

# برنامه‌ریزی بهینه سیستم‌های انرژی تجدیدپذیر با در نظر گرفتن عدم قطعیت و مفهوم احتمال هدررفت توان: مطالعه‌ی موردی

عباس خان‌احمدی<sup>۱</sup> محمد مهدی سلیمانی<sup>۲</sup> رضا غفارپور<sup>۳</sup> سعید زمانیان<sup>۴</sup>

<sup>۲</sup> - دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران

[akhanahmadi@ihu.ac.ir](mailto:akhanahmadi@ihu.ac.ir)

<sup>۱</sup> - دانش آموخته کارشناسی ارشد - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه تربیت مدرس - تهران - ایران

[soleymany\\_m@yahoo.com](mailto:soleymany_m@yahoo.com)

<sup>۳</sup> - استادیار - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران

[rgaffarpour@ihu.ac.ir](mailto:rgaffarpour@ihu.ac.ir)

<sup>۴</sup> - دانشجوی دکتری - دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - تهران - ایران

[szamanian@ihu.ac.ir](mailto:szamanian@ihu.ac.ir)

چکیده: در سال‌های اخیر به دلیل افزایش تقاضای انرژی و هزینه‌ی سوخت‌های فسیلی در مناطق دورافتاده، تمایل به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر مستقل از شبکه، رشد چشمگیری داشته است. هدف این مقاله، پیاده‌سازی عملی یک سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل ژنراتور بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی و تقاضای بار واقعی در یکی از مناطق دورافتاده‌ی استان سیستان و بلوچستان است. جهت تعیین تعداد بهینه‌ی اجزای سیستم ترکیبی در حضور عدم قطعیت سمت تقاضا و تولید توان منابع تجدیدپذیر، هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم با در نظر گرفتن احتمال هدررفت توان (LPSP) کمینه می‌گردد. مدل پیشنهادی از طریق سه الگوریتم ازدحام ذرات معمولی (PSO)، با ضرایب انقباض (CPSO) و بهبودیافته‌ی پیشنهادی (MPSO)، حل و مورد مقایسه قرار می‌گیرد که نتایج نشان از سرعت همگرایی بالاتر و عملکرد بهینه‌ی بهتر الگوریتم پیشنهادی دارد. جهت افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی، قید حداکثر مجاز مصرف سالیانه‌ی سوخت دیزل ژنراتور برای پیاده‌سازی عملی اضافه می‌شود. با جمع‌آوری اطلاعات واقعی آب‌وهوا و در نظر گرفتن  $LPSP_{Max} = 1\%$ ، نتایج دریافتی پس از پیاده‌سازی نشان از تأمین تقاضای بار الکتریکی مصرفی و برآورده شدن تمامی قیود عملیاتی دارد. در این حالت، هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم و مصرف سوخت دیزل ژنراتور به ترتیب  $3974/50\$$  و  $98/33$  لیتر در سال است.

واژه‌های کلیدی: انرژی‌های تجدیدپذیر ترکیبی، هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم، احتمال هدررفت توان، عدم قطعیت، الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته، مطالعه‌ی موردی، پیاده‌سازی.

نوع مقاله: پژوهشی

DOI: 10.52547/jiaeee.19.1.97

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۸/۰۵/۲۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۹/۰۲/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۰/۰۸/۰۲

نام نویسنده‌ی مسئول: رضا غفارپور

نشانی نویسنده‌ی مسئول: ایران - تهران - اتوبان بابائی غرب - دانشگاه جامع امام حسین (ع) - دانشکده‌ی مهندسی برق و کامپیوتر

## ۱- مقدمه

با توجه به نگرانی‌های زیست‌محیطی و مسائل مربوط به گرمایش جهانی، بهره‌برداری از انرژی‌های تجدیدپذیر مانند سیستم‌های خورشیدی و یا توربین‌های بادی از مهم‌ترین راه‌حل‌ها جهت کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و پاسخ به نیاز مصرف‌کنندگان است [۱]. همچنین، هزینه‌ی بالای حمل‌ونقل و افزایش قیمت سوخت‌های فسیلی در مناطق دورافتاده سبب استفاده از سیستم‌های مستقل از شبکه با تأکید بر افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر و کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی شده است [۲]. البته عدم قطعیت در میزان تولید انرژی‌های تجدیدپذیر و وابستگی آن‌ها به شرایط جغرافیایی، یکی از چالش‌های بزرگ استفاده از آن‌ها است که سیستم‌های ترکیبی به عنوان راه‌حلی مناسب پیشنهاد شده است [۳].

برنامه‌ریزی و بهینه‌سازی منابع انرژی تجدیدپذیر، مسئله‌ای مهم در سیستم‌های ترکیبی است. تعداد بیش‌ازاندازه‌ی منابع تجدیدپذیر می‌تواند مسئله‌ی قابلیت اطمینان را حل کند اما سبب افزایش هزینه‌ی تولید نیز خواهد شد. به همین دلیل، به منظور داشتن یک سیستم ترکیبی با هزینه‌ای مناسب، بهینه‌سازی با در نظر گرفتن تقاضای بار امری ضروری است. تاکنون تکنیک‌های بهینه‌سازی مختلفی برای سیستم‌های ترکیبی گزارش شده است. برنامه‌ریزی خطی [۴، ۵]، الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک [۶-۱۰]، کرم شبتاب [۱۱، ۱۲]، ملخ [۱۳]، جست‌وجوی هارمونی [۱۴، ۱۵]، شبیه‌سازی تبرید [۱۶]، فاخته [۱۷، ۱۸]، ازدحام ذرات [۱۹]، ازدحام ذرات با ضرایب انقباض [۲۰]، ترکیبی ژنتیک - ازدحام ذرات [۲۱]، چندهدفه ازدحام ذرات [۲۲]، [۲۳]، چندهدفه جست‌وجوی کلاغ [۲۴] و نرم‌افزار HOMER [۲۵].

مقاله‌ی [۲۶]، یک سیستم فتوولتائیک/باتری را به عنوان پشتیبان در طول زمان قطع برق برای یک ساختمان مسکونی طراحی کرده و هزینه‌های کل واحد را در طول ۲۰ سال با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی ژنتیک و ازدحام ذرات به حداقل رسانده است.

یکی از مواردی که همواره در طراحی سیستم‌های تجدیدپذیر مستقل از شبکه باید مورد توجه قرار گیرد، موضوع قابلیت اطمینان و تداوم برق‌رسانی است که در این راستا استفاده از قید احتمال هدررفت توان (LPSP) در مراجع مختلف پیشنهاد شده است. پژوهش‌های متعددی جهت طراحی و برنامه‌ریزی بهینه‌ی سیستم ترکیبی مستقل از شبکه توربین بادی/فتوولتائیک/باتری با در نظر گرفتن احتمال هدررفت توان صورت گرفته است که در ادامه، برخی از آن‌ها گزارش شده است. در [۷، ۸]، سیستم ترکیبی برای پاسخگویی به پروفیل بار ۲۴ ساعته جهت کمینه‌سازی تابع هزینه‌ی سالیانه طراحی شده است. الگوریتم‌های بهینه‌سازی ازدحام ذرات، شبیه‌سازی تبرید، جست‌وجوی ممنوعه، جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته، جست‌وجوی هارمونی بهبودیافته مبتنی بر شبیه‌سازی تبرید و کلونی زنبور مصنوعی جهت کمینه‌سازی هزینه‌ی کل سالیانه در [۲۷] مورد مقایسه قرار گرفته‌اند.

همچنین در [۲۸]، پنج الگوریتم بهینه‌سازی فرااکتشافی مبتنی بر آموزش و یادگیری (TLBO)، تکاملی تفاضلی پیشرفته (EDE)، ازدحام سالپ (SSA)، ترکیبی TLBO و EDE و ترکیبی TLBO و SSA بر اساس هزینه‌ی کل سالیانه‌ی سیستم ترکیبی مقایسه شده‌اند. در [۲۹]، الگوریتم بهینه‌سازی ترکیبی ژنتیک-ازدحام ذرات بر اساس هزینه‌ی کل فعلی با نتایج به‌دست‌آمده از نرم‌افزار HOMER مقایسه شده است. نتایج نشان از عملکرد بهتر الگوریتم‌های بهینه‌سازی در مقایسه با نرم‌افزار HOMER دارد. دلیل این امر این است که نرم‌افزار HOMER بدون داشتن هیچ اطلاعاتی از نتایج بهترین شخصی و جمعی متغیرهای تصمیم‌گیری و به‌صورت یک فرآیند سعی و خطا عمل می‌کند.

در بسیاری از سیستم‌های مستقل از شبکه جهت تأمین کمبود تقاضای بار در بعضی از ساعت‌ها، به‌عنوان سیستم پشتیبان از دیزل ژنراتور استفاده می‌شود [۲۴]. مطالعات مختلفی جهت برنامه‌ریزی بهینه سیستم ترکیبی توربین بادی/فتوولتائیک/باتری/دیزل ژنراتور انجام شده است که در ادامه به برخی از آن‌ها می‌پردازیم. در [۱۵]، سیستم ترکیبی با کمینه‌سازی هزینه‌ی سالیانه طراحی شده است که نتایج نشان از هزینه‌ی سالیانه‌ی کمتر سیستم ترکیبی توربین بادی/فتوولتائیک/باتری/دیزل ژنراتور نسبت به سایر سناریوها دارد. با هدف حداکثر کردن نرخ تطابق بازه‌های تولید و مصرف توان و حداقل‌سازی هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم و با در نظر گرفتن احتمال هدررفت توان، بهینه‌سازی سیستم ترکیبی در [۲۲] صورت گرفته است. بهینه‌سازی تعداد باتری‌ها در سیستم ترکیبی به کمک الگوریتم ازدحام ذرات در [۲۹] انجام شده است.

اکثر پژوهش‌های انجام‌شده در این حوزه، تنها به مطالعه و شبیه‌سازی سیستم‌های ترکیبی پرداخته‌اند و پیاده‌سازی و راه‌اندازی عملی این سیستم‌ها بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی بررسی و انجام نشده است. همچنین در نظر گرفتن عدم قطعیت برای شرایط آب-وهوایی در برنامه‌ریزی بهینه‌ی سیستم‌های تجدیدپذیر ترکیبی مسئله‌ای تازه و چالشی است.

در پژوهش پیش رو، سیستم ترکیبی توربین بادی/فتوولتائیک/باتری/دیزل ژنراتور (به‌عنوان پشتیبان) برای پاسخگویی به تقاضای بار در منطقه‌ای دورافتاده و با فاصله از شبکه‌ی اصلی در استان سیستان و بلوچستان طراحی و پیاده‌سازی شده است. هدف اصلی در این پژوهش، ارائه‌ی بهترین و کم‌هزینه‌ترین روش تأمین انرژی است؛ زیرا با وجود مسیرهای صعب‌العبور و هزینه‌های سوخت‌رسانی، تأمین انرژی بزرگ‌ترین دغدغه‌ی ساکنین این منطقه است. پیش از راه‌اندازی عملی سیستم ترکیبی، جهت کاهش هزینه‌های اقتصادی، افزایش قابلیت اطمینان و ایمنی سیستم، بهینه‌سازی امری ضروری است. جهت تخصیص بهینه‌ی تعداد واحدهای سیستم ترکیبی با در نظر گرفتن حداکثر احتمال هدررفت توان مجاز مطلوب (به‌عنوان شاخصی برای قابلیت اطمینان)، هزینه‌ی کل سالیانه‌ی سیستم با توجه به

$$P_{WT}(t) = \begin{cases} 0, & v(t) \leq v_{cut-in} \\ P_r \frac{v(t) - v_{cut-in}}{v_r - v_{cut-in}}, & v_{cut-in} < v(t) < v_r \\ P_r, & v_r < v(t) < v_{cut-out} \\ 0, & v(t) \geq v_{cut-out} \end{cases} \quad (2)$$

که در این مقاله،  $P_r = 1kW$  توان نامی توربین بادی،  $v_r = 11m/s$ ،  $v_{cut-out} = 13m/s$ ،  $v_{cut-in} = 2.5m/s$  و  $v(t)$  به ترتیب سرعت وصل، سرعت قطع، سرعت در توان نامی و سرعت باد در زمان  $t$  است.

