجی HRS و یا دیزل ژنراتور به دلیل محدودیت های ولتاژ صورت می پذیرد.

$$V.R = \sum_{n=1}^{n_{bus}} \| 1 - V_n \| \quad (17)$$

در رابطه (۱۷)،  $V_n$  بیان کننده ولتاژ باس  $n$  می باشد.  $n_{bus}$  تعداد باس شبکه می باشد. به منظور فازی سازی معادله (۱۷) از رابطه (۱۸) استفاده شده است:

$$\mu_{f_2} = \begin{cases} 0 & f_2 < f_2^{min} \\ \frac{f_2 - f_2^{min}}{f_s - f_2^{min}} & f_2^{min} < f_2 < f_s \\ \frac{f_2^{max} - f_2^{min}}{f_2^{max} - f_s} & f_s < f_2 < f_2^{max} \\ 0 & f_2 > f_2^{max} \end{cases} \quad (18)$$



شکل ۲: تابع هدف فازی برای مدل سازی تنظیم ولتاژ سیستم

۳.۳. ارزیابی قابلیت اطمینان سیستم. اطمینان از قابلیت اطمینان سیستم یکی از اهداف کلیدی فرآیند بهینه سازی از HRS است. در این مطالعه، ما قابلیت اطمینان را با استفاده از شاخص احتمال از دست دادن منبع تغذیه (LPSP) ارزیابی می کنیم. LPSP با تقسیم کل

مدت زمان خرابی منبع انرژی بر کل دوره مورد مطالعه، که به صورت درصد بیان می شود، محاسبه می شود [۲۵]، معیار ارزشمندی از قابلیت اطمینان سیستم را ارائه می دهد.

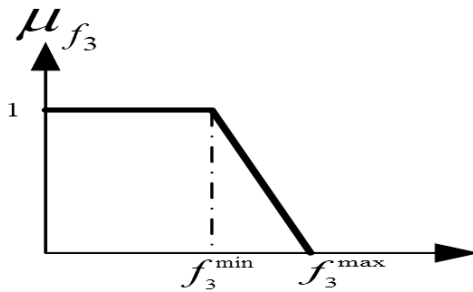
$$LPSP = \sum_{t=1}^T \frac{P_{HSR,t} < P_{Load}}{T} \quad (19)$$

از فرمول زیر می توان برای محاسبه LPSP کل شبکه توزیع استفاده کرد:

$$f_3 = \frac{\sum_{i=1}^{n_{bus}} LPSP_{optimized}}{\sum_{i=1}^{n_{bus}} LPSP_{base}} \quad (20)$$

$f_3$  نیز تابع هدف شاخص احتمال از دست دادن منبع تغذیه می باشد. به منظور فازی سازی معادله (۲۰) از رابطه (۲۱) استفاده شده است که در شکل (۳) نمایش داده شده است:

$$\mu_{f_3} = \begin{cases} 1 & f_3 < f_3^{min} \\ \frac{f_3 - f_3^{min}}{f_s - f_3^{min}} & f_3^{min} < f_3 < f_3^{max} \\ 0 & f_3 > f_3^{max} \end{cases} \quad (21)$$



شکل ۳: تابع هدف فازی برای مدل سازی انرژی تأمین نشده در حضور منابع تولید پراکنده

در رابطه (۲۱)  $\mu_{f_3}$  تابع عضویت فازی برای انرژی تأمین نشده در حضور منابع تولید پراکنده می باشد.

۴.۳. قیود حاکم بر مسئله بهینه سازی. در اینجا محدودیت های تابع هدف موجود که باید در معادلات پخش بار لحاظ گردد آورده شده است:

۱.۴.۳. محدودیت ولتاژ باس‌ها. مطالعات نشان می‌دهد که بیشتر نوسانات و قطعی ولتاژ در سیستم به شبکه توزیع نسبت داده می‌شود. با این حال، می‌توان با طراحی صحیح شبکه توزیع بر این امر غلبه کرد؛ بنابراین، ولتاژ باید در محدوده عملیاتی حفظ شود.

$$V_{min} < V < V_{max} \quad i = 1, \dots, n_{bus} \quad (22)$$

۵.۳. محدودیت جریان شاخه‌ها. جریان عبوری از هر شاخه نباید از حداکثر حد مجاز جریان انشعاب تجاوز کند.

$$I_i < I_{max} \quad i = 1, \dots, n_{branch} \quad (23)$$

۶.۳. محدودیت‌های واحد تولید پراکنده.

$$\sum_{k=1}^{n_{HRS}} P_{HRS,k} = P_{HRS,T} \leq P_{Load} \quad (24)$$

$$\sum_{k=1}^{n_{HRS}} Q_{HRS,k} = Q_{HRS,T} \leq Q_{Load} \quad (25)$$

توان اکتیو  $P_{HRS,T}$  و راکتیو  $Q_{HRS,T}$  کل توان تزریق شده توسط واحد تولید پراکنده باید از تقاضای کل بار اکتیو  $P_{Load}$  و راکتیو  $Q_{Load}$  کمتر باشد.

