

## تعیین بهینه ظرفیت باتری‌ها در بهره‌برداری اقتصادی از ریزشبکه با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته

سنا انصاری<sup>(۱)</sup> - سیروس محمدی<sup>(۲)</sup>

(۱) کارشناس ارشد - گروه مهندسی برق، واحد بندرعباس، دانشگاه آزاد اسلامی، بندرعباس، ایران

(۲) استادیار - گروه مهندسی برق، واحد گچساران، دانشگاه آزاد اسلامی، گچساران، ایران

تاریخ دریافت: ۱۱/۲/۹۸ تاریخ پذیرش: ۱۴/۴/۹۸

**خلاصه:** امروزه با افزایش میزان تقاضا برای انرژی الکتریکی استفاده از منابع تولید پراکنده و به ویژه منابع تجدیدپذیر روز به روز در حال رشد است و این منابع در غالب ریزشبکه‌ها توان مورد نیاز سیستم را تأمین می‌کنند. بهره‌برداری از منابع تجدیدپذیر معمولاً با عدم قطعیت همراه می‌باشد. از این رو، در این مقاله در ابتدا آرایش بهینه منابع تولید پراکنده موجود در سیستم در دو حالت کاری، جزیره‌ای و اتصال به شبکه، تعیین می‌گردند. از آنجایی که بهره‌برداری از ریزشبکه در حضور منابع تولید پراکنده و قیود مختلف، یک مسئله بهینه‌سازی با قیود متعدد است در این مطالعه از الگوریتم جستجوی فاخته که یک الگوریتم فراابتکاری با سرعت همگرایی بالا می‌باشد به منظور حل مسئله بهینه‌سازی و تعیین آرایش تولید واحدها استفاده شده است. به منظور کاهش تأثیر عدم قطعیت توان خروجی سیستم فتوولتائیک، از ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است که در این مقاله ظرفیت بهینه آن متناسب با شرایط بهره‌برداری تعیین می‌گردد. الگوریتم پیشنهادی برای تعیین ظرفیت بهینه باتری در یک ریزشبکه نمونه پیاده‌سازی شده است. نتایج بدست آمده نشان از کارایی روش پیشنهادی برای تعیین آرایش بهینه منابع تولید پراکنده و ظرفیت بهینه باتری دارد.

**کلمات کلیدی:** ریزشبکه، الگوریتم جستجوی فاخته، ذخیره‌ساز انرژی، بهره‌برداری اقتصادی، سیستم فتوولتائیک.

## Determination of Optimal Battery Capacity in Economic Operation of Micro Grid by Cuckoo Search Algorithm

Sana Ansari<sup>(1)</sup> - Sirus Mohammadi<sup>(2)</sup>

(1) MSc - Department of Electrical Engineering, Bandarabbas Branch, Islamic Azad University, Bandarabbas, Iran

sana.ansari8891@gmail.com

(2) Assistant Professor - Department of Electrical Engineering, Gachsaran Branch, Islamic Azad University, Gachsaran, Iran

sirusjozar@gmail.com

**Abstract:** The current demand in the power system has led to increasing usage of the Distributed Generation (DG) and renewable resources. The renewable resources can efficiently supply the loads in the micro grids. The output power generation of renewable energy resources is unpredictable. Hence, in this paper the optimal generation dispatch of the DGs in micro grids in both grid-connected and islanded modes is determined. Since the operation of the micro grid in presence of DGs and various constraints is a complicated optimization problem, in this paper a meta-heuristic Cuckoo search (CS) algorithm with high convergence speed is used. In order to reduce the uncertainty of the output power of photovoltaic system the energy storage system is implemented and the optimal capacity of the storage is determined based on operation conditions. The proposed algorithm for determining the optimal capacity of the battery in a sample micro grid is applied. The results show the effectiveness of the proposed method for determining the optimal dispatch of the DGs and capacity of the energy storage system.

**Index Terms:** Micro grid, Cuckoo search algorithm, Energy storage System, Economic dispatch, Photovoltaic system.

## ۱. مقدمه

انرژی کلید توسعه و پیشرفت در مسیر رو به جلو صنعت برق می‌باشد. تقاضا برای انرژی الکتریکی در سرتاسر جهان روز به روز در حال افزایش بوده و پیش‌بینی می‌شود که در آینده‌ای نزدیک این تقاضا چندین برابر گردد. همچنین، میزان افزایش تقاضای انرژی در چند سال اخیر بسیار سریع‌تر از رشد ظرفیت‌های در دسترس توان و نیروگاه بوده است. از این رو، افزایش میزان تقاضا، تلفات زیاد در طی شبکه‌های انتقال و توزیع، تأمین توان برای مناطق دوردست که به شبکه سراسری دسترسی ندارند، چالش‌هایی است که امروزه بخش انرژی با آن‌ها روبرو می‌باشد. انرژی‌های تجدیدپذیر و منابع تولید پراکنده برپایه ریزشبه‌ها یکی از اولین روش‌های امیدوار کننده برای رویارویی با این مشکلات بوده است. استفاده از این ساختارها، علاوه بر تأمین توان برای مناطق دوردست که موجب کاهش تلفات در طی شبکه‌های انتقال و توزیع می‌گردد، سبب تولید انرژی پاک با آلودگی کمتر برای محیط زیست خواهد شد [۱] و [۲]. از سوی دیگر، تمایل به استفاده از ریزشبه‌های مبتنی بر منابع تولید پراکنده در سال‌های اخیر و پس از وقوع تجدید ساختار در صنعت برق، افزایش یافته است. انتخاب نوع صحیح انرژی تجدیدپذیر برای یک ریزشبه بستگی به موقعیت جغرافیایی مورد نظر دارد. علاوه بر این، برای مناطق روستایی و دور افتاده، استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی برای تأمین توان، از نظر اقتصادی کاملاً به صرفه می‌باشد. ترکیب دو یا تعداد بیشتری از منابع تجدیدپذیر انرژی، مانند خورشید، باد، زیست توده، میکروتوربین و... با یکدیگر می‌تواند یک تأمین توان پایدار حتی در مقایسه با انرژی‌ای که از طریق شبکه سراسری برق تأمین می‌گردد، فراهم آورد [۳] و [۴]. در تنظیمات یک ریزشبه، برنامه‌ریزی و کنترل بهینه ریزشبه نقش اساسی در حداکثرسازی سودهای بالقوه در زمان بهره‌برداری از آن دارد [۵]. هزینه کل بهره‌برداری از ریزشبه با ارائه یک طرح مناسب و انتخاب صحیح منابع تولید پراکنده و استراتژی‌های کنترلی مناسب حداقل خواهد شد.

مطالعات زیادی در زمینه ارزیابی و بررسی چگونگی برنامه‌ریزی و بهره‌برداری از ریزشبه‌ها انجام شده است [۶-۸]. یک مدل چند عامله شامل تأمین کنندگان و مصرف کنندگان برای مطالعه مدیریت انرژی توزیع شده با هدف حداکثرسازی سود ریزشبه بررسی شده است [۶]. در مرجع [۸] به مدیریت بهینه یک ریزشبه از طریق یک رویکرد برنامه نویسی خطی دو مرحله‌ای مختلط پرداخته شده است.

در برخی از این مطالعات هدف انتخاب صحیح منابع تولید پراکنده و ظرفیت آن‌ها برای ریزشبه بوده است [۹-۱۲]. در مرجع [۱۰] یک مدل بهینه‌سازی دقیق برای برنامه‌ریزی عملکرد ریزشبه هیبریدی جزیره‌ای ارائه شده است. هدف برنامه‌ریزی دقیق واحدهای تولیدی به منظور تأمین توان با رویکرد حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری است. در مرجع [۱۱] یک الگوریتم ترکیبی نلدر مید-فاخته برای به حداقل رساندن اتلاف انرژی در ریزشبه جزیره‌ای AC/DC هیبریدی، با هدف بهینه‌سازی توان خروجی منابع تولید پراکنده پیشنهاد شده است.

به طور کلی در تمامی مطالعات هدف تأمین توان ریزشبه با رویکرد حداکثرسازی سود ریزشبه بوده است. از سوی دیگر، به دلیل استفاده

از منابع تجدیدپذیر در ریزشبه‌ها و با توجه به ماهیت غیرقطعی این منابع که به شرایط آب و هوایی بستگی دارند، استفاده از سیستم‌های ذخیره انرژی که می‌توانند نوسانات را جذب کنند، اجتناب‌ناپذیر شده‌اند. نویسندگان مرجع [۱۲] یک روش ترکیبی مبتنی بر سیستم فازی و الگوریتم گرگ خاکستری، به منظور تعیین ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز باتری در ریزشبه جزیره‌ای، ایجاد نموده‌اند. در مرجع [۱۳] بهره‌برداری بهینه از یک ریزشبه متصل به شبکه شامل منابع فتوولتاییک و باتری بررسی شده است. تابع هدف تعیین اندازه ذخیره‌ساز باتری مورد استفاده در شبکه می‌باشد. با توجه به مطالب ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که در هر یک از فعالیت‌های پژوهشی و یا اجرایی اخیر سعی شده است تا بخشی از مسأله تعیین ظرفیت سیستم‌های ذخیره‌ساز پوشش داده شود. اما یکسری نواقص وجود دارد که از آن جمله می‌توان به در نظر نگرفتن ریزشبه در هر دو مد کاری متصل به شبکه، حداکثر / حداقل انرژی قابل ذخیره در ذخیره‌ساز انرژی و قیود تساوی مربوط به رفتار پرریودیک ذخیره‌ساز اشاره کرد. توجه به این نکته ضروری است از آنجایی که مسئله پخش بار و تعیین ظرفیت یک مسئله پیچیده غیرخطی می‌باشد، امروزه تمایل به استفاده از الگوریتم‌های فراابتکاری نظیر الگوریتم فاخته افزایش یافته است. در مرجع [۱۴] از الگوریتم جستجوی فاخته برای بهینه‌سازی پخش بار در حضور ادوات FACTS پرداخته شده است. در مرجع [۱۵] با استفاده از الگوریتم جستجوی فاخته مکان‌یابی همزمان منابع تولید پراکنده و جبران کننده‌های استاتیکی پراکنده در سیستم‌های توزیع شعاعی انجام گرفته است. در تمامی مطالعات پس از بررسی سیستم تست، موثر و عملی بودن الگوریتم فاخته در جهت کاهش تلفات و بهبود پروفیل ولتاژ مشاهده گردیده است.

بنابراین در این مقاله، تلاش شده است رابطه‌ای بین تعیین اندازه سیستم ذخیره‌ساز انرژی با هزینه کل ریزشبه شامل منابع تولید پراکنده متنوع در هر دو حالت کارکرد این شبکه بیان شود. برای تعیین اندازه بهینه از الگوریتم جستجوی فاخته استفاده شده است. الگوریتم پیشنهادی هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبه را در حضور و عدم حضور سیستم ذخیره‌ساز با ظرفیتهای مختلف محاسبه می‌کند. اندازه مطلوب ذخیره‌ساز، با توجه به توابع هدف به حداقل رساندن هزینه شبکه برای حالت جزیره‌ای و حداکثرسازی ارزش خالص آن (NPV) برای حالت متصل به شبکه تعیین می‌گردد. همچنین از آنجایی که توان خروجی منابع تجدیدپذیر تابع شرایط محیطی است، در این مطالعه از الگوریتم شبکه عصبی برای پیش‌بینی خروجی سیستم فتوولتاییک موجود در ریزشبه نمونه استفاده شده است.

این مقاله در ۵ بخش و به ترتیب زیر ارائه شده است. در بخش دوم، ساختار بهره‌برداری از ریزشبه در حضور منابع تولید پراکنده و باتری با هدف حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری از سیستم ارائه شده است. در بخش سوم الگوریتم جستجوی فاخته شرح داده شده و به دنبال آن نتایج حاصل از شبیه‌سازی و مطالعات عددی در بخش چهارم ارائه گردیده است. نتیجه‌های بدست آمده از مطالعات و الگوریتم پیشنهادی در بخش پنجم ارائه شده است.