## ۲-۲- مدل عملکردی سلول فتوولتائیک

توان تولیدی سلول‌های فتوولتائیک وابسته به شدت تابش و دمای محیط است. در این مقاله برای نشان دادن تغییرات شدت تابش از تابع توزیع احتمالاتی بتا استفاده شده است که رابطه‌ی (۳) تابع چگالی احتمال آن را نمایش می‌دهد [۳۰].

$$f(x) = \frac{x^{\alpha-1}(1+x)^{-\alpha-\beta}}{B(\alpha, \beta)} \quad (3)$$

که در آن  $\alpha$  و  $\beta$  دو پارامتر آزاد این توزیع هستند. بدین ترتیب، توان تولیدی یک سلول فتوولتائیک را می‌توان از رابطه‌ی (۴) تقریب زد [۳۲].

$$P_{PV}(t) = I(t) \times A_{PV} \times \eta_{PV} \quad (4)$$

که در این مقاله،  $A_{PV} = 1.07m^2$  مساحت سلول فتوولتائیک،  $I(t)$  شدت تابش خورشید در زمان  $t$  و  $\eta_{PV}$  بازده کلی سلول فتوولتائیک است که با رابطه‌ی (۵) تعریف می‌شود.

$$\eta_{PV} = \eta_{PV,ref} \left( 1 - \alpha \left( T(t) + I(t) \times \frac{NOCT - 20}{800} - T_{ref} \right) \right) \quad (5)$$

که در رابطه‌ی (۵)،  $\eta_{PV,ref} = 13\%$  بازده سلول در شرایط استاندارد،  $T_{ref} = 20^\circ C$  دمای استاندارد،  $\alpha = -0.003$  ضریب دما،  $NOCT = 46^\circ C$  دمای سلول در حالت بهره‌برداری نامی و  $T(t)$  دمای محیط در لحظه‌ی  $t$  است.

## ۳-۲- مدل عملکردی باتری

زمانی که تقاضای بار کمتر از توان تولیدی کل منابع تولیدکننده باشد، میزان شارژ بانک باتری از رابطه‌ی (۶) به دست می‌آید [۱۵].

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1) \times (1 - \sigma) + \left( E_{PV}(t) + E_{WT}(t) - \frac{E_{Load}(t)}{\eta_{inv}} \right) \times \eta_{Batt}^{Ch} \quad (6)$$

که در آن  $E_{Batt}(t)$  و  $E_{Batt}(t-1)$  میزان شارژ باتری در زمان  $t$  و  $t-1$  است.  $\sigma = 0.0001$  نرخ خود-تخلیه‌ی ساعتی،

محدودیت‌های عملیاتی حداقل می‌شود. برنامه‌ریزی بهینه با در نظر گرفتن عدم قطعیت در سمت تقاضا و در سمت تولید با استفاده از روش احتمالاتی مبتنی بر تولید سناریو و حل مسئله‌ی بهینه‌سازی توسط الگوریتم هوشمند صورت می‌گیرد. بهینه‌سازی با بهره‌گیری از سه الگوریتم ازدحام ذرات معمولی (PSO)، با ضرایب انقباض (CPSO) و بهبودیافته‌ی پیشنهادی (Modified PSO) انجام شده و نتایج با یکدیگر مقایسه می‌شوند. الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته‌ی این پژوهش، تاکنون برای بهینه‌سازی مدل موجود در این مقاله استفاده نشده است که برای افزایش سرعت و بهبود عملکرد همگرایی پیشنهاد شده است. با جمع‌آوری اطلاعات واقعی تابش خورشید، دمای محیط، سرعت باد و میزان تقاضای بار مصرفی و با در نظر گرفتن  $LPS_{Max} = 1\%$ ، پیاده‌سازی عملی سیستم ترکیبی انجام شده است. جهت کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و افزایش نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر، در پیاده‌سازی عملی، حداکثر سوخت مصرفی دیزل ژنراتور به میزان ۱۰۰ لیتر در سال مقید شده است.

در ادامه‌ی مقاله، به مدل‌سازی ریاضی واحدهای سیستم ترکیبی، عدم قطعیت، قابلیت اطمینان، تحلیل اقتصادی سیستم و معرفی الگوریتم‌های بهینه‌سازی پرداخته می‌شود. پس‌از آن شبیه‌سازی و نتایج ارائه و موردبررسی قرار می‌گیرند. سپس پیاده‌سازی عملی بر اساس نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی گزارش می‌شود و نهایتاً نتیجه‌گیری و پیشنهادها بیان می‌گردد.

## ۲- مدل ریاضی سیستم ترکیبی

قبل از اعمال الگوریتم بهینه‌سازی مناسب، مدل‌سازی ریاضی واحدها امری ضروری است که در بخش‌های ۲-۱ الی ۲-۵ گزارش شده است.

## ۲-۱- مدل عملکردی توربین بادی

سرعت باد به‌طور مداوم در حال تغییر بوده و نمی‌توان سرعت دقیقی را برای آن تعیین نمود. برای مشخص کردن فراوانی سرعت باد در یک منطقه در چنین حالتی می‌توان از توابع توزیع احتمالی بهره گرفت. در این مقاله، برای مدل‌سازی تغییرات باد از تابع توزیع رایلی استفاده شده است که تابع چگالی احتمال آن در رابطه‌ی (۱) نشان داده شده است [۳۰].

$$f(x; \sigma) = \frac{x}{\sigma^2} e^{-x^2/(2\sigma^2)}, \quad x \geq 0 \quad (1)$$

که در آن  $\sigma$  پارامتر مقیاس توزیع نامیده می‌شود. بدین ترتیب، توان تولیدی توربین بادی با رابطه‌ی (۲) تقریب زده می‌شود [۳۱].

#### ۴- قابلیت اطمینان بر اساس مفهوم LPSP

یکی از قیود قابلیت اطمینان مهم در زمینه‌ی سیستم‌های تجدیدپذیر مستقل از شبکه، احتمال هدررفت توان است. در این رویکرد، احتمال حالت‌هایی که منابع تولیدکننده‌ی توان قادر به تأمین تقاضای بار نیستند، محاسبه می‌شود [۲۲]. برای یک دوره‌ی زمانی مشخص  $T$  (در این مقاله یک سال)، LPSP از رابطه‌ی (۱۰) تعریف می‌شود.

$$LPSP = \frac{\sum_{t=1}^T LPS(t)}{\sum_{t=1}^T E_{Load}(t)} \quad (10)$$

که در آن، LPS میزان هدررفت توان در زمانی است که انرژی تولیدی کل ( $E_{gen}$ ) و انرژی ذخیره‌شده در باتری، کمتر از میزان تقاضای بار باشد و از رابطه‌ی (۱۱) به دست می‌آید.

$$LPS(t) = \frac{E_{Load}(t)}{\eta_{inv}} - E_{gen}(t) - (E_{Batt}(t-1) - E_{Batt}^{Min}) \quad (11)$$

$E_{Batt}^{Min}$  حداقل میزان مجاز انرژی ذخیره‌شده در باتری است.

#### ۵- تحلیل اقتصادی سیستم

در این بخش، تحلیل اقتصادی سیستم بر اساس مفهوم هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم انجام شده است که این هزینه شامل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (ACC)، تعمیر و نگهداری (AOMC)، تعویض (ARC) و سوخت دیزل ژنراتور (AFC) است. هزینه‌ی تعویض تنها برای باتری، دیزل ژنراتور و اینورتر در نظر گرفته می‌شود؛ دلیل این امر این است که طول عمر توربین بادی و فتوولتائیک در این پروژه برابر با طول عمر پروژه (۲۰ سال) در نظر گرفته شده و طول عمر باتری ۴ سال، اینورتر ۱۰ سال و دیزل ژنراتور ۸۷۶۰ ساعت در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، هزینه‌ی تعمیر و نگهداری برای توربین بادی سالیانه ۱۰۰\$، دیزل ژنراتور به ازای هر ساعت کارکرد ۰/۲\$ و برای سایر واحدها صفر در نظر گرفته شده است.

#### ۵-۱- هزینه‌ی سرمایه‌گذاری

میزان ACC (US\$) برای هر واحد (فتوولتائیک، توربین بادی، باتری، اینورتر و دیزل ژنراتور)، از رابطه‌ی (۱۲) محاسبه می‌شود [۲۸].

$$ACC_i = CC_i \times CRF(ir, LT_{proj}) \quad (12)$$

که در آن،  $CC_i$  هزینه‌ی سرمایه‌گذاری هر واحد (US\$) است که در این مقاله،  $CC_i$  برای فتوولتائیک ۲۰۰\$، توربین بادی ۳۲۰۰\$، باتری ۱۳۰\$، دیزل ژنراتور ۱۷۱۳/۱۵\$ و اینورتر ۲۰۰\$ در نظر گرفته شده است.  $CRF$  فاکتور بازگشت سرمایه است که وابسته به طول عمر سیستم ( $LT_{proj}$ ) و نرخ بهره‌ی واقعی سالیانه ( $ir$ ) است و از رابطه-ی (۱۳) به دست می‌آید [۲۸].

$E_{Load}(t)$  میزان تقاضای بار در زمان  $t$ ،  $\eta_{Batt}^{Ch} = 85\%$  بازده شارژ بانک باتری و  $\eta_{inv} = 95\%$  بازده اینورتر است.

از طرف دیگر، زمانی که تقاضای بار بیشتر از توان تولیدی کل منابع تولیدکننده باشد، باتری شروع به تخلیه شدن می‌کند؛ بنابراین میزان شارژ بانک باتری در این حالت از رابطه‌ی (۷) به دست می‌آید [۱۵].

$$E_{Batt}(t) = E_{Batt}(t-1) \times (1 - \sigma) - \left( \frac{E_{Load}(t)}{\eta_{inv}} - (E_{PV}(t) + E_{WT}(t)) \right) / \eta_{Batt}^{Disc} \quad (7)$$

که در آن  $\eta_{Batt}^{Disc} = 85\%$  بازده دشارژ بانک باتری است.

#### ۴-۲- مدل دیزل ژنراتور

زمانی که توان تولیدی کل نتواند تقاضای بار را برآورده کرده و سطح شارژ بانک باتری نیز در پایین‌ترین حد خود باشد، دیزل ژنراتور جهت تأمین کمبود بار شروع به کار می‌کند. مصرف سوخت دیزل ژنراتور از رابطه‌ی (۸) به دست می‌آید [۳۳].

$$Cons_D(t) = B_D \times P_D^N + A_D \times P_D(t) \quad (8)$$

که  $P_D^N = 1.9kW$  توان نامی دیزل ژنراتور،  $P_D$  توان خروجی دیزل ژنراتور و  $B_D = 0.0845 (l/kWh)$  و  $A_D = 0.246 (l/kWh)$  ضرایب منحنی مصرف هستند.