۷.۳. محدودیت تعداد منابع  $HRS$ . تعداد منابع استفاده شده در پیکربندی شبکه مورد مطالعه باید دارای یک حد مینیمم و ماکزیمم در برنامه بهینه سازی باشد که از رابطه زیر پیروی می‌کند:

$$N_{min} < N_X < N_{max} \quad X \in \{PV, WT, bat, DG\} \quad (26)$$

که در آن مقدار  $N_{min}$  برای سیستم انرژی ترکیبی صفر است و  $N_{max}$  برابر ماکزیمم تعداد سیستم های  $HRS$  خواهد بود.

۸.۳. محدودیت شارژ و دشارژ باتری. در هر زمان، مقدار شارژ باتری باید در محدودیت خود باقی بماند:

$$SOC_{min} < SOC_t < SOC_{max} \quad (27)$$

#### ۴. روش حل مسئله بهینه‌سازی چند‌نظمی

الگوریتم بهینه‌سازی چند‌نظمی (MVO)<sup>۱</sup> یکی از الگوریتم‌هایی است که اخیراً توسط سید علی میرجلیلی معرفی شده است که از مفاهیم تئوری چند‌نظمی تحت تأثیر قرار می‌گیرد [۲۷]. در این قسمت مدل ریاضی برای حل مسئله پیشنهادی را به کمک روش MVO را نمایش می‌دهیم:

(۱) - مرحله اول (تولید جمعیت اولیه): تولید جواب‌های اولیه به صورت تصادفی برای پیکربندی سیستم HRS به صورت زیر:

$$U = \begin{bmatrix} u_1^1 & u_1^2 & u_1^m \\ u_2^1 & u_2^2 & u_2^m \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ u_n^1 & u_n^2 & u_n^m \end{bmatrix} \quad (28)$$

(۲) - مرحله دوم (اکتشاف): برای ارسال و دریافت اشیا از سفید چاله به سیاه چاله مطابق رابطه (۲۸) عمل می‌شود که در آن پارامتر  $x_i^j$  پارامتر  $j$ ام جهان  $i$  را نشان می‌دهد، جهان  $i$  را نشان می‌دهد،  $NI(U_i)$  نرخ تورم عادی جهان ام است، یک عدد تصادفی در  $[0, 1]$  است و پارامتر  $z$  از جهان را نشان می‌دهد که توسط مکانیسم چرخ رولت انتخاب شده است. هرچه نرخ تورم بالاتر باشد احتمال ارسال اشیا از چاله‌های سفید به سیاه بیشتر است.

$$x_i^j = \begin{cases} x_k^j & r_1 < NI(U_i) \\ x_k^j & r_1 > NI(U_i) \end{cases} \quad (29)$$

(۳) - مرحله سوم (جستجو): به منظور ایجاد تغییرات محلی برای هر جهان و احتمال زیاد بهبود نرخ تورم با استفاده از کرم چاله، فرض می‌کنیم که همیشه بین یک جهان و بهترین عالم شکل گرفته تاکنون، تونل‌های کرم چاله برقرار شده باشد تا بتوان فرآیند بهره‌برداری بین جواب‌های جدید را داشته باشیم و جواب‌های مختلفی را برای مکان و ظرفیت منابع HRS تولید کنیم بنابراین از معادله زیر

<sup>۱</sup>Multi-Verse Optimization (MVO)

استفاده می کنیم:

$$x_i^j = \begin{cases} x_j + TDR(ub_j - lb(j) \times r_4 + lb_j) & r_3 < 0.5, r_2 < WEP \\ x_j + TDR(ub_j - lb(j) \times r_4 + lb_j) & r_3 > 0.5, r_2 < WEP \\ x_i^j & r_2 > WEP \end{cases} \quad (30)$$

که در آن  $x_i^j$  پارامتر  $z$ ام از بهترین جهان (بهترین ترکیب مکان و ظرفیت منابع HRS تشکیل شده تاکنون را نشان می دهد، برای شناسایی بهترین جهان، باید تابع هدف را برای تمامی جهان های تولیدی اجرا نمود.  $TDR$  یک ضریب است ،  $WEP$  ضریب دیگری است ،  $lb(j)$  حد پایین متغیر  $z$ ام را نشان می دهد ،  $ub_j$  حد بالایی متغیر  $z$ ام است ،  $x_i^j$  پارامتر  $z$ ام جهان  $z$ ام ( تعداد و ظرفیت منابع  $HRS$ ) را نشان می دهد،  $r_2$  ،  $r_3$  و  $r_4$  اعداد تصادفی در بازه  $[0,1]$  هستند. نحوه محاسبه دو ضریب  $TDR$  و  $WEP$  در زیر آورده شده است:

$$WEP = min + l \times \left( \frac{max - min}{L} \right) \quad (31)$$

در رابطه (۳۱) مقدار  $min = 0.2$  و  $max = 1$  در نظر گرفته شده است همچنین  $l$  تکرار فعلی و  $L$  حداکثر تکرار را نشان می دهد. ضریب  $TDR$  نیز در رابطه (۳۲) آورده شده است:

$$TDR = 1 - \frac{\frac{1}{l^p}}{\max_i \frac{1}{P}} \quad (32)$$

(۴) مرحله چهارم (پایان): در الگوریتم MVO ، فرآیند بهینه سازی با ایجاد مجموعه ای از جهان های تصادفی شروع می شود. در هر تکرار ، اشیاء در جهان با نرخ تورم بالا تمایل دارند که با تورم پایین از طریق سفیدچاله ها و سیاه چاله ها به سمت جهان ها حرکت کنند. در همین حال، هر جهان از طریق کرم چاله ها به سمت بهترین جهان با وسایل ارتباطی تصادفی در اشیاء خود روبرو می شوند. این روند تا زمانی که حداکثر تعداد تکرارها برسد تکرار می شود.

تابع هدف پیاده شده برای حل مسئله بهینه سازی به روش MVO به صورت زیر ارائه شده است:

$$Min\ obj = \frac{1}{\mu_{f_1} + \mu_{f_2} + \mu_{f_3}} \quad (33)$$

### ۵. شبیه سازی و نتایج

در این قسمت به منظور نمایش دادن عملکرد روش پیشنهادی ریزشبکه تست ۳۳ باس IEEE را استفاده می‌کنیم. اطلاعات مربوط به نیروگاه خورشیدی و بادی در جداول (۱) و (۲) آورده شده است. هم چنین اطلاعات مربوط به باتری و دیزل ژنراتور در جداول (۳) و (۴) فراهم شده است. داده های تجربی مورد استفاده در اینجا برای تابش خورشیدی و سرعت باد از اطلاعات شهرستان بروجرد، ایران (عرض جغرافیایی: ۴۸۰.۳۳) به دست آمده است. شکل (۴) و (۵) پروفیل تابش ماهانه و سرعت باد (در ارتفاع ۱۰ متر) را در طول یک سال نشان می دهد. مجموعه ای از الگوهای بار روزانه در اینجا پیاده سازی شده است که در شکل (۶) نشان داده شده است. برای سهولت محاسبه سه سطح بار یعنی سبک، متوسط و سنگین برای چنین الگوی که در جدول (۵) نشان داده شده است، مدل سازی شده است.

جدول ۱: اطلاعات مربوط به پنل خورشیدی

مقدار	متغیر
۲۰۰w	توان نامی
۵۰۰\$	هزینه سرمایه گذاری
۵۰۰\$	هزینه تعویض
۵۰۰\$	هزینه تعمیر و نگه داری
۲۰year	طول عمر
۱۵/۸	بازده
۲۰	ماکزیمم تعداد پنل

در ادامه نتایج شبیه سازی برای شبکه استاندارد ۳۳ باس برای بهینه سازی تعداد پنل های خورشیدی، باتری ها، تعداد نیروگاه های بادی و تعداد دیزل ژنراتور نمایش داده می شود.

جدول ۲: اطلاعات مربوط به نیروگاه بادی

مقدار	متغیر
۳۰۰w	توان نامی
۱۰۰۰\$	هزینه سرمایه گذاری
۱۰۰۰\$	هزینه تعویض
۱۰\$/year	هزینه تعمیر و نگه داری
۲۰year	طول عمر
۳m/s	سرعت اولیه باد
۲۰m/s	سرعت نهایی باد
۱/۵m/s	سرعت راه اندازی باد

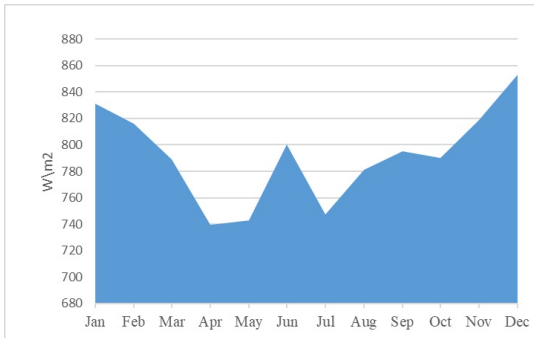
جدول ۳: اطلاعات مربوط به باتری

مقدار	متغیر
۵۰۰Ah	توان نامی
۴۰\$	هزینه سرمایه گذاری
۴۰\$	هزینه تعویض
۵\$/year	هزینه تعمیر و نگه داری
۵year	طول عمر
۸۲%	بازده
۱۶۲۵kW	توان عملیاتی در طول عمر باتری
۷۵%	ماکزیمم نرخ شارژ