## ۲. بهره‌برداری از ریزشبه

که  $\eta$  بازده تبدیل آرایه‌های سلول خورشیدی بر حسب درصد می‌باشد،  $S$  نشان دهنده سطح مقطع سلول‌های خورشیدی ( $m^2$ )،  $I$  میزان شدت تشعشع خورشیدی ( $kw / m^2$ ) و  $t_o$  دمای محیط بیرون ( $^{\circ}C$ ) می‌باشند.

به منظور پیش‌بینی میزان تشعشع خورشید در یک روز خاص بر پایه اطلاعات آب و هوایی مربوط به یک ماه پیش، از الگوریتم شبکه‌های عصبی استفاده شده است. در فرایند پیش‌بینی، اطلاعات آب و هوایی یک ماه قبل و همچنین اطلاعات مربوط به وضعیت آب و هوایی پیش‌بینی شده برای یک روز خاص که توسط سازمان هواشناسی منطقه ارائه شده است، به عنوان اطلاعات ورودی در لایه ورودی به شبکه عصبی اعمال می‌گردد. خروجی مورد نظر نیز میزان تشعشع خورشید در روز مورد نظر خواهد بود [۱۹-۲۱].

### ۲-۱- مدل سیستم ذخیره ساز انرژی (ESS)

میزان انرژی‌ای که در ESS ذخیره می‌گردد به عنوان متغیر حالت در نظر گرفته شده است. توان خروجی ESS را می‌توان به کمک اختلاف بین انرژی ذخیره شده در دو حالت متوالی محاسبه کرد. تمامی حالت‌هایی که در اینجا مورد استفاده قرار می‌گیرند برای بازه زمانی یک ساعت می‌باشند. انرژی ذخیره شده در تجهیزات ذخیره‌ساز به صورت زیر بیان می‌گردند.

زمانی که ESS در حال شارژ می‌باشد  $(P(t) < 0)$ :

$$-\eta_c P(t) \Delta t \leq K_c Q_{\max} \quad (2)$$

$$Q_s(t+1) = Q_s(t) - \eta_c P(t) \Delta t \quad (3)$$

و زمانی که ESS در حال دشارژ می‌باشد  $(P(t) > 0)$ :

$$P(t) \Delta t / \eta_D \leq K_D Q_{\max} \quad (4)$$

$$Q_s(t+1) = Q_s(t) - P(t) \Delta t / \mu_D \quad (5)$$

و زمانی که ESS هیچ فعالیتی ندارد  $(P(t) = 0)$ :

$$Q_s(t+1) = Q_s(t) - W_{\text{hourly}} \quad (6)$$

که  $\eta_c$  بازده شارژ،  $\eta_D$  بازده دشارژ،  $K_c$  حداکثر مقدار ظرفیت نامی که می‌تواند در هر ساعت به ذخیره‌ساز افزوده گردد،  $K_D$  حداکثر مقدار ظرفیت نامی که می‌تواند در هر ساعت از ذخیره‌ساز گرفته شود،  $Q_{\max}$  حداکثر انرژی ذخیره شده نامی،  $W_{\text{hourly}}$  (kWh) میزان انرژی که در هر ساعت از ذخیره‌ساز دشارژ می‌گردد،  $Q_s(t)$  مجموع کل ظرفیت تمامی باتری‌ها در ساعت  $t$ ،  $P(t)$  (kWh) میزان توان خروجی ESS در ساعت  $t$  و  $\Delta t$  بازه زمانی (یک ساعت در این مطالعه) می‌باشند. اضافه کردن یک ESS به ریزشبه‌ها می‌تواند موجب جذب یا تزریق توان اکتیو یا راکتیو به طور مستقل از/ به شبکه گردد، بنابراین باعث بهبود ظرفیت تنظیم و عملکرد اقتصادی سیستم می‌گردد. زمانی که قیمت برق در بازار زیاد است، ESS می‌تواند به منظور تأمین بارهای محلی دشارژ شود بدون اینکه نیاز به خرید انرژی با قیمت بالا از شبکه بالا دست وجود داشته باشد. زمانی که تعداد زیادی ESS و منابع تولید پراکنده ( $DG$ ) در یک ریزشبه وجود داشته باشد، برنامه‌ریزی بهینه خروجی ESS و  $DG$ ها به منظور حداکثرسازی ارزش خالص فعلی ( $NPV$ ) امری دشوار خواهد بود. از این رو، روش الگوریتم جستجوی

به طور کلی ریزشبه‌ها در دو حالت کاری مختلف مورد بهره‌برداری قرار می‌گیرند: یکی حالت اتصال به شبکه و دیگری جزیره‌ای. در حالت بهره‌برداری اتصال به شبکه، ریزشبه علاوه بر اتصال به شبکه بالادست و تأمین توان از طریق فیدرهای شبکه، از منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبه نیز استفاده می‌کند تا توان مورد نیاز بارهای خود را تأمین کند. از آنجایی که سیستم قدرت یک سیستم پویا و دینامیک است، شرایط بهره‌برداری از سیستم مدام در حال تغییر بوده و متناسب با آن قیمت برق در شبکه در حال تغییر است. از این رو، زمانیکه قیمت برق در بالادست بیشتر از هزینه بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده ریزشبه باشد، بهره‌بردار ریزشبه از این منابع برای تأمین توان استفاده خواهد کرد. همان‌طور که توضیح داده شد، الویت استفاده از منابع تولید پراکنده با رویکرد حداکثرسازی سود ریزشبه مورد نظر می‌باشد. بنابراین، در زمانی که شبکه بالادست در پیک بار قرار داشته و یا نیاز به توان دارد، ریزشبه می‌تواند در صورت امکان علاوه بر تأمین توان مورد نیاز بارهای خود، بخشی از توان مورد نیاز شبکه را نیز تأمین کند. در حقیقت در این حالت با فروش توان به شبکه موجب درآمدزایی ریزشبه خواهد شد [۱۶].

در حالت بهره‌برداری جزیره‌ای، دیگر ریزشبه به شبکه بالادست متصل نیست. در این حالت، بهره‌بردار ریزشبه باید توان مورد نیاز بارها را از طریق منابع تولید پراکنده موجود تأمین کند. هدف تأمین توان ریزشبه با حداقل هزینه ممکن است. از این رو، با اجرای توزیع اقتصادی بار بین منابع تولید پراکنده، میزان هزینه‌های بهره‌برداری از ریزشبه به حداقل می‌رسد.

در این مقاله فرض شده است که ریزشبه ظرفیت کافی به منظور تأمین تقاضای مصرف‌کنندگان محلی خود را دارد. بنابراین، بهره‌برداری از ریزشبه به منظور تعادل تولید و تقاضا در هر بازه زمانی به طور جداگانه اجرا می‌گردد. پیشنهاد قیمت براساس هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری، و هزینه خرید انرژی تعیین می‌گردد.

پیش‌بینی میزان تولید در ریزشبه‌ها امری دشوار و پر چالش می‌باشد. زیرا ظرفیت تولید منابع تجدیدپذیر انرژی متصل به ریزشبه با شرایط خارجی مانند شدت نور خورشید، دما و ... به شدت در حال تغییر است [۱۷].

یکی از منابع تولید پراکنده مورد استفاده در این مطالعه از نوع سیستم فتوولتائیک انتخاب شده است. اما با توجه به اینکه میزان توان خروجی یک PV غیرقطعی بوده و وابسته به سطح تشعشع خورشید در طول روز دارد. از این رو، به منظور یافتن محدوده تولید توان PV در طی ساعات یک روز، از الگوریتم شبکه‌های عصبی و رابطه (۱) که در ادامه معرفی شده است، استفاده می‌گردد.

در سیستم PV نقطه حداکثر توان خروجی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. از این رو، حداکثر توان خروجی سیستم مطابق رابطه (۱) خواهد بود [۱۸].

$$p_s = \eta SI (1 - 0.005(t_o - 25)) \quad (1)$$

$$C_{rep}^{BAT} = \frac{24}{k_i T_a} \left( \sum_{i=1}^L (C_{rep}^P P_M + C_{rep}^W W_M) F_{rep}^{BAT} \right. \\ \left. \times SFF(r, L^{BAT}) - \sum_{i=1}^L S_i^{BAT} SFF(r, L_{proj}) \right) \quad (11)$$

که  $C_{rep}^P$  (\$/kW) هزینه تعویض ظرفیت توان  $ESS$ ،  $C_{rep}^W$  (\$/kWh) هزینه تعویض ظرفیت انرژی  $ESS$ ، ضریب  $F_{rep}^{BAT}$  تعویض  $ESS$ ،  $L^{BAT}$  طول عمر  $ESS$  و  $S^{BAT}$  ارزش بازیافتنی  $ESS$  می‌باشند.

#### ۲-۴- هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری

هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری  $DG$  را می‌توان به صورت دلار به ازای هر ساعت مشخص کرد. از این رو، هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری برای یک  $DG$  در یک بازه زمانی را می‌توان با ضرب هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری  $DG$  در ساعات بهره‌برداری آن بدست آورد. بنابراین، می‌توان هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری روزانه  $DG$  را به صورت رابطه (۱۲) بدست آورد:

$$C_{om}^{DG} = \sum_{i=1}^L C_i^{om} \cdot R_i \cdot 24 \quad (12)$$

که  $C_i^{om}$  هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری  $i$   $DG$  ام می‌باشد. هزینه ساعتی بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری ذخیره‌ساز انرژی به صورت تابعی از دو قسمت اصلی، یکی مربوط به توان نامی  $ESS$  و دیگری مربوط به انرژی دشارژ ساعتی آن، تشکیل می‌گردد.

$$C_{om}^{BAT} = \sum_{P(t) \neq 0, t=1, 2, \dots, 24} C_O P_M + \sum_{P(t)=0, t=1, 2, \dots, 24} C_M W_{hourly} \quad (13)$$

که  $C_O$  (\$/kW) و  $C_M$  (\$/kWh) هزینه ویژه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری می‌باشند.

#### ۲-۵- هزینه سوخت

هزینه سوخت را برای  $PV$  می‌توان برابر با صفر در نظر گرفت. فرض می‌شود که هزینه سوخت ژنراتورهای نیازمند به سوخت، متناسب با زمان بهره‌برداری از آن‌ها متفاوت می‌باشد. هزینه سوخت مطابق رابطه (۱۴) بیان می‌گردد:

$$C_f^{DG}(d) = \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^{24} C_i^f(d) A_i(t) \quad (14)$$

که  $C_i^f(d)$  (\$/واحد سوخت) هزینه سوخت  $i$   $DG$  ام در روز  $d$ ،  $d$  روز سال و  $1 \leq d \leq 365$ ،  $A_i(t)$  مقدار سوختی است که توسط  $DG$   $i$  ام در ساعت  $t$  مصرف می‌گردد و  $K$  تعداد  $DG$  های است، که سوخت مصرف می‌کنند.

#### ۲-۶- هزینه راه‌اندازی

هزینه راه‌اندازی فقط برای واحدهایی که سوخت مصرف می‌کنند در نظر گرفته می‌شود. برای میکروتوربین، هزینه سوخت برای بازه راه‌اندازی در ظرفیت کامل و با بازه ۵۰ درصد به منظور محاسبه هزینه راه‌اندازی در نظر گرفته شده است. برای پیل سوختی، هزینه راه‌اندازی به صورت

فاخته به منظور یافتن ترکیب بهینه از منابع موجود به نحوی که حداکثر مقدار  $NPV$  را نتیجه دهد، مورد استفاده قرار گرفته است.