#### ۵-۲- مدل بار مصرفی

برای مدل‌سازی رفتار احتمالاتی بار مصرفی از توزیع نرمال با تابع چگالی احتمال مطابق با رابطه‌ی (۹) استفاده می‌گردد [۳۰].

$$f(x; \mu, \sigma^2) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}} \quad (9)$$

#### ۳- عدم قطعیت و تولید سناریو

در این پژوهش، به منظور در نظر گرفتن عدم قطعیت در سمت تقاضا و تولید از روش تولید سناریو استفاده شده که در این روش با استفاده از شبیه‌سازی مونت کارلو تعدادی حالت تصادفی برای متغیرهای سیستم از روی تابع توزیع احتمالاتی هر یک ایجاد شده و احتمال وقوع هر حالت محاسبه می‌شود. برای کسب اطلاعات بیشتر به مقالات [۱۸، ۳۴، ۳۵] مراجعه کنید. جهت کاهش حجم محاسبات و افزایش سرعت اجرای برنامه، کاهش مجموعه سناریوهای اصلی ضروری است. ایده‌ی اصلی، حذف سناریوهای با احتمال کم و نزدیک به هم است [۳۶]. در این پژوهش برای کاهش سناریو از تکنیک عقب‌گرد استفاده شده است [۳۷]. همچنین در این مقاله، از استراتژی ریسک‌خنثی برای انتخاب سناریو و یافتن یک جواب واحد استفاده می‌کنیم. برای دریافت اطلاعات بیشتر به مرجع [۱۸] مراجعه کنید.

$$N_{WT} = \text{Integer} \quad N_{WT}^{Min} \leq N_{WT} \leq N_{WT}^{Max} \quad (20)$$

$$N_{Batt} = \text{Integer} \quad N_{Batt}^{Min} \leq N_{Batt} \leq N_{Batt}^{Max} \quad (21)$$

میزان انرژی ذخیره‌شده باتری طبق رابطه‌ی (۲۲) مقید می‌شود.

$$E_{Batt}^{Min} \leq E_{Batt}(t) \leq E_{Batt}^{Max} \quad t \in [1, 8760] \quad (22)$$

که در آن  $E_{Batt}^{Max}$  و  $E_{Batt}^{Min}$  به ترتیب حداقل و حداکثر میزان مجاز انرژی ذخیره‌شده در باتری است. در این مقاله، حداکثر میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری برابر با مقدار ظرفیت نامی باتری ( $S_{Batt} = 1.35kWh$ ) و حداقل میزان انرژی ذخیره‌شده در باتری نیز بر اساس بیشترین عمق دشارژ ( $DOD = 0.5$ ) برای افزایش طول عمر باتری و محافظت از آن در برابر خراب شدن به‌صورت رابطه‌ی (۲۳) در نظر گرفته می‌شود [۲۷].

$$E_{Batt}^{Min} = (1 - DOD) \times S_{Batt} \quad (23)$$

برای تنظیم قابلیت اطمینان سیستم، قیدی برای احتمال هدررفت توان (LPSP) مطابق رابطه‌ی (۲۴) در نظر گرفته می‌شود.

$$LPSP \leq LPSP_{Max} \quad (24)$$

که در آن  $LPSP_{Max}$  حد مجاز مطلوب برای احتمال هدررفت توان در سیستم است که با توجه به تقاضای کاربر تعیین می‌شود.

## ۶- استراتژی عملکرد سیستم

استراتژی عملکرد سیستم طراحی‌شده در فلوچارت شکل (۱) نمایش داده شده است. این استراتژی در هر سناریو به‌صورت زیر عمل می‌کند:

- اگر توان تولیدی کل (که مجموع توان تولیدی توربین‌های بادی و سلول‌های فتوولتائیک است) بیشتر از تقاضای بار باشد، از توان اضافی برای شارژ بانک باتری تا حد بالای  $E_{Batt}^{Max}$  استفاده می‌شود.
- اگر توان تولیدی کل کمتر از تقاضای بار باشد و سطح شارژ در دسترس بانک باتری ( $E_{Batt} - E_{Batt}^{Min}$ ) قادر به پاسخگویی به کمبود تقاضای بار باشد، از بانک باتری برای جبران کمبود توان استفاده می‌شود.
- اگر مجموع توان تولیدی کل و سطح شارژ در دسترس بانک باتری ( $E_{Batt} - E_{Batt}^{Min}$ ) نیز قادر به پاسخگویی به تقاضای بار نباشند، دیزل ژنراتور روشن شده و کمبود توان را جبران می‌کند. توان اضافی تولیدی توسط دیزل ژنراتور، برای شارژ بانک باتری تا حد بالای  $E_{Batt}^{Max}$  استفاده می‌شود.

$$CRF(ir, LT_{proj}) = \frac{ir \times (1 + ir)^{LT_{proj}}}{(1 + ir)^{LT_{proj}} - 1} \quad (13)$$

نرخ بهره‌ی واقعی سالیانه نیز به نرخ بهره‌ی اسمی ( $i$ ) و نرخ تورم سالیانه ( $f$ ) وابسته است و از رابطه‌ی (۱۴) قابل محاسبه است [۲۲].

$$ir = \frac{i - f}{1 + f} \quad (14)$$

در این مقاله،  $i = 20\%$  و  $f = 18\%$  در نظر گرفته شده است.

## ۵-۲- هزینه‌ی تعویض

واحدهایی که طول عمری کمتر از طول عمر پروژه دارند (باتری، اینورتر و می‌تواند دیزل ژنراتور هم باشد)، در طول عمر پروژه نیاز به تعویض دارند. ARC (US\$) با رابطه‌ی (۱۵) محاسبه می‌شود [۲۲].

$$ARC_i = RC_i \times SFF(ir, LT_{rep}) \quad (15)$$

که در آن،  $RC_i$  هزینه‌ی تعویض هر واحد (US\$) و  $SFF(ir, LT_{rep})$  فاکتور وجوه استهلاکی است که به طول عمر هر واحد ( $LT_{rep}$ ) و نرخ بهره‌ی واقعی سالیانه طبق رابطه‌ی (۱۶) وابسته است [۲۲].

$$SFF(ir, LT_{rep}) = \frac{ir}{(1 + ir)^{LT_{rep}} - 1} \quad (16)$$

## ۵-۳- هزینه‌ی سوخت دیزل ژنراتور

با توجه به میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور در هر ساعت، هزینه‌ی ساعتی مصرف سوخت از رابطه‌ی (۱۷) محاسبه می‌شود [۱۵].

$$FC(t) = P_{fuel} \times Cons_D(t) \quad (17)$$

که در این مقاله،  $P_{fuel} = 0.5\$$  هزینه‌ی هر لیتر سوخت است.

## ۵-۴- تابع هدف

مسئله‌ی اصلی در این مقاله، تخصیص بهینه‌ی تعداد واحدهای سیستم تجدیدپذیر ترکیبی برای کمینه‌کردن هزینه‌ی کل سالیانه‌ی سیستم است. بدین منظور، تابع هدف در این مقاله به‌صورت رابطه‌ی (۱۸) تعریف شده و با استفاده از تکنیک‌های بهینه‌سازی حل می‌شود.

$$\text{Minimize ACS}(N_{PV}, N_{WT}, N_{Batt}) \quad (18)$$

## ۵-۵- قیود

در مسئله‌ی بهینه‌سازی، قیودی برای سیستم در نظر گرفته می‌شود که در ادامه به آن می‌پردازیم. در ابتدا قیودی برای تعداد هریک از واحدها طبق روابط (۱۹) الی (۲۱) در نظر می‌گیریم.

$$N_{PV} = \text{Integer} \quad N_{PV}^{Min} \leq N_{PV} \leq N_{PV}^{Max} \quad (19)$$

تکرار،  $w$  وزن اینرسی،  $c_1$  ضریب یادگیری شخصی،  $c_2$  ضریب یادگیری جمعی و  $r_1$  و  $r_2$  اعداد تصادفی با توزیع یکنواخت هستند.

## ۷-۲- بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ضرایب انقباض

اگر سرعت ذرات در هنگام اجرای الگوریتم PSO محدود نشود، پس از چند تکرار سرعت ذرات به‌طور غیرقابل‌قبولی افزایش می‌یابد. برای تنظیم سرعت ذرات، روشی تحت عنوان بهینه‌سازی ازدحام ذرات با ضرایب انقباض (CPSO) در [۳۹] معرفی شده است که در این مقاله مورد استفاده قرار می‌گیرد.

## ۷-۳- بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته

به‌طور معمول در الگوریتم PSO، یک مقدار ثابت مثبت برای وزن اینرسی در نظر می‌گیرند؛ اما برای بهبود عملکرد الگوریتم، برای وزن اینرسی یک تابع خطی کاهشی مثبت نیز می‌توان در نظر گرفت [۴۰]. با در نظر گرفتن وزن اینرسی به‌صورت یک تابع خطی کاهشی مثبت، عملکرد بهینه‌سازی الگوریتم بهبود می‌یابد اما مشکلاتی را نیز دارد. در هر مرحله تکرار، فاصله‌ی بین هر ذره و  $gbest$  متفاوت است، در حالی‌که تمامی ذرات دارای وزن اینرسی یکسانی در فضای جست‌وجو هستند که سبب کاهش سرعت همگرایی می‌گردد؛ علاوه بر این، تنظیم بهینه‌ی ضرایب در این تابع نیز کار زمان‌بری است. در مطالعات مختلف سعی کرده‌اند که مقادیر را به‌طور مناسبی تنظیم کنند اما مقادیر پیشنهادی در تمامی مسائل عملکرد مناسبی نخواهد داشت و نیاز است که وزن اینرسی بهبود یابد. در [۴۱]، روش بهبودیافته‌ی جدیدی معرفی شده است. در این روش در هر تکرار وزن اینرسی هر ذره با سایر ذرات متفاوت است. وزن اینرسی در هر تکرار بر اساس فاصله‌ی بین موقعیت هر ذره و  $gbest$  مشخص می‌شود؛ بنابراین ذرات نزدیک‌تر به  $gbest$ ، وزن اینرسی کمتری نسبت به ذرات با فاصله‌ی بیشتر خواهند داشت؛ درعین‌حال، برای ذرات احتمال افتادن در اکسترم‌های محلی بیشتر می‌شود. برای رفع این مسئله، یک ترم تصادفی جهت کاهش حساسیت اضافه شده است. روش تنظیم  $w(t)$  در هر تکرار مطابق رابطه‌ی (۲۷) در نظر گرفته می‌شود [۴۱].