۱.۵. شبکه ۳۳ باس. ساختار شبکه ۳۳ باس در شکل (۷) به همراه محل های نصب نیروگاه های بادی و خورشیدی نمایش داده شده است. هم چنین مکان های نصب باتری و دیزیل ژنراتور نیز شامل می شود. در شکل (۸) نمودار تغییرات شاخص احتمال از دست دادن منبع تغذیه (LPSP) برای یک ساعت مشخص نمایش داده شده است. این معیاری است که برای ارزیابی قابلیت اطمینان یک سیستم قدرت استفاده شده است. اساساً احتمال تجربه قطع

جدول ۴: اطلاعات مربوط به دیزل ژنراتور

متغیر	مقدار
توان نامی	۵۰۰ kW
هزینه سرمایه گذاری	۲۵۰۰ \$
هزینه تعویض	۲۵۰۰ \$
هزینه تعمیر و نگه داری	۲۰ \$/year
طول عمر	۲۰ year
هزینه سوخت	۲ \$
توان عملیاتی	۴۹۶ kW

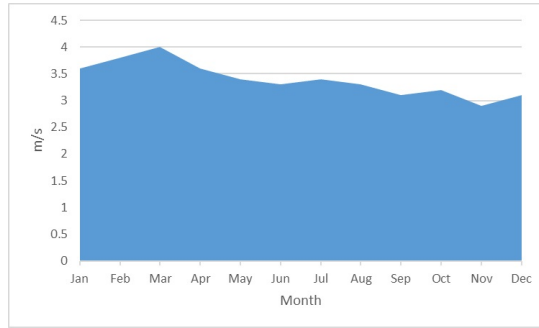


شکل ۴: تابش ماهانه خورشید در شبکه تست

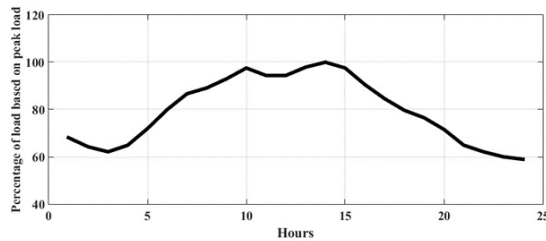
جدول ۵: اطلاعات مربوط به دیزل ژنراتور

نوع بار	درصد بار بر اساس بار پیک	سطح
سبک	۸۰-۰	۱
متوسط	۹۵-۸۰	۲
سنگین	۱۰۰-۹۵	۳

برق در یک بازه زمانی خاص را نشان می دهد که معمولاً به صورت مقدار اعشاری بین ۰ و ۱ بیان می شود. مقدار LPSP بالاتر نشان دهنده شانس بیشتری برای مواجهه با قطع برق در آن



شکل ۵: متوسط سرعت باد در شبکه تست



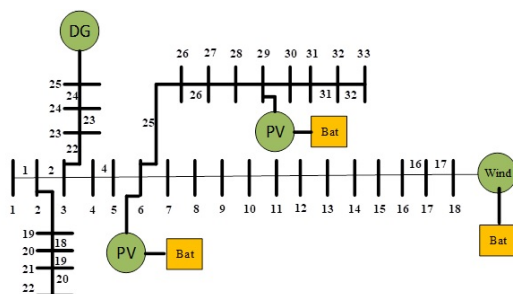
شکل ۶: منحنی تغییرات بار هر باس بر اساس مقدار پیک

دوره است. مقدار LPSP کمتر به معنی منبع تغذیه مطمئن تر با احتمال قطعی کمتر است. به عنوان مثال، LPSP با مقدار ۱۱ درصد احتمال بسیار کم قطع برق را نشان می دهد. در نتیجه، LPSP یک ابزار ارزشمند برای ارزیابی قابلیت اطمینان تامین برق در یک سیستم قدرت است که در شکل (۸) برای ترکیبی از HRS و دیزل ژنراتور رسم شده است. شکل (۹) نشان دهنده میزان هزینه متوسط تحویل انرژی است که در جدول (۶) نیز برای حالت های مختلف استفاده از HRS نمایش داده شده است. این نشان دهنده میانگین هزینه به ازای هر واحد انرژی تحویل شده است. COE پایین تر به طور کلی نشان دهنده یک منبع توان اقتصادی تر است. LPSP بالا ممکن است نیاز به سرمایه گذاری در ارتقاء زیرساخت یا ظرفیت تولید اضافی برای بهبود قابلیت اطمینان داشته باشد. این سرمایه گذاری ها می تواند هزینه کلی تولید و انتقال انرژی را افزایش دهد و به طور بالقوه بر COE تأثیر بگذارد. مقایسه میان شکل (۸) و (۹) نیز بیان می کند که در بازه هایی که COE کاهش یافته است LPSP افزایش می یابد. بنابراین باید بتوان تعادلی بین هزینه و قابلیت اطمینان پیدا کرد. از این رو در مسئله بهینه سازی پیشنهاد

شده در نهایت منابع تولیدی با COE کمی بالاتر انتخاب شده است تا قابلیت اطمینان بالاتر (LPSP) را برای به حداقل رساندن خطرات قطع و اثرات اقتصادی مرتبط ارائه دهند. هم چنین، در ابتدا با پرداختن به بخشی از بار برآورده نشده در مناطق دورافتاده یا خانگی، می توان به کاهش قابل توجهی در هزینه انرژی دست یافت.