جهت انجام یک تحلیل اقتصادی، باید هزینه‌های سرمایه‌گذاری  $ESS$  و  $DG$ ، هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری، هزینه خرید انرژی و هزینه راه‌اندازی و استهلاک در نظر گرفته شود.

#### ۲-۲- هزینه سرمایه‌گذاری

معیار بازگشت سرمایه‌گذاری ضریبی است که به منظور محاسبه مقدار سالانه بازگشت سرمایه مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۲].

$$C_c(r, n) = \frac{r(1+r)^n}{(1+r)^n - 1} \quad (7)$$

که  $r$  برابر با نرخ بهره و  $n$  دوره استهلاک در طی سال می‌باشد. هزینه سرمایه‌گذاری  $ESS$  به صورت تابعی از دو بخش اصلی مشخص می‌گردد. یکی مربوط به انرژی قابل ذخیره‌سازی بوده و دیگری مربوط به حداکثر توانی است که ذخیره‌ساز باید تحویل دهد. بنابراین، هزینه سرمایه‌گذاری روزانه  $ESS$  به صورت رابطه (۸) تعریف می‌گردد:

$$C_{cap}^{BAT} = \frac{24}{k_i T_a} C_c(r, n) (C_P P_M + C_W W_M) \quad (8)$$

که  $P_M$  (kW) و  $W_M$  (kWh) به ترتیب برابر با ظرفیت توان و انرژی،  $C_P$  (\$/kW) و  $C_W$  (\$/kWh) برابر با هزینه ویژه متناسب با آن‌ها، ۲۴ تعداد ساعات یک شبانه روز،  $k_i$  ضریب ظرفیت (هزینه‌های سرمایه‌گذاری متناسب با ظرفیت نصب شده به ازای هر حساب کیلووات تغییر می‌کند) و  $T_a$  برابر با تعداد ساعات بهره‌برداری در طول یک روز می‌باشند.

حال هزینه سرمایه‌گذاری روزانه  $DG$  را می‌توان به صورت رابطه (۹) بیان نمود:

$$C_{cap}^{DG} = \frac{24}{k_i T_a} C_c(r, n) \sum_{i=1}^L C_i^{cap} R_i \quad (9)$$

که  $L$  نشان‌دهنده تعداد  $DG$  ها،  $C_i^{cap}$  (\$/kW) هزینه سرمایه‌گذاری  $i$   $DG$  ام و  $R_i$  ظرفیت نصب شده  $i$   $DG$  ام می‌باشند.

#### ۲-۳- هزینه تعویض

هزینه تعویض یک  $DG$  به این دلیل به وجود می‌آید که طول عمر تجهیزات می‌تواند با طول عمر پروژه یکی نباشد [۲۲]. هزینه تعویض  $DG$  را می‌توان به صورت رابطه (۱۰) نوشت:

$$C_{rep}^{DG} = \frac{24}{k_i T_a} \left( \sum_{i=1}^L C_i^{rep} R_i F_i^{rep} SFF(r, L_i^{DG}) - \sum_{i=1}^L S_i SFF(r, L_{proj}) \right) \quad (10)$$

که  $C_i^{rep}$  (\$/kW) هزینه تعویض  $i$   $DG$  ام،  $F_i^{rep}$  ضریب تعویض  $i$   $DG$  ام،  $S_i$  ارزش بازیافتنی  $i$   $DG$  ام،  $SFF(r, L_i^{DG})$  ضریب وجه استهلاکی<sup>۶</sup>،  $L_i^{DG}$  طول عمر  $DG$   $i$  ام و  $L_{proj}$  طول عمر پروژه می‌باشد.

هزینه تعویض  $ESS$  نیز را می‌توان به صورت رابطه (۱۱) بیان نمود:

$$P_{sl}(t) = \max\left(\frac{(Q_{\max} - Q(t-1))K_c Q_{\max}}{\eta_c}, \frac{K_c Q_{\max}}{\eta_c}\right) \quad (24)$$

, if  $P(t) < 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} Q_S(0) = Q_I = Q_S(T) = Q_E \\ \frac{1}{\eta_D} \sum_{P(t)>0, t=1, \dots, 24} P(t) + \eta_C \sum_{P(t)<0, t=1, \dots, 24} P(t) \\ + \sum_{P(t)=0, t=1, \dots, 24} W_{hourly} = 0 \end{array} \right. \quad (25)$$

### ۲-۸- سود خالص ریزشیکه (NPV)

هزینه بهره‌برداری از یک ریزشیکه بدون ذخیره‌ساز انرژی در یک بازه زمانی یک روز را می‌توان به صورت زیر بیان نمود:

$$C_M = C_{cap}^{DG} + C_{rep}^{DG} + C_{om}^{DG} + C_f^{DG}(d) + C_s^{DG} - C_e^{DG} \quad (26)$$

در حقیقت  $ESS$  به نحوی کنترل می‌گردد که هزینه بهره‌برداری، با ذخیره انرژی با قیمت پایین در کم‌باری و سپس تحویل آن به بار یا فروش آن به شبکه در پیک بار، کاهش یابد. هزینه بهره‌برداری از ریزشیکه با ذخیره‌ساز در طی یک روز برابر خواهد بود با:

$$C_M^* = C_{cap}^{DG} + C_{rep}^{DG} + C_{om}^{DG} + C_{f^*}^{DG}(d) + C_{s^*}^{DG} - C_{e^*}^{DG} + C_{cap}^{BAT} + C_{rep}^{BAT} + C_{om}^{BAT} - C_e^{BAT} \quad (27)$$

$$C_{f^*}^{DG}(d) = \sum_{i=1}^K \sum_{t=1}^{24} C_i^f(d) A_i^*(t) \quad (28)$$

$$C_{s^*}^{DG} = \sum_{i=1}^L C_i^s N_i \quad (29)$$

$$C_{e^*}^{DG} = (1 - S_t) \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^{24} C_g(t) E_i^*(t) \quad (30)$$

که  $C_M^*$  هزینه بهره‌برداری از ریزشیکه با ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد.

با تمام هزینه‌های روزانه که بدست آمد، یک عبارت با تمام جزئیات برای  $NPV$  را می‌توان به صورت رابطه (۳۱) نوشت:

$$C_M^{NPV} = C_M - C_M^* = (C_{cap}^{DG}(d) + C_s^{DG} + C_e^{BAT} + C_{e^*}^{BAT}) - (C_e^{DG} + C_{f^*}^{DG}(d) + C_{s^*}^{DG} + C_{cap}^{BAT} + C_{rep}^{BAT} + C_{om}^{BAT}) \quad (31)$$

### ۳. الگوریتم جستجوی فاخته

الگوریتم جستجوی فاخته<sup>۷</sup> یک الگوریتم فراابتکاری است که از رفتار انگلی و تعهدآور فرزندان برخی گونه خاص از پرندگان با نام فاخته الهام گرفته شده است [۲۳]. این نوع از پرندگان تخم‌های خود را در لانه سایر پرندگان میزبان قرار می‌دهند. با توانایی‌های حیرت‌آوری همچون انتخاب لانه‌هایی که اخیراً در آن‌ها جوجه‌ریزی صورت گرفته است و همین‌طور توانایی برداشتن تخم‌های موجود در لانه تا احتمال به جوجه تبدیل شدن تخم‌های خود را افزایش دهند. بررسی فرایند تولید مثل فاخته به منظور معرفی الگوریتمی جدید برای بهینه‌سازی استفاده شده است. در ادامه گام‌های این فرایند معرفی شده است.

تابعی از دو بخش اصلی در نظر گرفته شده است: یکی هزینه راه‌اندازی گرم و دیگری هزینه راه‌اندازی سرد. برای ساده‌سازی روند تحلیل، برای ژنراتورهای مصرف‌کننده سوخت میزان هزینه سوخت مصرفی در بازه راه‌اندازی به صورت رابطه (۱۵) خواهد بود:

$$C_s^{DG} = \sum_{i=1}^L C_i^s N_i \quad (15)$$

که  $C_i^s$  (\$) هزینه راه‌اندازی  $i$   $DG$  ام و  $N_i$  تعداد راه‌اندازی‌های می‌باشد.

### ۲-۷- درآمدزایی با فروش توان به شبکه

توان فروخته شده به شبکه به میزان توان مازاد در دسترس توسط  $DG$  ها بستگی دارد. هزینه‌های که با فروش توان به شبکه جبران می‌گردد در یک بازه زمانی یک روزه در نظر گرفته می‌شوند. زمانی که ریزشیکه‌ها به شبکه توان می‌فروشند ممکن است مالیات از آن‌ها مطالبه گردد. بنابراین، میزان درآمد را می‌توان به صورت زیر تعیین کرد:

$$C_e^{DG} = (1 - S_t) \sum_{i=1}^L \sum_{t=1}^{24} C_g(t) E_i(t) \quad (16)$$

که  $C_g(t)$  بر حسب ( $\$/kWh$ ) برابر است با قیمت انرژی در ساعت  $t$ ،  $E_i(t)$  بر حسب ( $kWh$ ) میزان انرژی فروخته شده توسط  $DG$   $i$  ام به شبکه و  $S_t$  برابر نرخ مالیات می‌باشد که برابر با ۱۰ درصد در نظر گرفته شده است.

به منظور حداکثر کردن سود، عملکرد شارژ/دشارژ ذخیره‌سازی انرژی بر طبق استراتژی‌های متعدد باید برنامه‌ریزی گردد. از جمله این استراتژی‌ها، ذخیره‌سازی انرژی با قیمت پایین در طی بازه‌های کم‌باری و سپس تحویل آن در طی پیک بار می‌باشد. به عنوان نتیجه‌ای از این استراتژی، می‌توان بار را براساس معیار زمان مصرف طبقه‌بندی نمود. از این رو، سود روزانه را تحت این استراتژی می‌توان به شکل زیر بدست آورد:

$$C_p^{BAT} = \sum_{P(t)<0, t=1, 2, \dots, 24} C_g(t) P(t) * (1h) \quad (17)$$

$$C_s^{BAT} = (1 - S_t) \sum_{P(t)>0, t=1, 2, \dots, 24} C_g(t) P(t) * (1h) \quad (18)$$

$$C_e^{BAT} = C_p^{BAT} + C_s^{BAT} \quad (19)$$

که  $C_p^{BAT}$  (\$) هزینه خرید  $ESS$  و  $C_s^{BAT}$  (\$) درآمد ناشی از تولید توان آن می‌باشد.

سود تنها در حالتی ایجاد می‌گردد که بازدهی  $ESS$  بزرگ‌تر از معیار (قیمت انرژی در کم‌باری/ قیمت انرژی در پیک بار) باشد.

بازه محدودیت شارژ ذخیره‌سازهای انرژی به صورت زیر است:

$$Q_{\min} \leq Q_S(t) \leq Q_{\max} \quad (20)$$

$$Q_S(0) = Q_I \quad \text{initial state of charge} \quad (21)$$

$$Q_S(T) = Q_E \quad \text{final state of charge} \quad (22)$$

که  $Q_{\min}$  بر حسب ( $kWh$ ) حداقل ظرفیت  $ESS$  می‌باشد.