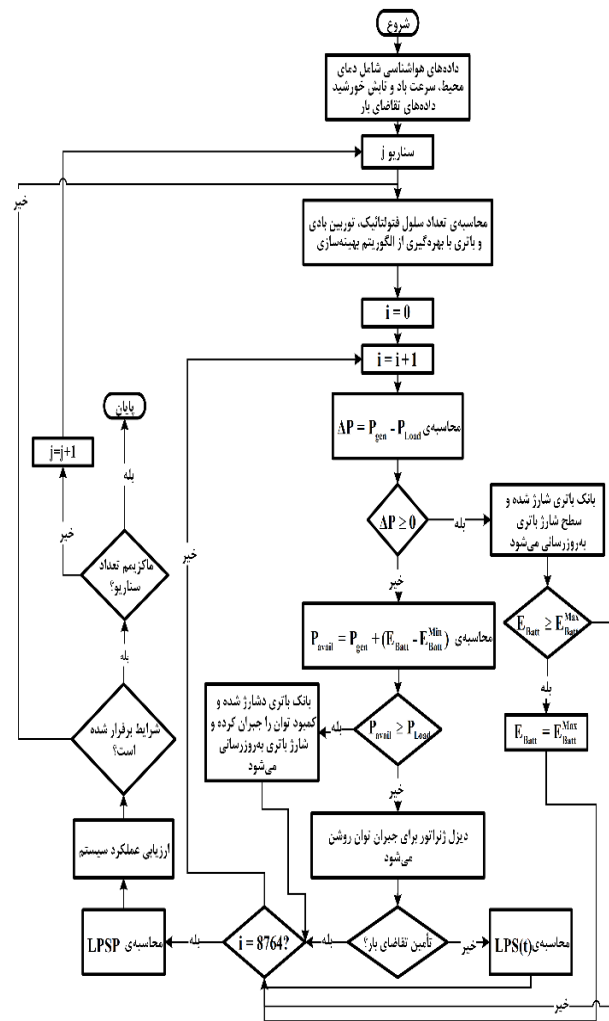
$$w_j(t) = (r_3 + d_{jg}(t) / d_{wg}(t)) \quad (27)$$

که در آن  $d_{jg}$  فاصله‌ی بین موقعیت کنونی ذره‌ی  $j$ ام و  $gbest$ ،  $d_{wg}$  فاصله‌ی بین موقعیت بدترین ذره (ذره با بزرگ‌ترین تابع هزینه) در تکرار  $t$  و  $gbest$  و  $r_3$  عددی تصادفی با توزیع یکنواخت است. در این مقاله، جهت بهبود نتایج و افزایش سرعت همگرایی، برای سرعت ذرات نیز قیدی در نظر گرفته شده است.

$$|V_j(t)| \leq V_{max} \quad (28)$$

که  $V_{max}$  مطابق رابطه‌ی (۲۹) تعریف می‌شود.

$$V_{max} = \alpha(x_{Max} - x_{Min}) \quad (29)$$



شکل (۱): استراتژی عملکرد سیستم طراحی شده

## ۷- بهینه‌سازی

روش‌های بهینه‌سازی به تکنیک‌های محاسباتی اطلاق می‌شود که هدف آن‌ها رسیدن به یک راه‌حل بهینه از مجموعه مقادیر ممکن است.

## ۷-۱- بهینه‌سازی ازدحام ذرات

در الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO)، هر ذره با دو مقدار  $x_j$  و  $V_j$  که به ترتیب معرف موقعیت مکانی و سرعت ذره هستند، مشخص می‌شود. چگونگی به‌روزرسانی موقعیت و سرعت ذرات به شکل روابط (۲۵) و (۲۶) است [۳۸].

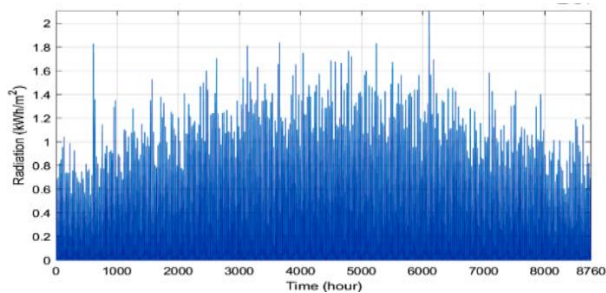
$$V_j(t+1) = wV_j(t) + c_1r_1(pbest_j(t) - x_j(t)) + c_2r_2(gbest(t) - x_j(t)) \quad (25)$$

$$x_j(t+1) = V_j(t+1) + x_j(t) \quad t = 1, 2, \dots, iter_{Max} \quad (26)$$

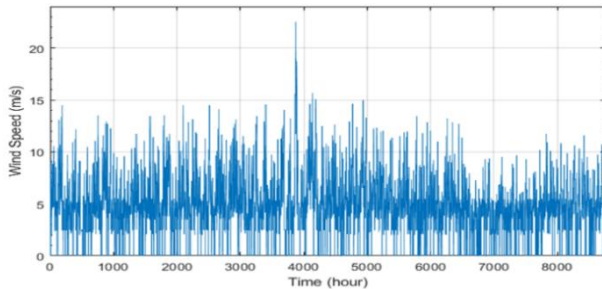
که در آن،  $j$  اندیس ذرات ( $j = 1, 2, \dots, N_{pop}$ )،  $N_{pop}$  تعداد کل جمعیت،  $pbest$  بهترین جواب از لحاظ شایستگی،  $gbest$  بهترین موقعیت به‌دست‌آمده توسط جمعیت ذرات،  $iter_{Max}$  بیشینه‌ی تعداد



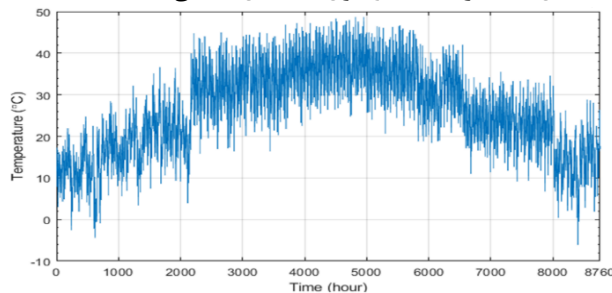
است که سطح شارژ (SOC) هر یک از باتری‌ها در حالت اولیه به‌اندازه‌ی ۸۰٪ مقدار نامی ظرفیت باتری باشد.



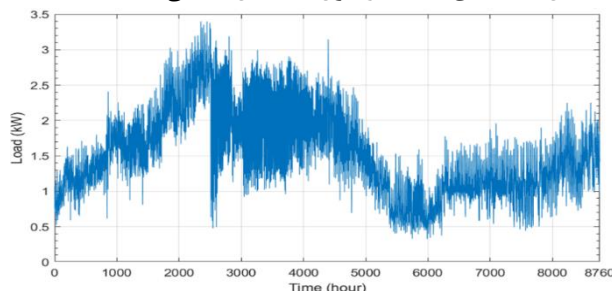
شکل (۳): تابش خورشید در طول یک سال ساعتی (۸۷۶۰ ساعت)



شکل (۴): سرعت باد در طول یک سال ساعتی (۸۷۶۰ ساعت)



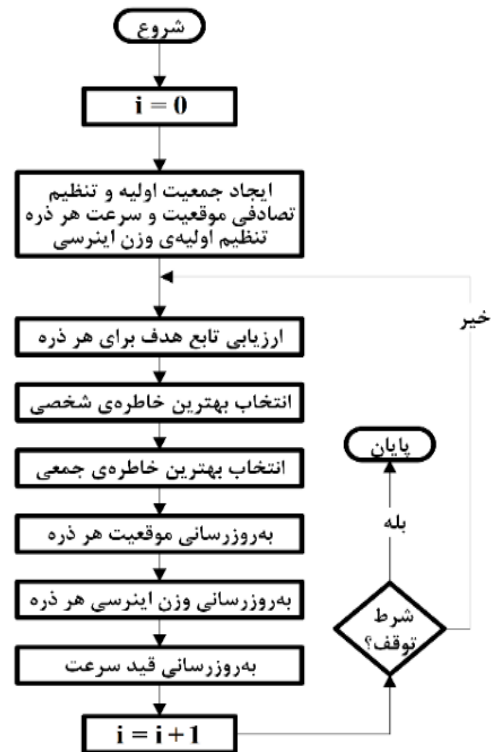
شکل (۵): دمای محیط در طول یک سال ساعتی (۸۷۶۰ ساعت)



شکل (۶): تقاضای بار در طول یک سال ساعتی (۸۷۶۰ ساعت)

در جدول (۱) خلاصه‌ای از نتایج حل مسئله‌ی بهینه‌سازی برای هر سه الگوریتم و با ۵۰ اجرای مستقل گزارش داده شده است. در این جدول؛ شاخص‌های آماری شامل میانگین، انحراف معیار، بهترین و بدترین مقدار برای هر سه الگوریتم و برای سه سیستم ترکیبی توربین بادی/ فتوولتائیک/ باتری/ دیزل، فتوولتائیک/ باتری/ دیزل و توربین بادی/ باتری/ دیزل با  $LPSP_{Max} = 0$  گزارش شده است.

که در آن  $x_{Min}$  و  $x_{Max}$  به ترتیب حد بالا و حد پایین متغیرهای تصمیم‌گیری هستند. شکل (۲) نحوه‌ی اجرای الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته‌ی پیشنهادی در این مقاله را نشان می‌دهد.



شکل (۲): نحوه‌ی اجرای الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته‌ی پیشنهادی در این پژوهش

## ۸- شبیه‌سازی و نتایج

در این مقاله، اطلاعات ساعتی تابش خورشید، سرعت باد، دمای محیط و بار مصرفی برای منطقه‌ای دورافتاده و با فاصله از شبکه در استان سیستان و بلوچستان در طی یک سال (۸۷۶۰ ساعت) جمع‌آوری شده و میزان تغییرات آن‌ها به ترتیب در شکل‌های (۳)–(۶) نمایش داده شده است. برای کدنویسی از نرم‌افزار MATLAB استفاده شده است. در این پژوهش، سیستم مورد استفاده جهت اجرای برنامه‌ها Core i5 با مدل پردازنده‌ی 4210U است. برای شبیه‌سازی در هر سناریو از سه الگوریتم ازدحام ذرات معمولی، با ضرایب انقباض و بهبودیافته استفاده شده و جهت مقایسه‌ی الگوریتم‌ها با یکدیگر، هر یک به‌طور مستقل ۵۰ بار اجرا شده و در پایان نتایج، مقایسه و گزارش شده‌اند. در این پژوهش، پارامترهای الگوریتم‌های بهینه‌سازی؛  $c_1, c_2 = 2$ ،  $w = 1$  برای PSO؛  $\phi_1, \phi_2 = 2.05$  و  $\alpha = 0.1$  برای MPSO و همچنین برای هر سه الگوریتم  $N_{pop} = 100$  و  $iter_{Max} = 100$  در نظر گرفته شده است. همچنین، تعداد کمینه و بیشینه‌ی متغیرهای تصمیم‌گیری ۰ تا ۱۰۰ برای فتوولتائیک، ۰ تا ۲۰ برای توربین‌های بادی و ۰ تا ۲۰۰ برای باتری‌ها در نظر گرفته شده است. فرض بر این

جدول (۱): نتایج حل مسئله بهینه‌سازی برای سه سیستم ترکیبی  
با استفاده از سه الگوریتم PSO، CPSO و MPSO برای  
 $LSP_{Max} = 0$  و با ۵۰ اجرای مستقل