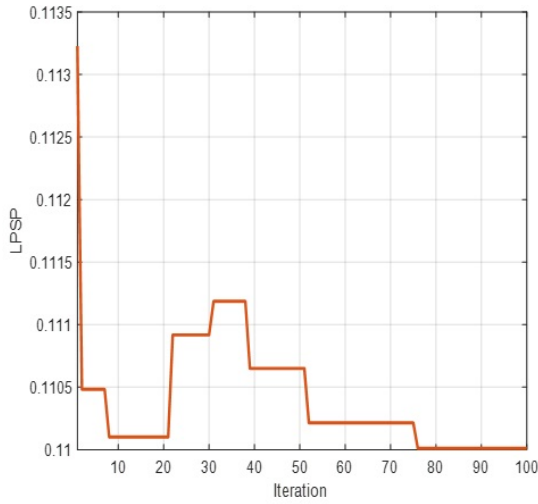
جدول ۶: نتایج بهینه سازی HRS توسط بهینه سازی چند وجهی باس

متغیرها	PV/DG/bat	PV/WT/DG/bat	WT/DG/bat
تعداد باتری	۵	۶	۹
تعداد پنل خورشیدی	۱۶	۱۴	—
تعداد توربین بادی	۰	۲	۱۱
دیزل	۱	۱	۱
هزینه سالانه (\$)	۱۵۲۷۱	۱۵۰۱۴	۲۱۵۶۸
COE(\$/kWh)	۰/۱۶۴	۰/۱۵۶	۰/۲۲۸
VR(p.u.)	۰/۰۹۴۶	۰/۰۸۰۷	۰/۱۰۲

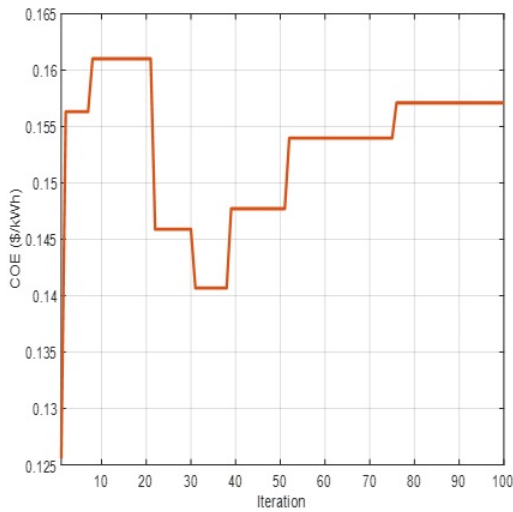


شکل ۷: شبکه تست ۳۳ باس

شکل (۱۰) نمونه ای از شبیه سازی ساعتی را برای چهار روز از سال نشان می دهد. این طرح تعامل بین منابع انرژی تجدیدپذیر، باتری و تقاضای بار را به تصویر می کشد. در ابتدا، به دلیل پایین بودن وضعیت شارژ (SOC) سیستم ذخیره سازی انرژی، شارژ را در دوره های تولید انرژی خورشیدی مازاد (معمولاً ظهر) در اولویت قرار می دهد. تخلیه عمدتاً در ساعات پیک بار برای پاسخگویی به اوج تقاضا در زمانی که خورشیدی در دسترس نیست اتفاق می افتد.

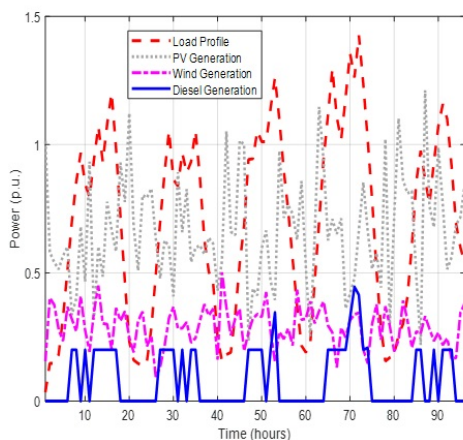


شکل ۸: تغییرات شاخص احتمال از دست دادن منبع تغذیه ( $LPSP$ )



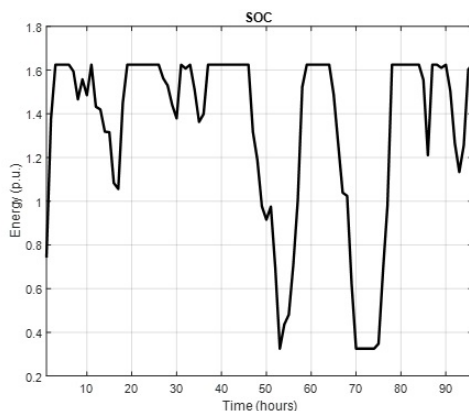
شکل ۹: میزان هزینه متوسط تحویل انرژی ( $COE$ )