محدودیت‌های توان خروجی نیز به صورت زیر قابل بیان خواهد بود:

$$P_{sl}(t) = \min(\eta_D(Q_S(t-1)) - Q_{\min}, \eta_D K_D Q_{\max}), \text{ if } P(t) > 0 \quad (23)$$

که  $rand$  یک عدد تصادفی در محدوده بین  $(0,1)$  و  $p_a$  احتمال یافتن می‌باشد. تخم‌های موجود می‌توانند با تخم‌های تولید شده جدید با کیفیت مطلوب‌تر از مکان فعلی آن‌ها و از میان مسیر تصادفی با اندازه گام مطابق رابطه (۳۹) جایگزین شوند:

$$S = rand \cdot (nests(randperm1(n),:)) - nests(randperm2(n),:)) \quad (39)$$

$$nest^{(t+1)} = nest^{(t)} + S \cdot P \quad (40)$$

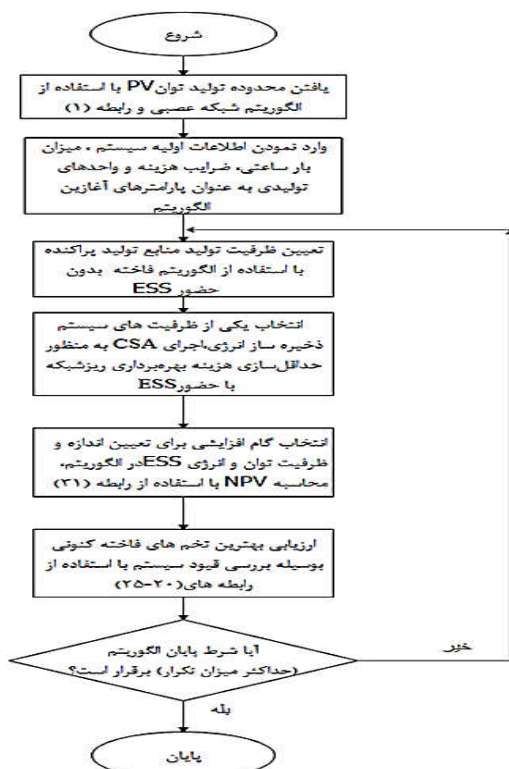
که  $randperm1$  و  $randperm2$  توابع جایگشت تصادفی می‌باشند که برای ردیف‌های مختلف جایگشت در ماتریس لانه‌ها اعمال شده است و در نهایت  $P$  ماتریس احتمالات می‌باشد.

### ۳-۵- معیار توقف فرایند جستجو

مراحل تولید فاخته‌های جدید و یافتن تخم‌های غریبه به طور متناوب تکرار می‌گردد تا زمانیکه یک معیار توقف برقرار گردد. در این مقاله معیار توقف رسیدن به یک حداکثر میزان تکرار می‌باشد.

### ۳-۶- روند پیاده‌سازی الگوریتم جستجوی فاخته در مسئله

در این مطالعه از الگوریتم جستجوی فاخته مبتنی بر الگوریتم‌های فراابتکاری به منظور حل مسئله بهینه‌سازی استفاده شده است. متغیرهای اصلی در روش پیشنهادی شامل پیش‌بینی توان خروجی سیستم  $PV$  و ظرفیت  $ESS$  می‌باشد. پس از تعیین میزان توان خروجی  $PV$  به کمک الگوریتم جستجوی فاخته ظرفیت ذخیره‌ساز انرژی در دو حالت اتصال به شبکه و حالت جزیره‌ای مورد بررسی قرار می‌گیرد. روند پیاده‌سازی کلی الگوریتم فوق در شکل (۱) ارائه شده است.



شکل (۱): روندنمای روش پیشنهادی

Fig. (1): Flowchart of the proposed method

### ۳-۱- مقداردهی اولیه پارامترهای الگوریتم جستجوی فاخته

پارامترهای  $CSA$  در گام نخست تنظیم می‌گردند. این پارامترها شامل تعداد لانه‌ها ( $n$ )، پارامتر اندازه گام ( $\alpha$ )، احتمال یافتن  $(p_a)$  و حداکثر تعداد جمعیت به عنوان معیار پایان الگوریتم می‌باشند.

### ۳-۲- تولید لانه‌های اولیه یا تخم‌های پرندگان میزبان

مکان اولیه لانه‌ها براساس مجموعه‌ای از اعداد تصادفی که به هر کدام از متغیرها اختصاص داده می‌شوند، تعیین می‌گردند:

$$nest_{i,j}^0 = Round(x_{j,min} + rand(x_{j,max} - x_{j,min})) \quad (32)$$

که  $nest_{i,j}^0$  مقدار اولیه  $j$  زمین متغیر برای لانه  $i$ ام می‌باشد؛  $x_{j,min}$  و  $x_{j,max}$  حداقل و حداکثر مقدار مجاز برای متغیر  $j$ ام،  $rand$  تولید کننده عددی تصادفی در بازه  $(0,1)$  می‌باشد. تابع  $Round$ ، که مقدار عدد بدست آمده را گرد می‌کند، به دلیل ماهیت گسسته مسئله مورد استفاده قرار گرفته است.

### ۳-۳- تولید فاخته‌های جدید با استفاده از پروازهای Lewy

تمامی لانه‌ها به جز بهترین لانه براساس کیفیت تخم‌های فاخته جدید، که توسط پروازهای  $lewy$  از مکان خود تولید شده‌اند، جایگزین می‌گردند، به طوری که:

$$nest_i^{(t+1)} = nest_i^{(t)} + \alpha \cdot S \cdot (nest_i^{(t)} - nest_{best}^{(t)}) \cdot r \quad (33)$$

که  $nest_i^{(t)}$  مکان فعلی  $i$ امین لانه، پارامتر اندازه گام،  $r$  یک عدد تصادفی از یک توزیع استاندارد نرمال و  $nest_{best}^{(t)}$  مکان بهترین لانه و  $S$  یک مسیر تصادفی براساس پرواز  $lewy$  می‌باشد.

پرواز  $lewy$  لزوماً یک مسیر تصادفی فراهم می‌آورد که طول گام‌های تصادفی از یک توزیع  $lewy$  بدست آورده می‌شود. یکی از روش‌های کارآمد و مستقیم برای اعمال پروازهای  $lewy$  استفاده از الگوریتمی به نام  $Mantegna$  می‌باشد. در الگوریتم  $Mantegna$ ، طول گام  $S$  را می‌توان به کمک رابطه (۳۴) بدست آورد [۲۴].

$$S = \frac{u}{|v|^{1/\beta}} \quad (34)$$

که  $\beta$  پارامتری بین محدوده  $(1,2)$  بوده و برابر با  $1/5$  در نظر گرفته شده است؛  $u$  و  $v$  از توزیع نرمال و به صورت زیر بدست می‌آیند:

$$u \sim N(0, \sigma_u^2) \quad (35)$$

$$v \sim N(0, \sigma_v^2) \quad (36)$$

$$\sigma_u \geq \left\{ \frac{\Gamma(1+\beta) \cdot \sin(\pi\beta/2)}{\Gamma[(1+\beta)/2] \cdot \beta \cdot 2^{(\beta-1)/2}} \right\}^{1/\beta} \quad (37)$$

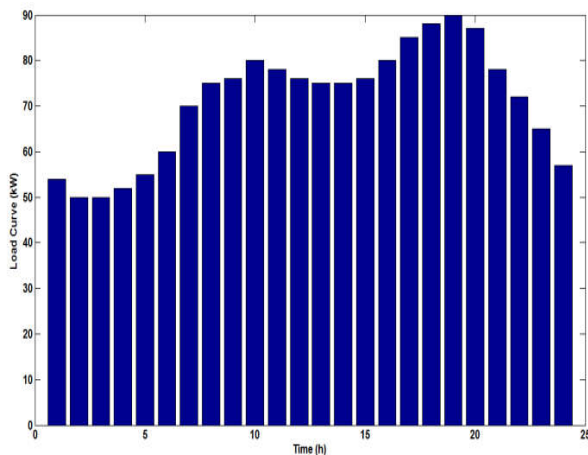
$$\sigma_v = 1$$

### ۳-۴- یافتن تخم‌های غریبه

تخم‌های غریبه با در نظر گرفتن ماتریس یافتن احتمال زیر برای هر پاسخ مسئله، بدست می‌آید:

$$P_{ij} = \begin{cases} 1 & rand < p_a \\ 0 & rand \geq p_a \end{cases} \quad (38)$$

همچنین، در این مقاله فرض شده است که منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبكة از نوع  $PV$ ، میکرو توربین و پیل سوختی بوده که در نقاط مختلف این ریزشبكة نصب شده‌اند. منحنی بار کل ریزشبكة برای یک روز خاص از سال در شکل (۳) آورده شده است. بار کل در این روز برابر با ۱۷۰۴ کیلووات می‌باشد. همچنین فرض شده که ضریب توان تمامی بارها برابر با ۰/۸۵ پسفاژ است. یک میکرو توربین، دو پیل سوختی و یک  $PV$  به نحوی طراحی و تنظیم شده‌اند که بتوانند کل بار مورد نیاز ریزشبكة را تامین کنند.



شکل (۳): منحنی بار یک روز ریزشبكة [۲۵]  
Fig. (3). Daily load curve of the microgrid

در ابتدا محدودیت‌های بهره‌برداری واحدها مورد بررسی قرار می‌گیرد. جدول (۱) حداقل و حداکثر محدودیت‌های بهره‌برداری منابع تولید پراکنده و سیستم را نشان می‌دهد.

Table (1): Operational characteristics of  $DG_s$

جدول (۱): مشخصات بهره‌برداری منابع تولید پراکنده

نوع منبع تولید توان	حداقل توان (کیلووات)	حداکثر توان (کیلووات)	هزینه راه‌اندازی (دلار)
۱ میکرو توربین	۶	۳۰	۰/۱۴
۲ پیل سوختی ۱	۳	۳۰	۰/۲۴
۳ پیل سوختی ۲	۲	۲۰	۰/۱۸
۴ فتوولتایک	۰	۲۰	۰
۵ شبکه	-۳۰	۳۰	۰

مطابق جدول (۱) مشاهده می‌گردد که در طی یک روز مالی نباید میزان تبادل انرژی الکتریکی بین شبکه و ریزشبكة از ۳۰ کیلووات بیشتر شود. علاوه بر قیود بهره‌برداری از ریزشبكة و منابع تولید پراکنده آن، هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از این منابع از اهمیت زیادی در فرایند بهینه‌سازی برخوردار است. جدول (۲) هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری از منابع تولید پراکنده را بر حسب دلار/کیلووات ساعت نشان می‌دهد.

به طور معمول پیشنهاد قیمت  $PV$  در مقایسه با سایر  $DG$ ها به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری بالاتر، بیشتر می‌باشد. قیمت پیشنهادی  $PV$  براساس این نوع عملکرد برابر خواهد بود با:

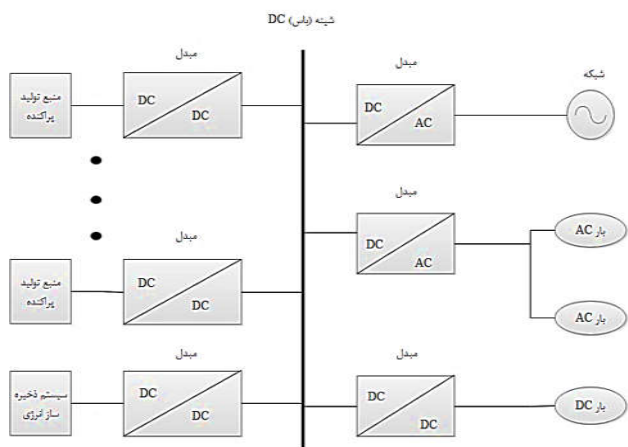
$$C_{bids}^{PV} = C_{cap}^{PV} + C_{rep}^{PV} + C_{om}^{PV} - C_{grant}^{PV} \quad (41)$$

روش الگوریتم  $CSA$  برای تعیین  $NPV$  شامل دو مرحله مهم می‌باشد، توزیع اقتصادی بار و روند الگوریتم جستجوی فاخته، که به صورت بازگشتی پیاده‌سازی می‌گردد تا زمانی که یک راه‌حل عملی که تمامی قیود را ارضا کند، بدست آید. روند بهینه‌سازی به صورت زیر قابل بیان خواهد بود.