سیستم ترکیبی	شاخص‌های آماری			هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم پیشنهادی (\$)
	MPSO	CPSO	PSO	
توربین بادی / فتوولتائیک / دیزل	۴۹۷۸/۱۸	۷۱۹۶/۴۷	۱۰۹۹۸/۲۱	میانگین
	۱۲۴/۰۰	۵۴۲/۴۸	۸۲۹/۵۴	انحراف معیار
	۴۷۴۰/۰۵	۴۸۵۶/۸۴	۵۰۱۴/۸۸	بهترین
	۵۴۱۷/۶۶	۱۱۸۷۷/۹۳	۱۷۳۸۵/۳۸	بدترین
فتوولتائیک / بادی / دیزل	۱	۲	۳	رتبه
	۵۱۰۰/۰۶	۶۵۴۷/۶۰	۸۰۹۰/۸۰	میانگین
	۷۸/۱۴	۴۵۹/۲۸	۷۳۱/۱۶	انحراف معیار
	۴۹۵۷/۴۹	۴۹۵۷/۴۹	۵۲۱۲/۳۱	بهترین
توربین بادی / دیزل	۵۲۸۶/۹۶	۹۴۳۹/۷۹	۱۲۰۱۸/۹۶	بدترین
	۱	۲	۳	رتبه
	۷۳۱۲/۲۱	۸۳۳۰/۹۶	۱۱۱۱۳/۸۵	میانگین
	۲۵۳/۵۱	۷۲۰/۳۷	۱۰۴۳/۱۲	انحراف معیار
توربین بادی / دیزل	۷۰۰۱/۸۲	۷۰۵۴/۲۳	۷۱۰۵/۹۶	بهترین
	۸۰۰۲/۱۲	۱۴۳۷۲/۹۵	۱۵۸۸۹/۱۰	بدترین
	۱	۲	۳	رتبه
	۱	۲	۳	رتبه‌بندی نهایی

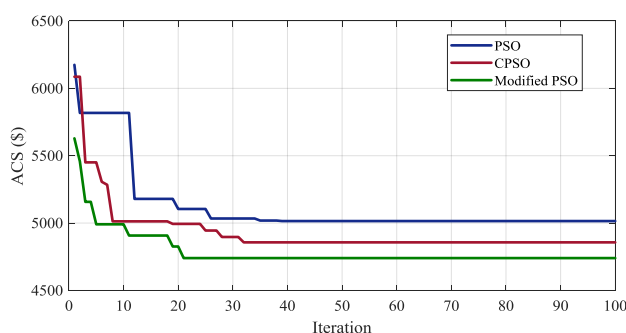
همان‌گونه که از جدول (۱) مشخص است، برای سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / بادی / دیزل، مقدار بهینه‌ی هزینه‌ی سالیانه با الگوریتم MPSO، کمتر از بهترین مقدار الگوریتم‌های CPSO و PSO است. به همین ترتیب میانگین، انحراف معیار و بدترین مقدار نیز برای این الگوریتم از دو الگوریتم دیگر کمتر است. برای سیستم ترکیبی فتوولتائیک / بادی / دیزل، مقدار بهینه‌ی هزینه‌ی سالیانه برای هر دو الگوریتم CPSO و MPSO یکسان به‌دست آمده که کمتر از بهترین مقدار الگوریتم PSO است و برای سیستم ترکیبی توربین بادی / بادی / دیزل، مقدار بهینه‌ی هزینه‌ی سالیانه با الگوریتم MPSO، کمتر از بهترین مقدار الگوریتم‌های CPSO و PSO است. در این جدول، الگوریتم‌ها در هر سیستم ترکیبی بر اساس بهترین نتیجه و سایر شاخص‌های آماری رتبه‌بندی شده‌اند.

مدت‌زمان اجرای هریک از سه الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش برای سه سیستم ترکیبی مختلف با  $LSP_{Max} = 0$  در جدول (۲) گزارش شده است. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص است که الگوریتم MPSO نسبت به دو الگوریتم دیگر مدت‌زمان اجرای کمتری دارد. همچنین، به‌منظور نشان دادن کارایی و عملکرد همگرایی الگوریتم پیشنهادی در این پژوهش، منحنی همگرایی هر سه الگوریتم برای هر سه سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / بادی / دیزل، فتوولتائیک / بادی / دیزل و توربین بادی / بادی / دیزل با  $LSP_{Max} = 0$  به ترتیب در شکل‌های (۷)، (۸) و (۹) نمایش داده شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود الگوریتم ازدحام ذرات

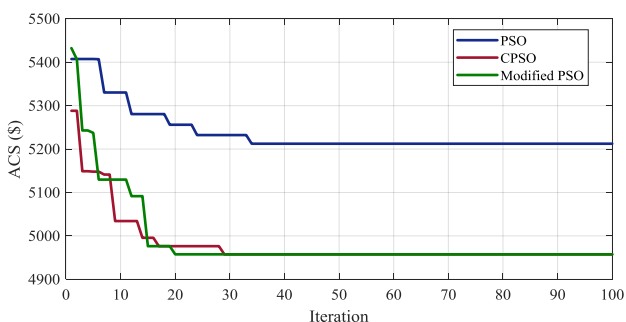
بهبود یافته‌ی پیشنهادی در این پژوهش از لحاظ سرعت همگرایی نیز برای هر سه سیستم ترکیبی برتری محسوس نسبت به دو الگوریتم دیگر دارد.

جدول (۲): مدت‌زمان محاسباتی اجرا برای سه سیستم ترکیبی با استفاده از سه الگوریتم PSO، CPSO و MPSO برای  $LSP_{Max} = 0$

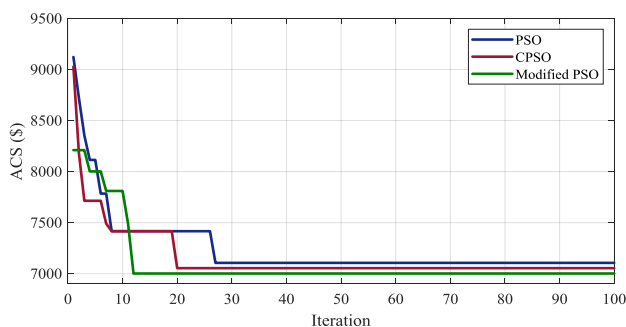
الگوریتم	زمان محاسباتی اجرا برای هر سیستم ترکیبی (ثانیه)		
	توربین بادی / فتوولتائیک / بادی / دیزل	فتوولتائیک / بادی / دیزل	توربین بادی / دیزل
PSO	۹۰۳/۵	۶۸۵/۲	۶۰۴/۶
CPSO	۸۷۲/۳	۶۵۳/۷	۵۷۱/۵
MPSO	۸۱۱/۷	۵۸۰/۴	۵۲۶/۱



شکل (۷): منحنی همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / بادی / دیزل برای  $LSP_{Max} = 0$

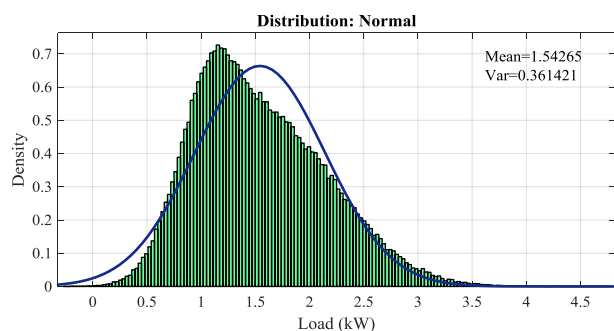


شکل (۸): منحنی همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای سیستم ترکیبی فتوولتائیک / بادی / دیزل برای  $LSP_{Max} = 0$



شکل (۹): منحنی همگرایی الگوریتم‌های بهینه‌سازی برای سیستم ترکیبی توربین بادی / بادی / دیزل برای  $LSP_{Max} = 0$





شکل (۱۳): تابع چگالی احتمال برای سناریوهای تقاضای بار مصرفی تولید شده

این توزیع سناریوها در سمت تولید با استفاده از روابط (۲) و (۴) به توان تولیدی فتوولتائیک و توربین بادی تبدیل می‌شوند. به عنوان نمونه نتایج سناریوهای تولید شده برای توان تولیدی توربین بادی و احتمال متناظر با آن در ساعت اول در جدول (۳) گزارش شده است. در نهایت جهت رسیدن به یک جواب واحد برای برنامه‌ریزی احتمالاتی بهینه، سناریوها با بیشترین احتمال وقوع انتخاب می‌شوند.

جدول (۳): توان تولیدی توربین بادی و احتمال متناظر با آن برای

سناریوهای ساعت اول

شماره سناریو	توان تولیدی (kW)	احتمال
۱	۰/۲۶۲۴	۰/۰۶۱
۲	۰/۲۷۵۸	۰/۰۶۸
۳	۰/۳۱۶۵	۰/۰۴۹
۴	۰/۲۹۸۴	۰/۰۴۹
۵	۰/۳۱۶۳	۰/۰۸
۶	۰/۲۸۹۵	۰/۰۶۷
۷	۰/۲۹۹۶	۰/۰۵۸
۸	۰/۲۹۴۵	۰/۰۶۶
۹	۰/۲۴۹۷	۰/۰۴۹
۱۰	۰/۳۱۳۱	۰/۰۴۷
۱۱	۰/۲۷۵۰	۰/۰۵
۱۲	۰/۳۴۲۷	۰/۰۹۷
۱۳	۰/۲۶۸۹	۰/۰۸۲
۱۴	۰/۳۳۲۲	۰/۰۷۳
۱۵	۰/۲۸۴۹	۰/۱۰۴

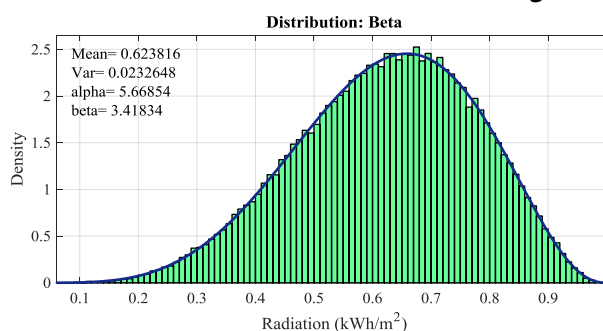
جدول (۴) تعداد بهینه‌ی هریک از اجزا را برای سه سیستم ترکیبی و برای ۴ مقدار  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ ۰، ۱٪، ۲٪ و ۵٪ نشان می‌دهد. از جدول (۴) مشخص است که در هر سه سیستم ترکیبی، با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، مقدار بهینه‌ی هزینه‌ی سالیانه کاهش پیدا کرده که کمترین هزینه برای سیستم توربین بادی/ فتوولتائیک/ باتری/ دیزل با  $LPSP_{Max} = 5\%$  است. با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، مجموع ساعات روشن شدن دیزل نیز افزایش یافته و در نتیجه سهم دیزل از تولید کل نیز افزایش یافته است. همچنین، برای سیستم ترکیبی توربین بادی/ فتوولتائیک/ باتری/ دیزل، با افزایش  $LPSP_{Max}$  سهم تولید فتوولتائیک

بدین ترتیب بر اساس نتایج به دست آمده می‌توان هر سه الگوریتم را از نظر توانایی جست‌وجو برای حل مسئله‌ی بهینه‌سازی و عملکرد همگرایی به شکل زیر رتبه‌بندی کرد.

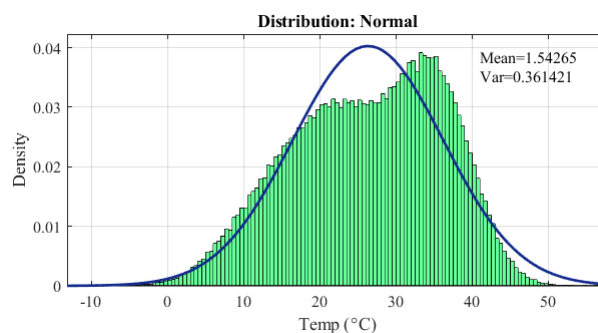
$$MPSO > CPSO > PSO$$

در ادامه‌ی مقاله به منظور حل مسئله‌ی بهینه‌سازی در تمامی حالت‌ها از الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات بهبودیافته‌ی پیشنهادی استفاده می‌شود.