انرژی خورشیدی کافی اجازه می دهد تا در برخی ساعات ذخیره سازی به ۱۰۰ درصد SOC برسد. با این حال، در برخی روزهای دیگر، SOC به دلیل در دسترس بودن کمتر خورشیدی



شکل ۱۰: شبیه سازی مدیریت انرژی  $HRS$

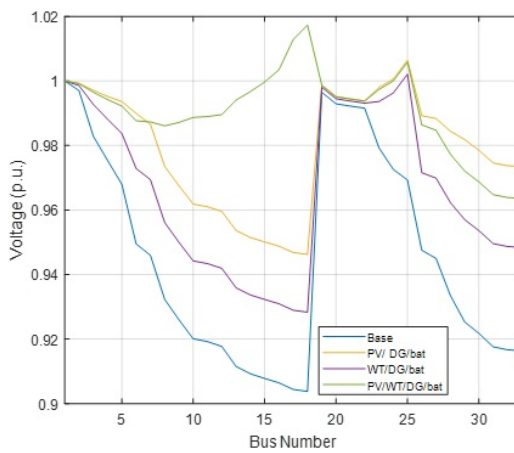
کمتر از ظرفیت باقی می ماند (شکل ۱۱). پروفایل ولتاژ نیز در شکل (۱۲) برای بار ماکزیمم شبکه رسم شده است. همانگونه که مشاهده می شود، روش حالت  $PV/WT/DG/bat$  ارائه شده به خوبی توانسته است سطح ولتاژ شبکه را بهبود دهد؛ زیرا که مینیمم سطح ولتاژ سیستم به  $0.975$  پیرونیت رسیده است که تقریباً ۷ درصد افزایش را بیان می کند.



شکل ۱۱: تغییرات  $soc$  در باتری در بازه چهار روز نمونه

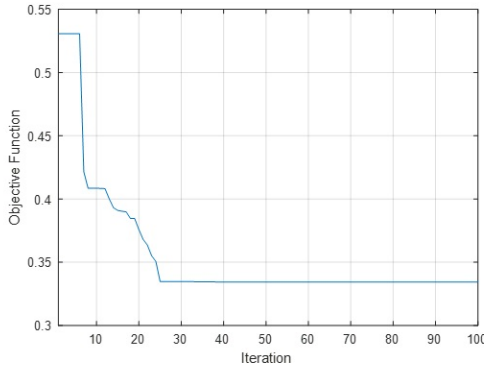
در شکل (۱۱) باتری ها می توانند الکتریسیته اضافی تولید شده توسط توربین را در دوره های باد شدید ذخیره کنند. سپس این انرژی ذخیره شده را می توان در زمان های باد کم

استفاده کرد و منبع تغذیه ثابت تری را به منظور تنظیم ولتاژ بهتر فراهم کرد. به علاوه، انرژی باد یک منبع متغیر است، زیرا سرعت باد در نوسان است. باتری ها می توانند به کاهش این نوسانات کمک کنند و شبکه برق را تثبیت کنند. بنابراین، در حالی که توربین های منفرد ممکن است باتری داخلی نداشته باشند، سیستم های توربین بادی را می توان به گونه ای طراحی کرد که ذخیره انرژی باتری را به عنوان بخشی از پروژه بزرگتر یکپارچه سازی انرژی های تجدیدپذیر ترکیب کند. در شکل (۱۳) تغییرات تابع هدف مسئله بهینه سازی با استفاده از *MVO*

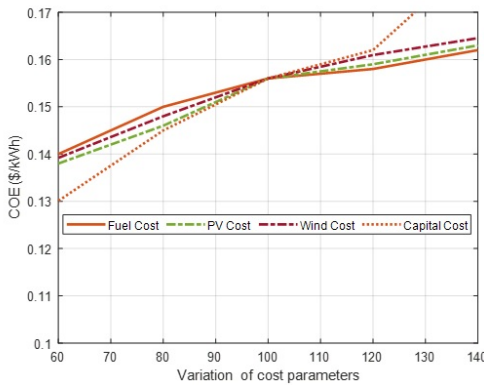


شکل ۱۲: تغییرات پروفایل ولتاژ شبکه مورد مطالعه

نمایش داده شده است که نشان از عملکرد مناسب الگوریتم بهینه سازی دارد زیرا که با افزایش تعداد تکرارها به یک راه حل بهینه همگرا شده است. همگرایی تضمین می کند که روش در یک حلقه بی نهایت گیر نمی کند. در مرحله آخر مطالعه، چگونگی تاثیر تغییرات در هزینه های ورودی بر *COE* برای سیستم های *HSR* مطالعه می شود. شکل (۱۴) تأثیر متغیر هزینه های سوخت، هزینه های سرمایه کلی، هزینه های ماژول *PV* و هزینه های ماژول باد را بر *COE* یک سیستم *HRS* نشان می دهد. نتایج نشان می دهد که هزینه سرمایه گذاری بیشترین تأثیر را بر *COE* دارد. به عنوان مثال، کاهش ۲۰ درصدی هزینه سرمایه گذاری به کاهش ۱۰ درصدی *COE* می شود و کاهش ۲۰ درصدی بیشتر در هزینه سرمایه گذاری به کاهش ۱۷ درصدی اضافی در *COE* در مقایسه با سناریوی پایه منجر می شود. برعکس،