- (۱) پیش‌بینی توان خروجی  $PV$  و دریافت مقدار روزانه قیمت سوخت، و تنظیم  $i = 1$ .
- (۲) اجرای  $CSA$  به منظور حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری ریزشبكة بدون حضور  $ESS$  برای روز  $i$ ام سال با استفاده از (۲۶)،
- (۳) انتخاب یکی از  $ESS$ ها،
- (۴) انتخاب یک جفت مشخص از ظرفیت توان و انرژی  $ESS$ ،
- (۵) اجرای  $CSA$  به منظور حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری ریزشبكة با حضور  $ESS$  با استفاده از جفت‌های مختلفی از ظرفیت توان و انرژی در روز  $i$ ام با استفاده از (۲۷)،
- (۶) محاسبه  $NPV$  تجهیز ذخیره‌ساز انرژی با استفاده از (۳۱) و تنظیم  $i = i + 1$
- (۷) تکرار گام‌های ۲-۶ به ازای ساعت‌های مورد نظر،
- (۸) یافتن حداکثر مقدار  $NPV$  برای روز مورد نظر در سال و همچنین یافتن ضریب مربوط به حداکثر  $NPV$ ،
- (۹) محاسبه  $NPV$  برای بازه مورد نظر تجهیز ذخیره‌ساز انرژی براساس نتایج قبلی.

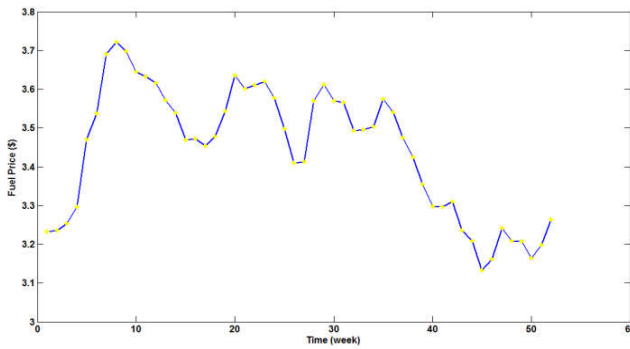
#### ۴. شبیه‌سازی و مطالعات عددی

سیستم مورد نظر برای مطالعه روش پیشنهادی، یک ریزشبكة ولتاژ پایین  $DC$  می‌باشد که در شکل (۲) نشان داده شده است [۲۵].



شکل (۲): ساختار ریزشبكة نمونه

Fig. (2): Configuration of the microgrid



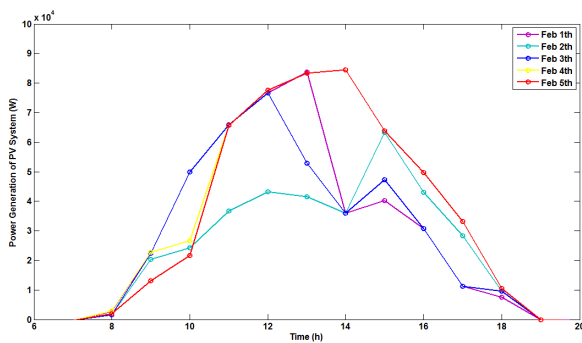
شکل (۴): ارزیابی قیمت سوخت  
Fig. (4): Fuel price evaluation

علاوه بر این، فرض شده است که ریزشکبه به منظور عرضه یا تامین توان، تنها می‌تواند در بازار روزانه (یا روز قبل) شرکت کند. از این رو، قیمت ساعتی انرژی در بازار با دسترسی آزاد در روز مورد نظر، در جدول (۳) ارائه شده است [۲۷].

Table (3): Hourly energy price in electricity market  
جدول (۳): قیمت ساعتی انرژی در بازار برق روزانه

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
دلار/کیلووات ساعت	۰/۰۶۳۶	۰/۰۵۹۵	۰/۰۵۶۳	۰/۰۵۵۷	۰/۰۶۱۸	۰/۰۷۴۱
زمان	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
دلار/کیلووات ساعت	۰/۰۷۸۹	۰/۰۸۵۶	۰/۰۹۱۷	۰/۰۹۷۳	۰/۰۹۷۴	۰/۰۹۵۲
زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
دلار/کیلووات ساعت	۰/۰۸۶۴	۰/۰۷۹۱	۰/۰۷۷۳	۰/۰۹۳	۰/۱۱۳۲	۰/۱۰۶
زمان	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
دلار/کیلووات ساعت	۰/۰۹۹۴	۰/۰۸۹۷	۰/۰۸۵۴	۰/۰۷۶۵	۰/۰۷۵۴	۰/۰۶۷۹

پس از یافتن میزان تشعشع خورشید به کمک رابطه (۱)، میزان توان خروجی PV بدست آورده می‌شود که در شکل (۶) نشان داده شده است.



شکل (۶): توان خروجی سیستم فتوولتائیک در بازه ۲۴ ساعت ۵ روز مختلف  
Fig. (6): PV output power in 24 hours for 5 days

در یک روز ابری یا بارانی، از آنجایی که دما و سطح تشعشع خورشید کاهش محسوسی می‌یابد، روند تولید توان خروجی سیستم فتوولتائیک کاملاً تغییر می‌کند. شکل (۷) میزان توان خروجی سیستم فتوولتائیک به ازای ۶ روز با سه شرایط آب و هوایی آفتابی، ابری و بارانی را نشان می‌دهند.

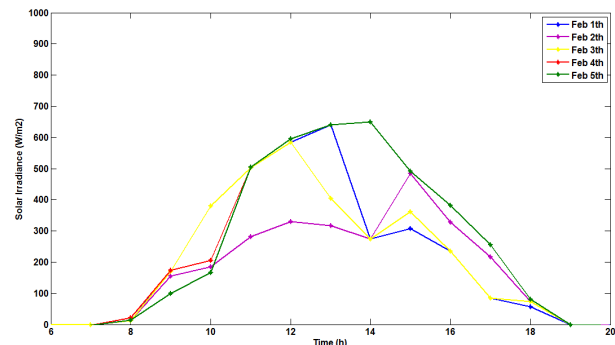
Table (2): DG costs  
جدول (۲): هزینه‌های منبع تولید پراکنده [۲۵]

فتوولتائیک	پیل سوختی ۲	پیل سوختی ۱	میکرو توربین	
۰/۷۰۲	۰/۱۲۵	۰/۱۰۹	۰/۰۳۶	هزینه سرمایه‌گذاری
۰/۰۸۴	۰/۰۱۵	۰/۰۱۳	۰/۰۰۴	هزینه تعویض
۰/۰۷	۰/۰۲۹	۰/۰۲۹	۰/۰۱۵	هزینه بهره‌برداری و تعمیر و نگهداری
۰	۰/۰۴۱	۰/۰۳۶	۰/۰۵۶	هزینه سوخت
۰	۰/۱۵۷	۰/۲۰۵	۰/۱۱۵	هزینه راه‌اندازی

هزینه سوخت در طول سال متغیر بوده و متناسب با شرایط بازار انرژی تغییر می‌کند. از این رو، هزینه‌های بهره‌برداری ریزشکبه متناسب با تاریخ بهره‌برداری از سیستم متغیر خواهد بود. هزینه سوخت به ازای هر هفته در شکل (۴) آورده شده است [۲۶].

#### ۴-۱- پیش‌بینی میزان توان خروجی سیستم فتوولتائیک

در این مطالعه از الگوریتم انتشار چند لایه شبکه عصبی برای تخمین میزان تشعشع خورشید استفاده شده است. در این الگوریتم از سه لایه ورودی، لایه پنهان و لایه خروجی استفاده شده است. پارامترهای ورودی شامل دما، ابری بودن یا نبودن و میزان ابر موجود در آسمان بوده و لایه خروجی شامل میزان تشعشع خورشید در روز مورد نظر می‌باشد. میزان تشعشع خورشید در بازه زمانی یک روزه مربوط به تاریخ ۲۰۱۳/۲/۱ تا ۲۰۱۳/۲/۵ که به کمک الگوریتم  $MLP^A$  تخمین زده شده است، در شکل (۵) نشان داده شده است.



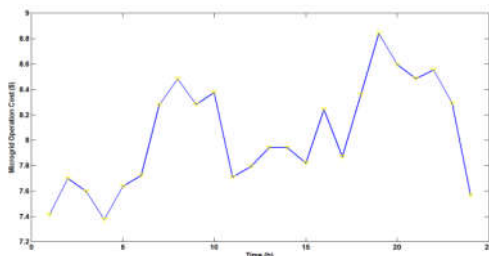
شکل (۵): میزان تشعشع خورشید در ۵ روز مختلف  
Fig. (5): Solar radiation in 5 different days



ابتدا میزان توان خروجی در هر ساعت بدست آورده شده و سپس براساس آن برنامه‌ریزی تولید صورت گیرد. از این رو، میزان توان خروجی PV برای یک شبانه روز، براساس شرایط آب و هوایی و اطلاعات گذشته به کمک الگوریتم شبکه‌های عصبی به صورت جدول (۵) بدست آمده است.

#### سناریو اول: حالت کاری جزیره‌ای بدون ذخیره‌ساز

نتایج بدست آمده برای آرایش تولید واحدها در یک شبانه روز براساس پروفیل بار معرفی شده، مطابق جدول (۶) می‌باشد. میزان تولید واحدها بر حسب کیلووات و هزینه‌ها برحسب دلار می‌باشند. مشاهده می‌گردد در ساعاتی که امکان بهره‌برداری از سیستم فتوولتائیک وجود ندارد، میزان توان خروجی آن صفر بوده و سایر واحدها موظف به تامین بار سیستم می‌باشند. شکل (۸) نشان‌دهنده تغییرات هزینه بهره‌برداری از شبکه به ازای ساعات مختلف روز می‌باشد.



شکل (۸): هزینه بهره‌برداری ریزشبه به ازای یک روز در حالت کاری جزیره‌ای

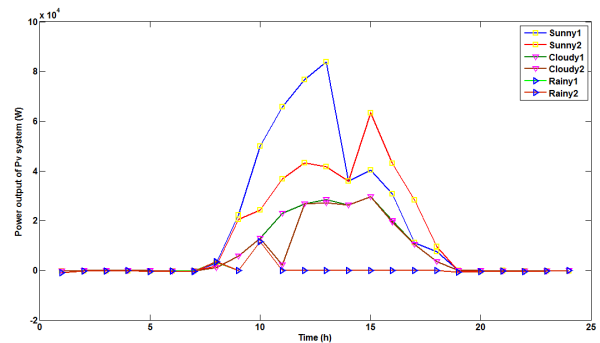
Fig. (8): Operation costs of the microgrid in islanded mode

Table (5): Output power of PV in one day

جدول (۵): توان خروجی سیستم فتوولتائیک در طی یک شبانه روز

زمان	۱	۲	۳	۴	۵	۶
توان	۰	۰	۰	۰	۰	۰
زمان	۷	۸	۹	۱۰	۱۱	۱۲
توان	۰	۱۳۷۹/۱	۱۱۱۷/۸	۲۴۹۵/۶	۳۲۹۰/۷	۳۸۳۰/۳
زمان	۱۳	۱۴	۱۵	۱۶	۱۷	۱۸
توان	۴۱۸۷/۱	۱۷۹۸/۷	۲۰۱۱/۵	۱۵۳۳/۵	۲۴۰۹/۵	۲۰۰۹/۹
زمان	۱۹	۲۰	۲۱	۲۲	۲۳	۲۴
توان	۰	۰	۰	۰	۰	۰

سیستم مورد مطالعه دارای دو پیک بار در طی یک روز می‌باشد. دلیل این امر این است که پیک اول در طول روز و در ساعات اداری رخ می‌دهد و پیک دوم در شب رخ می‌دهد زیرا روز مورد بررسی در فصل زمستان بوده و در طی شب سیستم‌های گرمایشی موجب ایجاد پیک شبانه می‌گردند. با توجه به شکل (۸) مشاهده می‌شود هزینه بهره‌برداری از ریزشبه در ساعات ۱۱-۱۵ با وجود اینکه میزان بار شبکه در پیک می‌باشد، نسبت به ساعت قبل خود کاهش قابل توجهی داشته است، دلیل این امر وجود سیستم فتوولتائیک در ریزشبه می‌باشد که در این بازه زمانی حداکثر میزان تولید توان خود را داشته و به کاهش هزینه بهره‌برداری سیستم کمک می‌کند. اما همان‌طور که مشاهده می‌شود در طی پیک شبانه به دلیل عدم وجود سیستم فتوولتائیک هزینه بهره‌برداری سیستم نسبت به ساعات دیگر بیشتری خواهد بود.