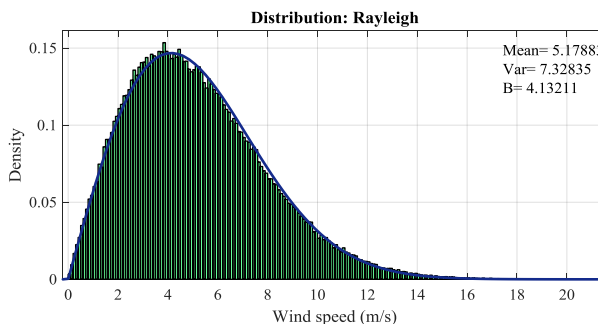
جهت تولید سناریو با در نظر گرفتن پارامترهای جمع‌آوری شده‌ی آب‌وهوایی برای متغیرهای غیرقطعی مسئله، تعدادی مقادیر به صورت تصادفی و با توجه به توابع توزیع احتمالاتی متغیرها تولید می‌شوند. توزیع سناریوهای تولید شده برای تابش خورشید، دمای محیط، سرعت باد و تقاضای بار مصرفی به ترتیب در شکل‌های (۱۰)، (۱۱) و (۱۲) نشان داده شده است.



شکل (۱۰): تابع چگالی احتمال برای سناریوهای تابش خورشید تولید شده



شکل (۱۱): تابع چگالی احتمال برای سناریوهای دمای محیط تولید شده

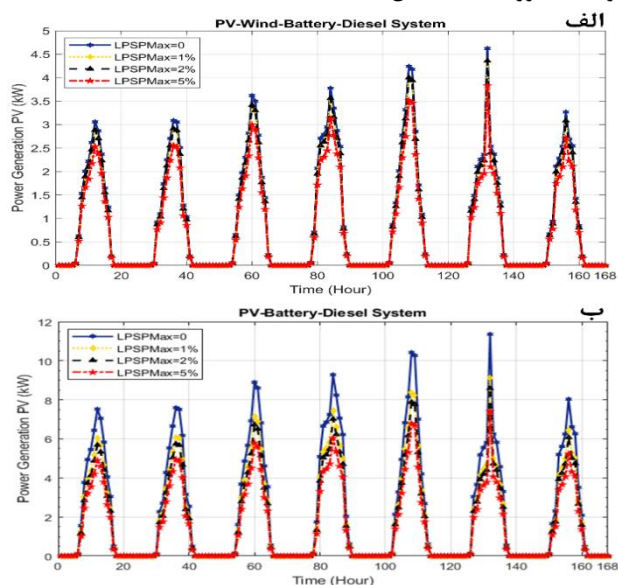


شکل (۱۲): تابع چگالی احتمال برای سناریوهای سرعت باد تولید شده

جدول (۴): نتایج بهینه‌سازی سه سیستم ترکیبی مختلف با الگوریتم MPSO برای  $LPSP_{Max} = 0.1\%, 2\%, 5\%$ 

سیستم ترکیبی	$LPSP_{Max}$ (%)	تعداد PV	تعداد توربین	تعداد باتری	$LPSP$ (%)	ACS (\$)	سهم از تولید کل (%)			مصرف سوخت (Litre/year)
							PV	توربین	دیزل	
فتوولتائیک / بادی / باتری / دیزل	۰	۳۵	۵	۳۶	۰	۴۷۴۰/۰۵	۴۵/۴	۵۴/۲	۰/۴	۳۵/۸۲
	۱	۳۳	۳	۲۲	۰/۹	۳۴۷۵/۱۱	۵۴/۶	۴۱/۴	۴	۳۲۷/۷۶
	۲	۳۳	۲	۱۹	۱/۹۶	۳۲۵۰/۵۷	۶۰/۸	۳۰/۷	۸/۵	۶۴۱/۰۴
	۵	۲۹	۱	۱۳	۴/۸۴	۳۱۰۰/۵۲	۶۱/۷	۱۷/۸	۲۰/۵	۱۳۳۲/۳۸
دیزل / فتوولتائیک / باتری	۰	۸۶	۰	۶۷	۰	۴۹۵۷/۴۹	۹۹/۹	۰	۰/۱	۸/۳۸
	۱	۶۹	۰	۵۰	۰/۸۴	۳۹۷۴/۵۰	۹۹	۰	۱	۹۸/۳۳
	۲	۶۵	۰	۴۴	۱/۹۲	۳۷۰۳/۵۳	۹۷/۹	۰	۲/۱	۱۹۲/۸۴
	۵	۵۶	۰	۳۲	۴/۹۷	۳۳۳۵/۵۲	۹۳/۹	۰	۶/۱	۵۰۰/۷۹
توربین / دیزل / باتری	۰	۰	۱۳	۲۸	۰	۷۰۰۱/۸۲	۰	۹۹/۸	۰/۲	۳۸/۸۷
	۱	۰	۶	۹	۰/۹۴	۴۰۴۳/۴۶	۰	۸۹	۱۱	۸۵۲/۱۸
	۲	۰	۵	۵	۱/۹۷	۳۸۰۴/۵۶	۰	۸۲	۱۸	۱۲۶۹/۸۸
	۵	۰	۴	۵	۲/۶	۳۶۸۸/۸۷	۰	۷۴/۱	۲۵/۹	۱۶۱۳/۶۵

شکل (۱۴): (الف) تغییرات هزینه بهینه سالیانه سیستم، (ب) تغییرات تعداد باتری‌های بهینه، برای سه سیستم ترکیبی با استفاده از الگوریتم MPSO برای  $LPSP_{Max} = 0.1\%, 2\%, 5\%$ .  
 شکل‌های (۱۵) و (۱۶)، انرژی تولیدی توسط فتوولتائیک و توربین بادی را برای ۷ روز اول سال (۱۶۸ ساعت) و با در نظر گرفتن  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ ۰، ۱٪، ۲٪ و ۵٪ نشان می‌دهند. مشاهده می‌شود که با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، میزان انرژی تولیدی فتوولتائیک و توربین بادی کاهش پیدا کرده است. برای سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل برای  $LPSP_{Max}$ ، ۱٪ و ۲٪ میزان انرژی تولیدی فتوولتائیک یکسان است.

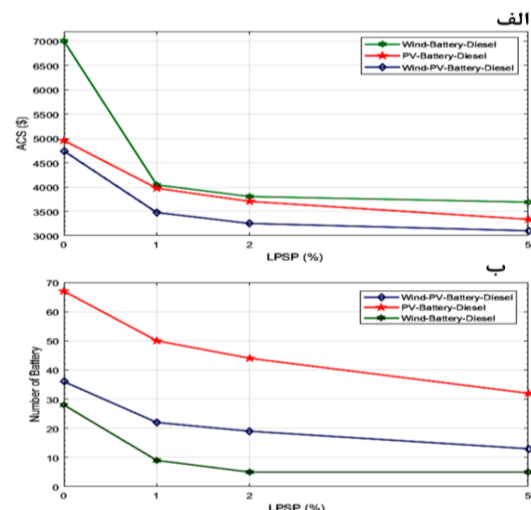


شکل (۱۵): انرژی تولیدی فتوولتائیک برای  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ ۰، ۱٪، ۲٪ و ۵٪. (الف) توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل، (ب) فتوولتائیک / باتری / دیزل؛ برای ۷ روز اول سال (۱۶۸ ساعت)

و دیزل از تولید کل افزایش یافته و سهم توربین‌های بادی کاهش یافته است؛ به طوری که در  $LPSP_{Max} = 0$  سهم تولید فتوولتائیک ۴۵/۴٪، توربین بادی ۵۴/۲٪ و دیزل ۰/۴٪ در  $LPSP_{Max} = 5\%$  سهم تولید فتوولتائیک ۶۱/۷٪، توربین بادی ۱۷/۸٪ و دیزل ۲۰/۵٪ است.

در شکل (۱۴) به ازای  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ ۰، ۱٪، ۲٪ و ۵٪ و با بهره‌گیری از الگوریتم MPSO برای هر سه سیستم ترکیبی، تغییرات هزینه بهینه سالیانه سیستم (شکل ۱۴-الف) و تغییرات تعداد باتری‌های بهینه (شکل ۱۴-ب) نشان داده شده است. مشخص است که با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، مقدار هزینه بهینه سالیانه سیستم و تعداد باتری‌ها در هر سه سیستم ترکیبی کاهش می‌یابد.

با توجه به شکل (۱۴-ب) مشخص است که تعداد باتری‌ها برای سیستم ترکیبی توربین بادی / باتری / دیزل نسبت به دو سیستم ترکیبی دیگر برای تمامی مقادیر  $LPSP_{Max}$  کمتر و بیشترین تعداد باتری در هر  $LPSP_{Max}$  متعلق به سیستم ترکیبی فتوولتائیک / باتری / دیزل است.



## ۹- پیاده‌سازی

در جدول (۴) مشاهده شد که با افزایش  $LPSP_{Max}$  هم‌زمان با کاهش هزینه بهینه‌ی سالیانه‌ی سیستم، سهم دیزل از تولید و به دنبال آن مصرف سوخت نیز افزایش می‌یابد که این امر موجب تولید گازهای گلخانه‌ای بیشتر خواهد شد. همچنین تهیه و حمل و نقل سوخت در این مطالعه‌ی موردی امری دشوار و هزینه‌بر است؛ به همین دلیل جهت کاهش میزان مصرف سوخت دیزل ژنراتور، به الگوریتم بهینه‌سازی قید دیگری را به صورت رابطه‌ی (۳۰) اضافه می‌کنیم.

$$\left( \sum_{t=1}^{8760} Cons_D(t) \right) \leq fuel \quad (30)$$

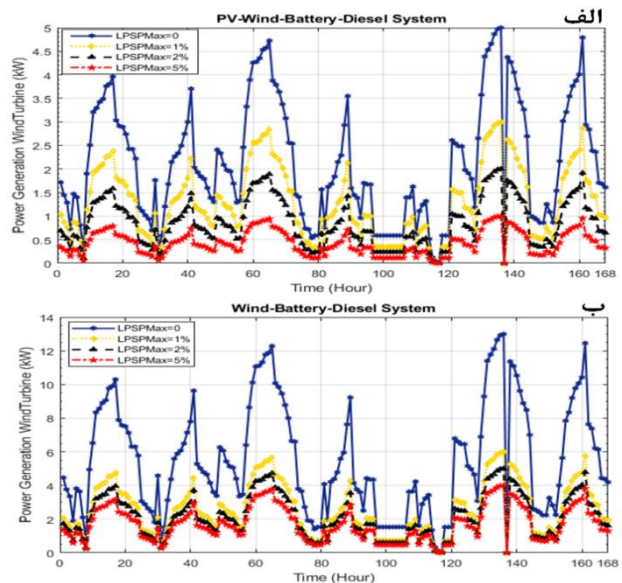
که در آن  $\sum_{t=1}^{8760} Cons_D(t)$  میزان سوخت مصرفی دیزل ژنراتور بر حسب لیتر در طول یک سال و  $fuel$  حدمجاز میزان مصرف سوخت بر حسب لیتر در طی یک سال است. به منظور پیاده‌سازی عملی سیستم ترکیبی پیشنهادی،  $LPSP_{Max} = 1\%$  و  $fuel = 100$  در نظر گرفته می‌شود. نتایج بهینه‌سازی برای این شرایط در جدول (۵) گزارش شده است.