شکل ۱۳: تغییرات تابع هدف مسئله بهینه سازی با استفاده از *MVO*



شکل ۱۴: تغییرات پارامترهای هزینه

هزینه های سوخت، هزینه های ماژول *PV* و هزینه های ماژول باد تأثیر کمتری بر *COE* سیستم های *HSR* دارند.

### ۶. نتیجه گیری

با توجه به اهمیت روزافزون سیستم های خورشیدی- بادی- دیزلی در آوردن برق به مکان های دور و خارج از شبکه، این مقاله از یک مدل مناسب برای طراحی و بهینه سازی چنین سیستم هایی استفاده نموده است. فرآیند بهینه سازی از روش *MVO* استفاده می کند که یافتن

جواب کارآمدی را تضمین می‌کند. تابع هدف مسئله بهینه سازی شامل مینیمم کردن تغییرات ولتاژ سیستم، کاهش هزینه های بهره برداری و کاهش احتمال قطع بار بود. نتایج نشان داد که هزینه سرمایه گذاری بیشترین تأثیر را بر  $COE$  در مقایسه با هزینه های سوخت، باد و ماژول  $PV$  دارد. قابل ذکر است که کاهش ۲۰ درصدی هزینه سرمایه گذاری به کاهش ۱۰ درصدی  $COE$  می انجامد و به دنبال آن  $LPSP$  افزایشی بود. بنابراین باید بتوان تعادلی بین هزینه و قابلیت اطمینان پیدا کرد. از این رو در مسئله بهینه سازی پیشنهاد شده در نهایت منابع تولیدی با  $COE$  کمی بالاتر انتخاب شده اند تا قابلیت اطمینان بالاتر را برای به حداقل رساندن خطرات قطع و اثرات اقتصادی مرتبط ارائه دهد. در میان ترکیب های مختلف بهره برداری  $HRS$ ، حالت  $PV/WT/DG/bat$  به خوبی توانست سطح ولتاژ شبکه را بهبود دهد که تقریباً ۷ درصد افزایش داشته و هزینه بهره برداری و  $LPSP$  کمتری را در مقایسه با دو ترکیب دیگر  $HRS$  داشت. به عنوان پیشنهاد برای کارهای آتی، می توان علاوه بر تعیین تعداد و نوع  $HRS$  ها، ریزشکه را نیز به چند ریزشکه بهینه تبدیل نمود و مرز میان آن ها را برای انتقال توان در صورت وقوع حادثه در هر ریزشکه شناسایی کرد.

## مراجع

- [1] L. Ge, J. Liu, T. Du, C. Zhao, R. Pian and W. Liu, "Size Optimization of Wind-PV-Diesel-Hydrogen-Ice System for Island Microgrid," IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM), Denver, CO, USA, vol. 12, no. 14, pp. 1458-1466, 2022.
- [2] A. M. Shaheen and R. A. El-Sehiemy, "A Multiobjective Salp Optimization Algorithm for Techno-Economic-Based Performance Enhancement of Distribution Networks," in IEEE Systems Journal, vol. 15, no. 1, pp. 1458-1466, 2021.
- [3] R.J. Rathish, K. Mahadevan, S.K. Selvaraj, "Multi-objective evolutionary optimization with genetic algorithm for the design of off-grid PV-wind-battery-diesel system," Soft Comput, vol. 25, no. 4, pp. 3175-3194, 2021.
- [4] R. Duflo-Lopez, J.L. Bernal-Agustín, J.M. Yusta-Loyo, J.A. Domínguez-Navarro, I.J. Ramírez-Rosado, J. Lujano, "Multi-objective optimization minimizing cost and life cycle emissions of stand-alone PV-wind-diesel systems with batteries storage," Appl Energy, vol. 88, no. 11, pp. 435-454, 2011.
- [5] T. Ma, H. Yang, L. Lu, J. Peng, "Optimal design of an autonomous solarewind pumped storage power supply system," Appl Energy, vol. 160, no. 72, pp. 125-226, 2015.
- [6] A. Askarzadeh, L. Coelho, "A novel framework for optimization of a grid independent hybrid renewable energy system: a case study of Iran," Sol Energy vol. 112, no. 5, pp. 383-396, 2015.