شکل (۷): توان خروجی سیستم فتوولتائیک در شرایط آب و هوایی مختلف  
Fig. (7): PV system output power in different weather conditions

با توجه به نتایج بدست آمده، همان‌گونه که انتظار می‌رفت میزان توان خروجی سیستم فتوولتائیک به ازای روزهای بارانی صفر بوده و در روزهای ابری نیز، میزان تولید توان آن‌ها تا حد زیادی کاهش می‌یابد.

#### ۴-۲- تعیین ظرفیت بهینه باتری و آرایش تولید واحدهای ریزشبه

پس از تعیین توان تولیدی سیستم فتوولتائیک با معرفی مشخصات باتری مورد نظر، از نوع سرب-اسید با مشخصات ارائه شده در جدول (۴)، آرایش بهینه واحدها و ظرفیت بهینه مربوط به باتری بررسی شده است [۲۸].

Table (4): Battery characteristics and costs

جدول (۴): مشخصات باتری و هزینه‌ها

باتری سرب-اسید	تکنولوژی‌ها
۰	هزینه ظرفیت توان (دلار/کیلووات)
۱۰۰	هزینه ظرفیت انرژی (دلار/کیلووات)
۰/۰۲	هزینه بهره‌برداری
۵	انرژی دشارژ شده (درصد)
۸۵	بازدهی (درصد)
۵۰-۷۰	عمق دشارژ شدن
۱۰	طول عمر

در گام نخست در حالت کاری جزیره‌ای طی دو سناریو مختلف ریزشبه مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در سناریو اول، فرض می‌شود که ریزشبه در حالت جزیره‌ای بوده و ذخیره‌ساز انرژی در سیستم وجود ندارد و در سناریو دوم فرض می‌شود که ریزشبه در حالت کاری جزیره‌ای بوده و ذخیره‌سازها در ریزشبه نصب شده‌اند.

در تمامی سناریوهای مطرح شده طول عمر پروژه ۱۰ سال، تعداد فاخته‌ها در ابتدا ۵۰ عدد بوده، هر فاخته در هر مرحله تخم‌گذاری می‌تواند بین ۲ تا ۴ تخم بگذارد و حداکثر جمعیت فاخته‌ها در هر تکرار می‌تواند ۲۰۰ عدد باشد که فاخته‌های نامطلوب با تابع هزینه بالا در هر تکرار حذف گشته و فاخته‌های مطلوب به مرحله بعد و جمعیت بعدی منتقل می‌گردند. نکته‌ای که باید در بهره‌برداری از واحدها مورد نظر قرار داد این است که، از میان منابع تولید پراکنده انتخاب شده برای ریزشبه تمامی واحدها به غیر از سیستم فتوولتائیک که وابسته به میزان تشعشع خورشید است، با توان نامی در دسترس می‌باشند. اما در مورد PV باید

بنابراین، فرایند زیر با انتخاب یک ترکیب  $(P_{max}, Q_{max})$  از مجموعه فوق تکرار خواهد شد:

(۱) انتخاب یک ترکیب خاص از  $(P_{max}, Q_{max})$

(۲) اجرای الگوریتم جستجوی فاخته به منظور حداقل‌سازی هزینه‌ها برای تعداد اولیه ۵۰ فاخته و ۱۰۰ تکرار

(۳) محاسبه میزان هزینه بهره‌برداری ریزشبه.

Table (7): Classification of the energy and power capacity

جدول (۷): طبقه‌بندی ظرفیت‌های انرژی و توان (کیلووات)

$P_{MAX}$					$Q_{MAX}$	
					۱-۰	۱۰
				۵-۱	۱-۰	۵۰
			۱۰-۵	۵-۱	۱-۰	۱۰۰
		۲۰-۱۰	۱۰-۵	۵-۱	۱-۰	۲۰۰
	۳۰-۲۰	۲۰-۱۰	۱۰-۵	۵-۱	۱-۰	۳۰۰
	۴۰-۳۰	۳۰-۲۰	۲۰-۱۰	۱۰-۵	۵-۱	۴۰۰
۵۰-۴۰	۴۰-۳۰	۳۰-۲۰	۲۰-۱۰	۱۰-۵	۵-۱	۵۰۰

به منظور پیاده‌سازی روند فوق در حالت جزیره‌ای باید توجه داشت که در روز مورد مطالعه فقط در ساعت ۸ صبح تا ۱۸ بعد از ظهر امکان تولید توان توسط PV وجود دارد. بنابراین، براساس ظرفیت توان یا به عبارت دیگر میزان انرژی قابل ذخیره‌سازی در ساعات مختلف، توان در باتری ذخیره شده و در ساعات دیگر روز این انرژی تحویل داده می‌شود. سود حاصل در این حالت، ناشی از کم بودن هزینه بهره‌برداری PV نسبت به هزینه بهره‌برداری سایر DGها می‌باشد. در حقیقت، با هزینه ۵/۲۶ دلار/کیلووات برق از PV خریداری شده و در ساعات دیگر با هزینه ۵/۳۲ دلار/کیلووات عرضه می‌گردد. در حالت کاری جزیره‌ای چون اتصال به شبکه بالادست وجود ندارد، بحثی از قیمت بازار به میان نخواهد آمد. علاوه بر این، میزان کل ظرفیت توان خروجی بدست آمده برای PV برابر با ۲۴۸/۱۸۴ کیلووات می‌باشد که میزان ۱۹۱/۶۱ کیلووات آن در فرایند آرایش تولید واحدها به منظور تولید برنامه‌ریزی شده است و تنها ۵۶/۵۷ کیلووات از ظرفیت آن برای شارژ باتری باقی مانده است. بنابراین، عملاً فقط از ترکیب‌های انرژی ۱۰ و ۵۰ کیلووات می‌توان استفاده کرد. از این رو، باتری در طول روز یکبار در بازه‌های ممکن شارژ شده و در بازه‌های مورد نیاز که امکان استفاده از PV وجود ندارد، دشارژ می‌گردد. جدول (۸) سود حاصل سیستم به ازای ترکیب‌های مختلف باتری را نشان می‌دهد. نتایج جدول (۸) به ازای یک شبانه روز می‌باشند.

Table (8): Micro grid profit for different storage capacities

جدول (۸): سود شبکه به ازای ظرفیت‌های مختلف ذخیره‌ساز

ظرفیت باتری	هزینه بهره‌برداری بدون باتری (دلار)	هزینه بهره‌برداری با باتری (دلار)	سود فروش (دلار)	هزینه بهره‌برداری (دلار)	سود کل (دلار)
۱۰-۱-۰	۱۹۲/۸۷۹	۱۹۲/۳۱۹	۰/۶	۰/۶۴	-۰/۰۴
۵۰-۱-۰	۱۹۲/۸۷۹	۱۹۵/۲۷۹	۰/۶	۳	-۲/۴
۵۰-۱-۵	۱۹۲/۸۷۹	۱۹۵/۲۷۹	۳	۳	۰

Table (6): Generation dispatch of DGs in islanded mode without storage

جدول (۶): آرایش تولید واحدهای ریزشبه در حالت کاری جزیره‌ای بدون ذخیره‌ساز برای ۲۴ ساعت

ساعت	میکرو	پیل	پیل	فتولتایک	هزینه
۱	۶	۳۰	۱۸	۰	۷/۴۱۴
۲	۲۷/۱۲	۳	۱۹/۸۸	۰	۷/۷
۳	۲۱/۸	۸/۲	۲۰	۰	۷/۵۹۶
۴	۷/۲	۲۴/۸	۲۰	۰	۷/۳۷۶
۵	۱۴/۸	۲۰/۲	۲۰	۰	۷/۶۳۶
۶	۱۰/۱۲	۲۹/۸۸	۲۰	۰	۷/۷۲۳
۷	۲۰	۳۰	۲۰	۰	۸/۲۸
۸	۲۳/۶۲	۳۰	۲۰	۱/۳۸	۸/۴۸۳
۹	۳۰	۱۷/۱۸	۱۷/۶۵	۱۱/۱۷	۸/۲۸۲
۱۰	۳۰	۱۸/۳۲	۱۸/۹۵	۱۲/۷۳	۸/۳۷۷
۱۱	۲۴/۸۸	۱۸/۲۴	۹/۷۵	۲۵/۱۳	۷/۷۱
۱۲	۲۷/۰۳	۸/۹۷	۱۷/۰۲	۲۲/۹۸	۷/۷۹۵
۱۳	۳۰	۵	۲۰	۲۰	۷/۹۴
۱۴	۳۰	۵	۲۰	۲۰	۷/۹۴
۱۵	۲۲/۷۵	۱۴/۲۱	۱۸/۹۲	۲۰/۱۲	۷/۸۲۲
۱۶	۳۰	۲۳/۹۵	۱۰/۷۱	۱۵/۳۴	۸/۲۴۲
۱۷	۱۳/۳۴	۲۹	۲۰	۲۲/۶۶	۷/۸۷۱
۱۸	۲۹/۹	۲۶/۹	۱۱/۱	۲۰/۱	۸/۳۵۸
۱۹	۳۰	۳۰	۲۰	۰	۸/۸۴
۲۰	۲۶/۸۷	۲۸/۱۳	۲۰	۰	۸/۵۹۸
۲۱	۲۳	۳۰	۲۰	۰	۸/۴۴۸
۲۲	۳۰	۲۲	۲۰	۰	۸/۵۵۲
۲۳	۲۹/۵۵	۱۵/۴۵	۲۰	۰	۸/۲۹۱
۲۴	۷/۶۵	۲۹/۳۵	۲۰	۰	۷/۵۶۵

در بخش بعدی ذخیره‌سازها نیز در حالت کاری جزیره‌ای در نظر گرفته می‌شوند تا شرایط بهره‌برداری از ریزشبه در این حالت نیز مورد بررسی قرار گیرد.

### سناریو دوم: حالت کاری جزیره‌ای در حضور ذخیره‌ساز انرژی

در این شرایط بهتر است که منابع تولید پراکنده مستقیماً بارها را تغذیه نمایند. بنابراین، نتایج حاصل برای بهره‌برداری از ریزشبه در حضور ذخیره‌سازها در ساعاتی که همه منابع تولید پراکنده (به خصوص سیستم فتولتایک) قادر به تولید توان هستند، یکسان خواهد بود. اما نکته قابل توجه این است که در طول شب سیستم فتولتایک قادر به تولید توان نمی‌باشد، پس می‌توان در طول روز سیستم فتولتایک را در حداکثر توان ممکن مورد بهره‌برداری قرار داد و مازاد توان تولیدی را در باتری ذخیره نمود. سپس در بازه زمانی شبانه، از باتری نیز می‌توان برای تامین توان استفاده کرد. با توجه به توضیحات داده شده ابتدا، میزان ظرفیت بهینه باتری مورد نیاز برای سیستم ریزشبه مورد مطالعه قرار گرفته و سپس آرایش تولید بهینه منابع مختلف موجود در ریزشبه آورده می‌شود.