از جدول (۵) چنین برمی‌آید که در نظر گرفتن قید  $fuel$  موجب کاهش درصد سهم تولید دیزل ژنراتور از تولید کل و در نتیجه کاهش مصرف سوخت شده است.

جدول (۵): نتایج بهینه‌سازی برای سه سیستم ترکیبی با الگوریتم MPSO به ازای  $LPSP_{Max} = 1\%$  و  $fuel = 100$  جهت پیاده‌سازی عملی

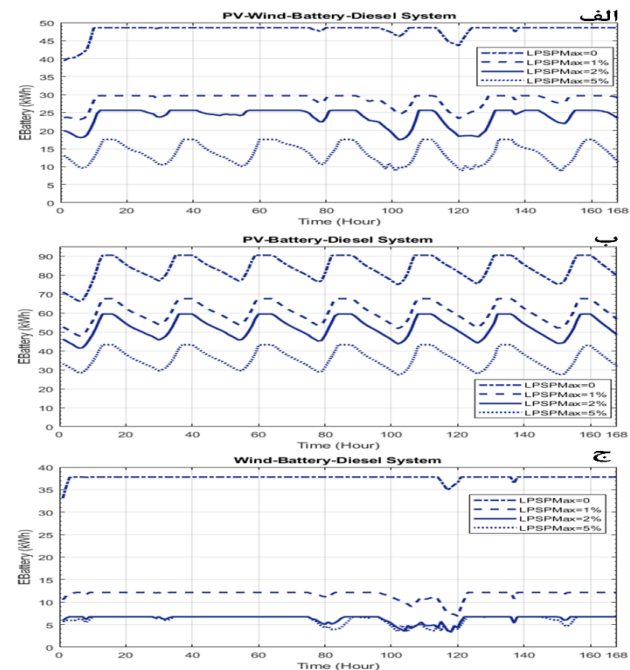
سیستم ترکیبی	تعداد			مصرف سوخت (لیتر)	ACS(\$)
	PV	توربین	باتری		
توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل	۵۹	۱	۴۵	۶۰/۶۴	۳۹۶۴/۰۰
فتوولتائیک / باتری / دیزل	۶۹	۰	۵۰	۹۸/۳۳	۳۹۷۴/۵۰
توربین بادی / باتری / دیزل	۰	۱۱	۲۹	۵۳/۴۷	۶۲۴۸/۷۸

با توجه به جدول (۵)، در سیستم ترکیبی توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل با افزودن حدمجاز برای مصرف سوخت در مقایسه با جدول (۴)، تعداد PV و باتری از ۳۳ و ۲۲ به ۴۵ و ۵۹ افزایش یافته و تعداد توربین از ۳ به ۱ کاهش یافته است که سبب کاهش مصرف سوخت از ۳۲۷/۷۶ به ۶۰/۶۴ لیتر در سال شده و در نتیجه‌ی آن، هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم از \$۳۴۷۵/۱۱ به \$۳۹۶۴/۰۰ افزایش پیدا کرده است. در سیستم ترکیبی فتوولتائیک / باتری / دیزل با توجه به این که در حالت بدون قید، میزان سوخت مصرفی کمتر از ۱۰۰ لیتر در سال بود، تغییری در جدول (۵) نسبت به جدول (۴) حاصل نشد و در سیستم ترکیبی توربین بادی / باتری / دیزل، تعداد توربین بادی و باتری از ۶ و ۹ به ۱۱ و ۲۹ افزایش یافته که



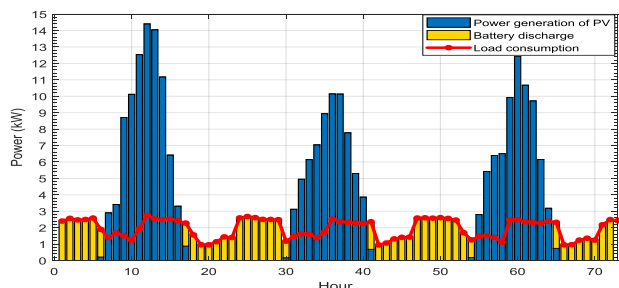
شکل (۱۶): انرژی تولیدی توربین بادی برای  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ ۰، ۱٪، ۲٪ و ۵٪. (الف) توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل، (ب) توربین بادی / باتری / دیزل؛ برای ۷ روز اول سال (۱۶۸ ساعت)

با توجه به این موضوع که قابلیت اطمینان تقاضای بار در سیستم به انرژی ذخیره‌شده در بانک باتری بستگی دارد، مقدار مورد انتظار انرژی ذخیره‌شده در بانک باتری در طول ۷ روز اول سال (۱۶۸ ساعت) برای  $LPSP_{Max} = 0, 1\%, 2\%, 5\%$  و برای هر سه سیستم ترکیبی در شکل (۱۷) نشان داده شده است. واضح است که احتمال تأمین نکردن تقاضای بار بیشتر در ساعت‌هایی است که انرژی ذخیره‌شده در بانک باتری به کمترین حد مجاز خود رسیده باشد.

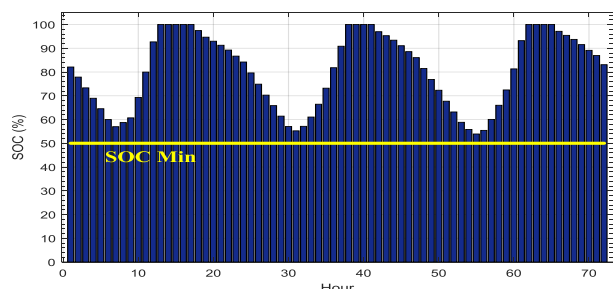


شکل (۱۷): انرژی ذخیره‌شده در بانک باتری برای  $LPSP_{Max}$  مختلف؛ (الف) توربین بادی / فتوولتائیک / باتری / دیزل، (ب) فتوولتائیک / باتری / دیزل، (ج) توربین بادی / باتری / دیزل؛ برای ۷ روز اول سال

نشان می‌دهد. از شکل (۲۰) مشخص است که بار الکتریکی مصرفی به خوبی توسط توان تولیدی پنل‌ها و دشارژ باتری‌ها تأمین شده است. همچنین، سطح شارژ بانک باتری نیز برای این ۷۲ ساعت در شکل (۲۱) نشان داده شده است. از شکل (۲۱) مشخص است که هیچ‌گاه سطح شارژ بانک باتری کمتر از ۵۰ درصد ظرفیت نامی بانک باتری نمی‌شود.



شکل (۲۰): تأمین تقاضای بار مصرفی با بهره‌گیری از سیستم ترکیبی نصب‌شده در طی ۷۲ ساعت پس از راه‌اندازی



شکل (۲۱): سطح شارژ بانک باتری سیستم ترکیبی نصب‌شده در طی ۷۲ ساعت پس از راه‌اندازی

## ۱۰- نتیجه‌گیری

در این مقاله، برای طراحی و بهینه‌سازی سیستم تولید انرژی تجدیدپذیر ترکیبی از سه الگوریتم PSO، CPSO و MPSO جهت تأمین تقاضای بار و با هدف کمینه‌کردن هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم (ACS) در حضور محدودیت‌ها استفاده شده و نتایج این الگوریتم‌ها ارزیابی و باهم مقایسه شده‌اند. در این مقاله، برای در نظر گرفتن عدم قطعیت در سمت تقاضا و تولید از روش تولید سناریو استفاده شده است. برای در نظر گرفتن قابلیت اطمینان سیستم، حد مجاز احتمال هدررفت توان تعریف شده است. نتایج بهینه‌سازی نشان از سرعت و عملکرد همگرایی بهتر الگوریتم ازدحام ذرات بهبودیافته‌ی پیشنهادی نسبت به دو الگوریتم مشابه دیگر دارد.

نتایج نشان می‌دهند که در هر سه سیستم ترکیبی، با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، مقدار هزینه‌ی بهینه‌ی سالیانه‌ی سیستم و تعداد بهینه‌ی باتری‌ها کاهش می‌یابد. همچنین مشاهده شد که با افزایش  $LPSP_{Max}$ ، هم‌زمان با کاهش هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم، سهم توان تولیدی دیزل ژنراتور از تولید کل نیز افزایش یافته و در نتیجه میزان سوخت مصرفی دیزل نیز افزایش می‌یابد که با توجه به محدودیت‌هایی

سبب کاهش مصرف سوخت از ۸۵۲/۱۸ به ۵۳/۴۷ لیتر در سال شده و به تبع آن هزینه‌ی سالیانه‌ی سیستم از ۴۰۴۳/۴۶\$ به ۶۲۴۸/۷۸\$ افزایش پیدا کرده است. با توجه به نزدیک بودن هزینه‌ی سالیانه‌ی دو سیستم ترکیبی فتوولتائیک/ توربین بادی/ باتری/ دیزل و فتوولتائیک/ باتری/ دیزل و اختلاف ۱۰/۵\$ بین آن‌ها، جهت تأمین تقاضای انرژی در مطالعه‌ی موردی، سیستم ترکیبی فتوولتائیک/ باتری/ دیزل انتخاب می‌شود؛ دلیل این امر آسیب‌هایی است که ممکن است بر اثر اغتشاش و آشفته‌گی باد در این مطالعه‌ی موردی بر توربین بادی ایجاد شود.

جهت پیاده‌سازی عملی، با توجه به ولتاژ کاری ۴۸ ولت اینورتر، لازم است که مجموعه‌ی باتری‌ها نیز به صورت ۴۸ ولت سربندی شوند و بدین ترتیب تعداد باتری‌ها باید مضرب صحیحی از عدد چهار باشد که نزدیک‌ترین عدد بزرگ‌تر از تعداد بهینه‌ی به دست آمده در جدول (۵)، ۵۲ عدد است. پس از بازدید میدانی و بررسی محیط فیزیکی محوطه‌ی مطالعه‌ی موردی، محل نصب پنل‌ها تعیین و با انتخاب موقعیت‌های قرارگیری پنل‌ها، پایه‌های پنل‌ها در موقعیت‌های موردنظر به صورت ثابت نصب شده‌اند. برای جذب حداکثری انرژی سالیانه توسط پنل‌ها، زاویه‌ی شیب پنل‌ها برابر با عرض جغرافیایی منطقه‌ی مطالعه‌ی موردی در نظر گرفته شده است.

در شکل‌های (۱۸) و (۱۹) به ترتیب قسمتی از پنل‌های خورشیدی نصب‌شده در محوطه و نمایی از باتری‌ها در فضای داخلی نشان داده شده است.