- [7] Y. Sawle, S. Gupta, A.K. Bohre, "Optimal sizing of standalone PV/Wind/Biomass hybrid energy system using GA and PSO optimization technique," *Energy*, vol. 117, no. 54, pp. 690-698, 2017.
- [8] M. Ismail, M. Moghavvemi, and T. Mahlia, "Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate," *Energy Conversion and Management*, vol. 69, no. 5, pp. 163-173, 2013.
- [9] B.K. Das, "A techno-economic feasibility of a stand-alone hybrid power generation for remote area application in Bangladesh," *Energy*, vol. 134, no. 72, pp. 775-788, 2017.
- [10] H.M.H. Farh, A.A. Al-Shamma, A.M. Al-shaalan, A. Alkuhayli, "Technical and Economic Evaluation for Off-Grid Hybrid Renewable Energy System Using Novel Bonobo Optimizer," *Sustainability*, vol. 14, no. 5, pp. 1533-1542, 2022.
- [11] H. Borhanazad, S. Mekhilef, G. Ganapathy, V. Modiri-Delshad, M. Mirtaheeri, "Optimization of micro-grid system using MOPSO," *Renew. Energy*, vol. 71, no. 12, pp. 295-306, 2014.
- [12] M. Madziga, A. Rahil, R. Mansoor, "Comparison between three off-grid hybrid systems (solar photovoltaic, diesel generator and battery storage system) for electrification for Gwakwani village, South Africa," *Environments*, vol. 57, no. 5, pp. 245-252, 2018.
- [13] L.M. Halabi, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, J. Hazelton, "Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia," *Energy Convers. Manag.*, vol. 144, no. 14, pp. 322-339, 2017.
- [14] M. Ansong, L.D. Mensah, "Adaramola, M.S. Techno-economic analysis of a hybrid system to power a mine in an off-grid area in Ghana. *Sustain. Energy Technol.*" *Assess*, vol. 23, no.4, pp. 48-56, 2017.
- [15] S.G. Sigarchian, R. Paleta, A. Malmquist, A. Pina, "Feasibility study of using a biogas engine as backup in a decentralized hybrid (PV/wind/battery) power generation system—Case study Kenya," *Energy* vol. 90, no.4, pp. 1830-1841, 2015.
- [16] SG. Gabra, J. Miles, SA. Scott, "Techno-economic analysis of stand-alone wind micro-grids, compared with PV and diesel in Africa," *Renew Energy* vol. 143, no.19, pp. 1928-1938, 2019.
- [17] M. Ding, "Configuration optimization of capacity of standalone PV-wind-diesel-battery hybrid microgrid." *Power System Technology*, vol. 37, no.3, pp. 575-581, 2013.
- [18] J. Kaldellis, D. Zafirakis, K. Kavadias, and E. Kondili, "Optimum PV-diesel hybrid systems for remote consumers of the Greek territory," *Applied Energy*, vol. 97, pp. 61-67, 2012.
- [19] HA. Kazem, HAS. Al-Badi, AS. Al Busaidi, MT. Chaichan, "Optimum design and evaluation of hybrid solar/wind/diesel power system for Masirah Island," *Environ Dev Sustain*, vol. 19, no. 5, pp. 1761-1778, 2017.

- [20] S. Sonandkar, R. Selvaraj and T. R. Chelliah, "PV Powered Improved Quasi-Z-Source Inverter Fed Five Phase PMSM for Marine Propulsion Systems," in IEEE Transactions on Transportation Electrification.
- [21] A. Maleki, A. Askarzadeh, "Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept," Sol Energy, vol. 107, no. 12, pp. 227–235, 2014.
- [22] H. Dagdougui, N. Mary, A. Beraud-Sudreau and L. Dessaint, "Power management strategy for sizing battery system for peak load limiting in a university campus," 2016 IEEE Smart Energy Grid Engineering (SEGE), Oshawa, ON, Canada, pp. 308-312, 2016.
- [23] C. Zhu, F. Liu, S. Hu and S. Liu, "Research on capacity optimization of PV-wind-diesel-battery hybrid generation system," 2018 International Power Electronics Conference, Niigata, Japan, pp. 3052-3057, 2018.
- [24] M. Zarei and A. Zangeneh, "Multi-objective optimization model for distribution network reconfiguration in the presence of distributed generations", Int Trans Electr Energy Syst, vol. 27, no. 12, pp.1–18, 2017.
- [25] R. Billinton and P. Wang, "A generalized method for distribution system reliability evaluation," IEEE WESCANEX 95. Communications, Power, and Computing. Conference Proceedings, Winnipeg, MB, Canada, pp.201–218, 1995.
- [26] M. Gitizadeh, A.A. Vahed and J. Aghaei, "Multistage "distribution system expansion planning considering distributed generation using hybrid evolutionary algorithms", Appl. Energy, vol. 101, no.9, pp. 655–666, 2013.
- [27] S. Mirjalili, S.M. Mirjalili, A. Hatamlou, "Multi-Verse Optimizer: a nature-inspired algorithm for global optimization," Neural Comput & Applic, vol. 27, no.11, pp. 495–513, 2016.