در این حالت، به منظور در نظر گرفتن باتری‌ها در فرایند بهینه‌سازی، فرایند معرفی شده بر پایه الگوریتم جستجوی فاخته، از اطلاعات جدول (۴) که مربوط به اطلاعات فنی باتری‌ها بوده و جدول (۷) که مربوط به ۲۸ ترکیب مختلف انتخاب شده برای محدوده ظرفیت توان و انرژی باتری می‌باشد، استفاده می‌گردد.

تبادل توان با شبکه، به معنی دریافت توان از شبکه و مثبت بودن آن به معنی تزریق توان به شبکه خواهد بود.

با توجه به جدول (۹) مشاهده می‌شود که هزینه‌های بهره‌برداری از سیستم در حالت اتصال به شبکه بدون حضور باتری، فقط در ۶ بازه زمانی اول خرید برق از شبکه بالادست به پایین آمدن هزینه‌ها و سود ریزش شبکه منجر می‌گردد. در سایر بازه‌های زمانی فروش توان توسط ریزش شبکه به شبکه بالادست موجب بدست آوردن سود مازاد خواهد شد. در این حالت، باید بررسی گردد که آیا ریزش شبکه پس از تامین بارهای محلی، ظرفیت خالی به منظور تامین توان برای شبکه بالادست دارد یا خیر. از این رو، ملاحظات فوق مدنظر قرار گرفته شده و آرایش تولید نهایی ریزش شبکه به صورت جدول (۹) بدست آمده است.

با توجه به نتایج بدست آمده مشاهده می‌شود که می‌توان با تبادل توان با شبکه بالادست میزان سود ریزش شبکه را افزایش داد. اما نباید فراموش شود که از میان تمام ۲۴ سناریو معرفی شده در جدول (۹) به منظور تبادل توان با شبکه بالادست، حداکثر میزان تبادل ممکن در طی یک روز مالی ۳۰ کیلووات خواهد بود. بنابراین، سناریوی که بیشترین سود را عاید ریزش شبکه می‌کند، انتخاب می‌گردد، که سناریو مربوط به ساعت ۱۲ با تزریق ۳۰ کیلووات به شبکه بالادست با سود ۳/۲۴ دلار بهترین حالت می‌باشد.

#### سناریو چهارم: حالت کاری اتصال به شبکه با حضور ذخیره‌ساز

در این بخش در حالتی که ریزش شبکه به شبکه بالادست متصل می‌باشد، میزان ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز به منظور حداکثرسازی میزان سود ریزش شبکه بدست آورده شده است. در این حالت فرض شده است که ریزش شبکه نصب شده و منابع تولید پراکنده در آن موجود می‌باشند. علاوه بر این، در طی یک روز مالی ریزش شبکه قابلیت تبادل توان با شبکه بالادست به میزان ۳۰ کیلووات را دارد. بار دیگر از الگوریتم جستجوی فاخته به منظور دستیابی به آرایش بهینه تولید و ظرفیت بهینه باتری استفاده شده است.

در حقیقت در این حالت، باتری در بازه زمانی که قیمت بازار کم است، از شبکه بالادست توان دریافت کرده و شارژ می‌گردد و در بازه زمانی پیک بار که قیمت در بازار افزایش یافته است، توان را به شبکه عرضه می‌کند. با بررسی وضعیت کلی بهره‌برداری از ریزش شبکه و منابع موجود می‌توان به این نتیجه رسید که در صورتیکه ظرفیت باتری کوچک‌تر یا مساوی ۳۰ کیلووات باشد، اگر تمام ظرفیت آن به ذخیره انرژی از شبکه بالادست در شرایط غیر پیک و سپس تزریق آن به شبکه در بازه زمانی پیک اختصاص یابد، بیشترین سود ممکن حاصل خواهد شد، زیرا قیمت بازار برق در حالت پیک خیلی بیشتر از هزینه بهره‌برداری از واحدهای ریزش شبکه می‌باشد. اما در صورتیکه ظرفیت باتری بزرگ‌تر از ۳۰ کیلووات باشد، ۳۰ کیلووات از آن برای تبادل انرژی با شبکه بالادست و مابقی ظرفیت برای ذخیره انرژی از سیستم فتوولتایک در ساعات ممکن و تزریق آن به سیستم در ساعات شب اختصاص می‌یابد. با توجه به قیمت برق در بازار روزانه، بهترین زمان برای شارژ باتری در بازه ساعات ۱-۴ صبح می‌باشد، که کمترین قیمت در بازار برقرار است و بهترین زمان برای تزریق توان به شبکه بالادست در بازه زمانی پیک یعنی ساعات ۱۶-

با توجه به نتایج بدست آمده در جدول (۸) مشاهده می‌گردد که با وجود باتری با ظرفیت انرژی ۱۰ کیلووات، سودی از ذخیره انرژی و فروش آن در بازه دیگر حاصل نخواهد شد، زیرا هزینه بهره‌برداری از باتری در این حالت بیشتر می‌باشد. در حالت مربوط به ۵۰ کیلووات و ظرفیت توان حداکثر ۱ کیلووات، چون بازه زمانی قابل شارژ، با توجه به امکان تولید توان توسط PV که ۱۰ ساعت است، بیشتر از ۱۰ کیلووات نیست، بنابراین باتری فقط ۱۰ کیلووات ذخیره کرده و در بازه‌های بعد تحویل می‌دهد که در این حالت نیز به دلیل بالا بودن هزینه بهره‌برداری و سرمایه‌گذاری باتری توجیه اقتصادی ندارد. اما در حالت ظرفیت انرژی ۵۰ کیلووات و ظرفیت توان حداکثر ۵ کیلووات، سود کل صفر می‌گردد، یعنی در این حالت ریزش شبکه از نصب و بهره‌برداری از باتری ضرر نمی‌کند، ولی سودی نیز عاید آن نمی‌گردد. اگر امکان نصب باتری با ظرفیت بالاتر برای سیستم وجود داشت، آنگاه استفاده از باتری بزرگ‌تر توصیه می‌شد. اما با توجه به شرایط موجود استفاده از باتری با ظرفیت انرژی ۵۰ کیلووات و ظرفیت توان حداکثر ۵ کیلووات، از لحاظ فنی و اقتصادی قابل قبول است. زیرا بعد از ۵ سال، هزینه سرمایه‌گذاری با توجه به نرخ تورم مستهلک شده و هزینه مربوط به آن که بخش بزرگی از هزینه بهره‌برداری روزانه را تشکیل می‌دهد، حذف می‌گردد.

پس از بررسی حالت کاری جزیره‌ای ریزش شبکه، حالت کاری اتصال به شبکه و ویژگی‌های آن مورد بررسی قرار می‌گیرد.

در این بخش در مورد بدست آوردن آرایش تولید واحدهای تولید پراکنده در حالت اتصال به شبکه بحث خواهد شد. در حالت کاری اتصال به شبکه، ریزش شبکه به شبکه بالادست متصل بوده و امکان تبادل توان بین دو سیستم وجود دارد. همان‌گونه که قبلاً اشاره شد، در این حالت ریزش شبکه می‌تواند حداکثر ۳۰ کیلووات توان از شبکه بالادست دریافت کند و یا ۳۰ کیلووات به آن تزریق نماید. در این حالت یک متغیر تصمیم‌گیری دیگر به متغیرهای مساله اضافه می‌گردد که آن میزان توان دریافتی یا تزریقی به شبکه می‌باشد. در حالت اتصال به شبکه نیز، به کمک الگوریتم جستجوی فاخته آرایش تولید واحدها در ریزش شبکه و چگونگی تبادل توان با شبکه بالادست بررسی می‌گردد. شایان ذکر است که با توجه به قیمت ساعتی بازار برق، تبادل توان با شبکه بالادست صورت می‌گیرد.

در این حالت باید قیمت تولید یک کیلووات توان توسط گران‌ترین DG با قیمت لحظه‌ای برق در بازار مقایسه شده و در صورتیکه قیمت در بازار ارزان‌تر باشد، به صرفه خواهد بود که از شبکه بالادست توان خریداری گردد، در غیر اینصورت تامین توان به صورت محلی مطلوب خواهد بود. بدین منظور در ابتدا فرض شده است که در تمامی ساعات توان از شبکه بالادست به میزان حداکثر مقدار ممکن تبادل شده است و سپس نتایج حاصل با نتایج حالت قبل بدون اتصال به شبکه بالادست مقایسه می‌گردد.

#### سناریو سوم: حالت کاری اتصال به شبکه بدون حضور ذخیره‌ساز

نتایج مربوط به آرایش تولید واحدها در حالت اتصال به شبکه و بدون حضور ذخیره‌سازها به صورت جدول (۹) بدست آمده است. شایان ذکر است که نتایج از دید ریزش شبکه بدست آورده شده‌اند. بنابراین، منفی بودن

خواهیم برد. نکته دیگری که باید در فرایند بهینه‌سازی در نظر گرفته شود، میزان هزینه سرمایه‌گذاری باتری مورد استفاده می‌باشد. زیرا با افزایش ظرفیت باتری میزان هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری آن افزایش می‌یابد. با در نظر گرفتن شرایط فوق و با استفاده از جدول (۴)، آرایش تولید واحدها و چگونگی تبادل توان با شبکه بالادست بدست آمده است و در نهایت میزان سود ریزشبکه به ازای ترکیب‌های مختلف ظرفیت باتری به صورت جدول (۱۰) بدست آمده است.

۱۹ می‌باشد. اما در مورد ذخیره انرژی از سیستم فتوولتایک که کمترین هزینه بهره‌برداری در میان سایر واحدها دارد، بهترین زمان برای ذخیره انرژی در باتری طی ساعات ۸-۱۸ و بهترین زمان برای تزریق به بارها در بازه زمانی شب می‌باشد. البته توجه به این نکته ضروری است که در شرایطی که باتری توانایی ذخیره کامل به اندازه ۳۰ کیلووات را در یک ساعت نداشته باشد، ناچار به ذخیره انرژی در آن در طی چندین ساعت خواهیم بود که در این شرایط به ترتیب الویت از قیمت‌های کمتر بهره

Table (9): Generation dispatch of the microgrid units in grid-connected mode without storage

جدول (۹): آرایش تولید واحدهای ریزشبکه در حالت کاری اتصال به شبکه بدون ذخیره‌ساز برای ۲۴ ساعت

ساعت	میکرو توربین	پیل سوختی ۱	پیل سوختی ۲	فتوولتایک	شبکه	هزینه (دلار)	هزینه قبلی
۱	۰	۲۴	۰	۰	-۳۰	۷/۳۳	۷/۴۱
۲	۰	۳	۱۷	۰	-۳۰	۷/۳۳	۷/۷۰
۳	۰	۸/۲	۱۱/۸	۰	-۳۰	۷/۲۱	۷/۵۹
۴	۰	۲۲	۰	۰	-۳۰	۷/۰۲	۷/۳۷
۵	۱۴/۸	۲۰/۲	۲۰	۰	-۳۰	۷/۴۲	۷/۶۲
۶	۱۰/۱۲	۲۹/۸۸	۲۰	۰	-۳۰	۷/۵۴	۷/۷۲
۷	۲۰	۳۰	۲۰	۰	۱۰	۷/۱۱	۸/۲۸
۸	۲۳/۶۲	۳۰	۲۰	۱/۳۸	۶	۷/۵۸	۸/۴۸
۹	۳۰	۱۷/۱۸	۱۷/۶۵	۱۱/۱۷	۱۴	۶/۶۱	۸/۲۸
۱۰	۳۰	۱۸/۳۲	۱۸/۹۵	۱۲/۷۳	۱۰	۷/۰۲	۸/۳۷
۱۱	۲۴/۸۸	۱۸/۲۴	۹/۷۵	۲۵/۱۳	۲۴	۴/۹۹	۷/۷۱
۱۲	۲۷/۰۳	۸/۹۷	۱۷/۰۲	۲۲/۹۸	۳۰	۴/۵۵	۷/۷۹
۱۳	۳۰	۵	۲۰	۲۰	۳۰	۴/۹۶	۷/۹۴
۱۴	۳۰	۵	۲۰	۲۰	۲۰	۵/۹۸	۷/۹۴
۱۵	۲۲/۷۵	۱۴/۳۱	۱۸/۹۲	۲۰/۱۲	۲۰	۵/۸۹	۷/۸۲
۱۶	۳۰	۲۳/۹۵	۱۰/۷۱	۱۵/۳۴	۱۵	۶/۴۶	۸/۲۴
۱۷	۱۳/۳۴	۲۹	۲۰	۲۲/۶۶	۲۰	۵/۵۹	۷/۸۷
۱۸	۲۹/۹	۲۶/۹	۱۱/۱	۲۰/۱	۲۰	۵/۸۵	۸/۳۵
۱۹	۳۰	۳۰	۲۰	۰	۰	۸/۴۶	۸/۸۴
۲۰	۲۶/۸۷	۲۸/۱۳	۲۰	۰	۵	۷/۷۶	۸/۶۰
۲۱	۲۳	۳۰	۲۰	۰	۷	۷/۴۷	۸/۴۵
۲۲	۳۰	۲۲	۲۰	۰	۸	۷/۵۶	۸/۵۵
۲۳	۲۹/۵۵	۱۵/۴۵	۲۰	۰	۲۵	۶/۰۲	۸/۲۹
۲۴	۷/۶۵	۲۹/۳۵	۲۰	۰	۳۰	۵/۱۴	۷/۵۶