شکل (۱۸): نمایی از پنل‌های خورشیدی نصب‌شده در محوطه



شکل (۱۹): نمایی از باتری‌های نصب‌شده در فضای داخلی

پس از تکمیل و راه‌اندازی سیستم توسط یک رایانه‌ی شخصی و از طریق اتصال به اینورتر-شارژر، داده‌ها از تاریخ ۱۳۹۸/۲/۱۵ ساعت ۱۰:۰۰ بامداد به صورت ساعتی و به مدت ۷۲ ساعت جمع‌آوری شده است. شکل (۲۰) تأمین بار الکتریکی مصرفی برای این ۷۲ ساعت را



- batteries hybrid systems by minimizing the annualized cost system and the loss of power supply probability (LPSP)," in 2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT), 2013, pp. 861-868.
- [9] O. Hazem Mohammed, Y. Amirat, and M. Benbouzid, "Economical Evaluation and Optimal Energy Management of a Stand-Alone Hybrid Energy System Handling in Genetic Algorithm Strategies," *Electronics*, vol. 7, no. 10, 2018.
  - [10] H. Yang, W. Zhou, L. Lu, and Z. Fang, "Optimal sizing method for stand-alone hybrid solar-wind system with LPSP technology by using genetic algorithm," *Solar Energy*, vol. 82, no. 4, pp. 354-367, 2008.
  - [11] N. I. Abdul Aziz, S. I. Sulaiman, S. Shaari, I. Musirin, and K. Sopian, "Optimal sizing of stand-alone photovoltaic system by minimizing the loss of power supply probability," *Solar Energy*, vol. 150, pp. 220-228, 2017.
  - [12] S. Sanajaoba, "Optimal sizing of off-grid hybrid energy system based on minimum cost of energy and reliability criteria using firefly algorithm," *Solar Energy*, vol. 188, pp. 655-666, 2019.
  - [13] A. L. Bakar, C. W. Tan, and K. Y. Lau, "Optimal sizing of an autonomous photovoltaic/ wind/ battery/ diesel generator microgrid using grasshopper optimization algorithm," *Solar Energy*, vol. 188, pp. 685-696, 2019.
  - [14] A. Chauhan and R. P. Saini, "Discrete harmony search based size optimization of Integrated Renewable Energy System for remote rural areas of Uttarakhand state in India," *Renewable Energy*, vol. 94, pp. 587-604, 2016.
  - [15] A. Maleki and A. Askarzadeh, "Optimal sizing of a PV/wind/diesel system with battery storage for electrification to an off-grid remote region: A case study of Rafsanjan, Iran," *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, vol. 7, pp. 147-153, 2014.
  - [16] R. Velik and P. Nicolay, "Energy management in storage-augmented, grid-connected prosumer buildings and neighborhoods using a modified simulated annealing optimization," *Computers & Operations Research*, vol. 66, pp. 248-257, 2016.
  - [17] S. Sanajaoba and E. Fernandez, "Maiden application of Cuckoo Search algorithm for optimal sizing of a remote hybrid renewable energy System," *Renewable Energy*, vol. 96, pp. 1-10, 2016.
  - [18] F. Samadi Gazijahani, J. Salehi, and N. Taghizadegan Kalantari, "Optimal Planning of Microgrids with Considering Load and Renewable Power Generation Uncertainty," (in eng), *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity, Research* vol. 7, no. 13, pp. 54-67, 2018.
  - [19] A. Kornelakis and Y. Marinakis, "Contribution for optimal sizing of grid-connected PV-systems using PSO," *Renewable Energy*, vol. 35, pp. 1333-1341, 2010.
  - [20] M. A. Hossain, H. R. Pota, S. Squartini, and A. F. Abdou, "Modified PSO algorithm for real-time energy management in grid-connected microgrids," *Renewable Energy*, vol. 136, pp. 746-757, 2019.
  - [21] N. Ghorbani, A. Kasaeian, A. Toopshekan, L. Bahrami, and A. Maghami, "Optimizing a hybrid wind-PV-battery system using GA-PSO and MOPSO for reducing cost and increasing reliability," *Energy*, vol. 154, pp. 581-591, 2018.

که در تهیه و حمل‌ونقل سوخت در مطالعه‌ی موردی این مقاله وجود دارد؛ جهت پیاده‌سازی عملی سیستم ترکیبی در این مطالعه‌ی موردی، به الگوریتم بهینه‌سازی محدودیت حدمجاز مصرف سوخت نیز اضافه شد و در ادامه با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی، سیستم ترکیبی فتوولتائیک/ باتری/ دیزل به‌عنوان سیستم تولید انرژی برای مطالعه‌ی موردی انتخاب و مراحل آماده‌سازی، نصب و راه‌اندازی صورت گرفت. با دریافت اطلاعات به مدت ۷۲ ساعت پس از راه‌اندازی، نتایج نشان از تأمین بار الکتریکی مصرفی و برآورده‌شدن تمام قیود عملیاتی دارد.

برای پژوهش‌های آینده توصیه می‌شود که اثر رزرو چرخان در سیستم انرژی‌های تجدیدپذیر موردبررسی قرار گیرد. پیشنهاد دیگر طراحی بهینه‌ی ظرفیت سیستم تجدیدپذیر با در نظر گرفتن پاسخگویی بار در حضور آب‌شیرین‌کن است.

## مراجع

- [1] M. Parvizimosaed, F. Farmani, A. Anvari Moghaddam, A. Rahimi-kian, and H. Monsef, "A Multi-Objective Algorithm for Siting and Sizing of Renewable Resources in Distribution Network Considering Load Model," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 12, no. 1, pp. 59-68, 2015.
- [2] R. Ghaffarpour, B. Mozafari, A. M. Ranjbar, and T. Torabi, "Resilience oriented water and energy hub scheduling considering maintenance constraint," *Energy*, vol. 158, pp. 1092-1104, 2018.
- [3] B. Namvar, M. Aghashafiei, M. Abolghasemi, M. Moradi-Dalvand, and M. Ahmadian, "Optimal Sizing of DERs in Islanded MG for Supplying Electrical and Thermal Load Considering the Impact of Investment, Operation and Environmental Cost," *Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers*, vol. 12, no. 1, pp. 35-46, 2015.
- [4] D. Torres, J. Crichigno, G. Padilla, and R. Rivera, "Scheduling coupled photovoltaic, battery and conventional energy sources to maximize profit using linear programming," *Renewable Energy*, vol. 72, pp. 284-290, 2014.
- [5] O. H. Mohammed, Y. Amirat, M. Benbouzid, S. Haddad, and G. Feld, "Optimal sizing and energy management of hybrid wind/tidal/PV power generation system for remote areas: Application to the Ouessant French Island," in *IECON 2016 - 42nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2016, pp. 4205-4210.
- [6] M. S. Ismail, M. Moghavvemi, and T. M. I. Mahlia, "Genetic algorithm based optimization on modeling and design of hybrid renewable energy systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 85, pp. 120-130, 2014.
- [7] B. Ould Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, and M. Ndongo, "Optimal design of a hybrid solar-wind-battery system using the minimization of the annualized cost system and the minimization of the loss of power supply probability (LPSP)," *Renewable Energy*, vol. 35, no. 10, pp. 2388-2390, 2010.
- [8] B. O. Bilal, V. Sambou, P. A. Ndiaye, C. M. F. Kébé, and M. Ndongo, "Multi-objective design of PV-wind-



- Annals of Operations Research, vol. 100, no. 1, pp. 25-53, 2000.
- [37] S. Pineda and A. J. Conejo, "Scenario reduction for risk-averse electricity trading," *Generation, Transmission & Distribution, IET*, vol. 4, pp. 694-705, 2010.
- [38] O. Naghash Almasi, A. Modirkhazeni, and M. Parniani, "Improvement of Inertia Response in Variable Speed Wind Turbines Using T-S Fuzzy System and PSO Algorithm," *jiasee*, vol. 13, no. 3, pp. 83-94, 2016.
- [39] M. Clerc and J. Kennedy, "The particle swarm - explosion, stability, and convergence in a multidimensional complex space," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 1, pp. 58-73, 2002.
- [40] B. Jeddi, R. Ghaffarpour, and A. M. Ranjbar, "Optimal Planning of Renewable Energy Resources in Smart Power Distribution Networks for Improvement of Passive Defense Indices," *jiasee*, vol. 15, no. 1, pp. 1-14, 2018.
- [41] A. Askarzadeh and A. Rezazadeh, "Optimization of PEMFC model parameters with a modified particle swarm optimization," *International Journal of Energy Research*, vol. 35, no. 14, pp. 1258-1265, 2010.
- [22] M.-A. Yazdanpanah Jahromi and S. M. Barakati, "A New Perspective in Design and Optimization of Hybrid Renewable Energy Systems: Consideration of Supply/Demand Match Evaluation Criteria together with the reliability of the system," *jiasee*, vol. 13, no. 3, pp. 37-48, 2016.
- [23] J.-L. Duchaud, G. Notton, A. Fouilloy, and C. Voyant, "Wind, solar and battery micro-grid optimal sizing in Tilos Island," *Energy Procedia*, vol. 159, pp. 22-27, 2019.
- [24] M. Jamshidi and A. Askarzadeh, "Techno-economic analysis and size optimization of an off-grid hybrid photovoltaic, fuel cell and diesel generator system," *Sustainable Cities and Society*, vol. 44, pp. 310-320, 2019.
- [25] L. M. Halabi, S. Mekhilef, L. Olatomiwa, and J. Hazelton, "Performance analysis of hybrid PV/diesel/battery system using HOMER: A case study Sabah, Malaysia," *Energy Conversion and Management*, vol. 144, pp. 322-339, 2017.
- [26] J. Khoury, R. Mbayed, G. Salloum, and E. Monmasson, "Optimal sizing of a residential PV-battery backup for an intermittent primary energy source under realistic constraints," *Energy and Buildings*, vol. 105, pp. 206-216, 2015.
- [27] A. Maleki and F. Pourfayaz, "Optimal sizing of autonomous hybrid photovoltaic/wind/battery power system with LPSP technology by using evolutionary algorithms," *Solar Energy*, vol. 115, pp. 471-483, 2015.
- [28] A. Khan et al., "Enhanced Evolutionary Sizing Algorithms for Optimal Sizing of a Stand-Alone PV-WT-Battery Hybrid System," *Applied Sciences*, vol. 9, no. 23, 2019.
- [29] C. Shang, D. Srinivasan, and T. Reindl, "An improved particle swarm optimisation algorithm applied to battery sizing for stand-alone hybrid power systems," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 74, pp. 104-117, 2016.
- [30] F. S. Gazijahani and J. Salehi, "Integrated DR and reconfiguration scheduling for optimal operation of microgrids using Hong's point estimate method," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 99, pp. 481-492, 2018.
- [31] A. Maleki and A. Askarzadeh, "Artificial bee swarm optimization for optimum sizing of a stand-alone PV/WT/FC hybrid system considering LPSP concept," 2014, pp. 227-235.
- [32] J. Ma, P. Li, X. Lin, W. Zhu, and X. Yuan, "Game theory method for multi-objective optimizing operation in microgrid," in *2015 IEEE 12th International Conference on Networking, Sensing and Control*, 2015, pp. 421-425.
- [33] R. Dufo-López and J. L. Bernal-Agustín, "Multi-objective design of PV-wind-diesel-hydrogen-battery systems," *Renewable Energy*, vol. 33, no. 12, pp. 2559-2572, 2008.
- [34] N. Nikmehr and S. Najafi Ravadanegh, "A heuristic Solution for Probabilistic Power Flow in Microgrids," *jiasee*, vol. 13, no. 3, pp. 27-36, 2016.
- [35] A. Soroudi, R. Caire, N. Hadsaid, and M. Ehsan, "Probabilistic Dynamic Multi-objective Model for Renewable and Non-renewable DG Planning," *IET generation, transmission & distribution*, vol. 5, pp. 1173-1182, 2011.
- [36] J. Dupačová, G. Consigli, and S. W. Wallace, "Scenarios for Multistage Stochastic Programs,"