انرژی ثابت بوده و ظرفیت توان افزایش می‌یابد، میزان سود ریزشبکه افزایش یافته و زمانی که ظرفیت توان ثابت بوده و ظرفیت انرژی باتری تغییر می‌کند، میزان سود ریزشبکه کاهش می‌یابد.

### ۵. نتیجه‌گیری

در این مقاله، آرایش بهینه منابع تولید پراکنده موجود در ریزشبکه و همچنین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز انرژی به کمک الگوریتم جستجوی فاخته بدست آورده شده است. نتایج نشان می‌دهند که استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی مانند سیستم فتوولتایک موجب کاهش هزینه‌های بهره‌برداری از ریز شبکه می‌گردد. همچنین در صورت استفاده از منابع ذخیره‌ساز، امکان ذخیره انرژی در بازه‌های زمانی با قیمت بالا وجود

Table (10): Microgrid daily profit for different battery capacities

جدول (۱۰): میزان سود روزانه ریزشبکه به ازای ظرفیت‌های مختلف

Q <sub>MAX</sub>	P <sub>MAX</sub>					
	۱۰	-۳/۶۱۳				
۵۰	-۵/۲۲	-۰/۶۱۲				
۱۰۰	-۸/۰۲	-۲/۵۲	۲/۴۱			
۲۰۰	-۱۸/۰۳۴	-۶/۳۵	-۰/۴۹۸۹	۷/۱۷		
۳۰۰	-۲۶/۹۶	-۱۰/۱۸	-۱/۴۱	۵/۹	۹/۰۱	
۴۰۰	-۳۵/۸۸	-۱۴	-۳/۳۲	۴/۶۳	۶/۳۹	۷/۴۳
۵۰۰	-۴۴/۸۱	-۱۷/۸۳	-۵/۲۳	۳/۳۵	۶/۰۱	۶/۸۹

با توجه به جدول (۱۰) مشاهده می‌گردد که ظرفیت بهینه برای باتری به منظور حداکثر نمودن سود ریزشبکه ترکیب (۳۰، ۳۰۰) می‌باشد. همچنین، با توجه به جدول مشاهده می‌گردد که در حالی که ظرفیت

داشته و بدین ترتیب می‌توان با تبادل توان با شبکه بالادست میزان سود خالص ریزش شبکه را در حالت کاری اتصال به شبکه افزایش داد. علاوه بر این، نتایج نشان می‌دهند که لازمه بهره‌برداری بهینه و کاهش هزینه‌ها انتخاب ترکیبی بهینه از منابع تولید پراکنده و ذخیره‌ساز انرژی می‌باشد. الگوریتم جستجوی فاخته توانایی فراهم‌سازی امکان بهینه‌سازی متناسب و مطلوب را دارد.

1. Photovoltaic
2. Energy Storage System
3. Distributed Generation
4. Net Present Value
5. Salvage value
6. Sinking Fund Factor (SFF)
7. Cuckoo Search Algorithm (CSA)
8. Multi-Layer Propagation

### References

- [1] S. R. Sivarasu, E.C. Sekaran, P. Karthik, "Development of renewable energy based microgrid project implementations for residential consumers in India Scope, challenges and possibilities", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 50:256–269, Oct. 2015 (doi:10.1016/j.rser.2015.04.118).
- [2] S. Soleymani, M. E. Mosayebian, S. Mohammadi, "A combination method for modeling wind power plants in power systems reliability evaluation", *Computers and Electrical Engineering*, Vol.41, pp.28-39, Jan. 2015 (doi:10.1016/j.compeleceng.2014.12.005).
- [3] P. Basak, S. Chowdhury, S. H. Dey, S. P. Chowdhury, "A literature review on integration of distributed energy resources in the perspective of control, protection and stability of microgrid", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 8, pp. 5545–5556, Oct. 2012 (doi:10.1016/j.rser.2012.05.043).
- [4] T. S. Ustun, C. Ozansoy, A. Zayegh, "Recent developments in microgrids and example cases around the world—A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol.15, No. 8, pp. 4030–4041, Oct. 2011 (doi:10.1016/j.rser.2011.07.033).
- [5] F. Li, M. Wu, Y. He, X. Chen, "Optimal control in microgrid using multi-agent reinforcement learning", *ISA Transactions*, Vol. 51, No. 6, pp. 743-51, Nov. 2012 (doi:10.1016/j.isatra.2012.06.010).
- [6] E. Foruzan, L. K. Soh, S. Asgarpoor, "Reinforcement learning approach for optimal distributed energy management in a microgrid", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 33, No. 15, pp. 5749 – 5758, Sep. 2018 (doi: 10.1109/TPWRS.2018.2823641).
- [7] K. M. Kelly-Pitou, A. Ostroski, B. Contino, B. Grainger, A. Kwasinski, G. Reed, "Microgrids and resilience: using a systems approach to achieve climate adaptation and mitigation goals", *The Electricity Journal*, Vol. 30, No. 10, pp. 23-31, Dec. 2017 (doi:10.1016/j.tej.2017.11.008).
- [8] J. Silvente, L. G. Papageorgiou, V. Dua, "Optimal management of microgrids under uncertainty using scenario reduction", *Computer Aided Chemical Engineering*, Vol. 40, pp. 2257-2262, 2017 (doi:10.1016/B978-0-444-63965-3.50378-0).
- [9] S. R. Gampa, D. Das, "Optimum placement and sizing of DGs considering average hourly variations of load", *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 66, pp. 25-40, March 2015 (doi:10.1016/j.ijepes.2014.10.047).
- [10] S. Mazzola, M. Astolfi, E. Macchi, "A detailed model for the optimal management of a multigood microgrid", *Applied Energy*, Vol. 154, pp. 862–873, Sep. 2015 (doi:10.1016/j.apenergy.2015.05.078).
- [11] J. S. Kumar, S. C. Raja, J. J. D. Nesamalar, P. Venkatesh, "Optimizing renewable based generations in AC/DC microgrid system using hybrid Nelder-Mead – Cuckoo Search algorithm", *Energy*, Vol. 158, pp. 204-215, Sep. 2018 (doi:10.1016/j.energy.2018.06.029).
- [12] K. S. El-Bidairi, H. D. Nguyen, S. D. G. Jayasinghe, T. S. Mahmoud, I. Penesis, "A hybrid energy management and battery size optimization for standalone microgrids: A case study for Flinders Island, Australia", *Energy Conversion and Management*, Vol 175, pp. 192-212, Nov. 2018 (doi:10.1016/j.enconman.2018.08.076).
- [13] Y. Zhang, A. Lundblad, P. E. Campana, F. Benavente, J. Yan, "Battery sizing and rulebased operation of grid-connected photovoltaic-battery system: a case study in Sweden", *Energy Conversion and Management*, Vol. 133, pp. 249-63, Feb. 2017 (doi:10.1016/j.enconman.2016.11.060).
- [14] L. Benyekhlef, L. Benasla, A. Belmadani, R. Mostefa, "Cuckoo search algorithm for solving economic power dispatch problem with consideration of facts devices", *UPB Scientific Bulletin, Series C: Electrical Engineering*, Vol. 79, No. 1, pp. 43-54, 2017.
- [15] T. Yuvaraj, K. Ravi, "Multi-objective simultaneous DG and DSTATCOM allocation in radial distribution networks using cuckoo searching algorithm", *Alexandria Engineering Journal*, Vol. 57, No. 4, pp. 2729-2742, Dec. 2018 (doi:0.1016/j.aej.2018.01.001).

- [16] Y. Lim, H.M. Kim, "Strategic bidding using reinforcement learning for load shedding in microgrids", *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 40, No. 5, pp. 1439–1446, July 2014 (doi:10.1016/j.compeleceng.2013.12.013).
- [17] S. X. Chen, H. B. Gooi, M. Q. Wang, "Sizing of energy storage for microgrids", *IEEE Trans. on Smart Grid*, Vol. 3, No. 1, pp. 142–151, March 2012 (doi:10.1109/TSG.2011.2160745).
- [18] C. Tao, D. Shanxu, C. Changsong, "Forecasting power output for grid-connected photovoltaic power system without using solar radiation measurement", *Proceeding of the IEEE/PEDG*, pp.773–777, Hefei, China, June 2010 (doi:10.1109/PEDG.2010.5545754).
- [19] O. Deperlioglu, U. Kose, "An educational tool for artificial neural networks", *Computers and Electrical Engineering*, Vol. 37, No. 3, pp. 392–402, May 2011 (doi:10.1016/j.compeleceng.2011.03.010).
- [20] A. Qazia, H. Fayazb, A. Wadib, R. G. Raja, N. A. Rahimb, W. A. Khan, "The artificial neural network for solar radiation prediction and designing solar systems: A systematic literature review", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 104, pp. 1-12, Oct. 2015 (doi:10.1016/j.jclepro.2015.04.041).
- [21] J. Ramos, A. Andreas, "University of Texas Panamerican (UTPA): Solar Radiation Lab (SRL); Edinburg, Texas (Data)", NREL Report No. DA 5500-56514. [Online] (doi:10.5439/1052555,2013).
- [22] A. P. Agalgaonkar, C. V. Dobariya, M. G. Kanabar, S. A. Khaparde, S. V. Kulkarni, "Optimal sizing of distributed generators in microgrid", *Proceeding of the IEEE/POWERIm* pp. 901–908, New Delhi, India, April 2006 (doi:10.1109/POWERI.2006.1632627).
- [23] W. Buaklee, K. Hongesombut, "Optimal DG allocation in a smart distribution grid using cuckoo search algorithm", *Proceeding of the IEEE/ECTICON*, Krabi, pp.1 – 6, May 2013 (doi:10.1109/ECTICOn.2013.6559624).
- [24] X. S. Yang, S. Deb, "Engineering optimisation by cuckoo search", *International Journal of Mathematical Modelling and Numerical Optimisation*, Vol. 1, pp. 330-343, May 2010 (doi:10.1504/IJMMNO.2010.035430).
- [25] C. Chen, S. Duan, T. Cai, B. Liu, G. Hu, "Optimal allocation and economic analysis of energy storage system in microgrids", *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 26, No. 10, pp. 2762 –2773, Oct. 2011 (doi:10.1109/TPEL.2011.2116808).
- [26] U. S. Energy Information Administration., "Weekly U.S. regular conventional retail gasoline prices (Dollars per Gallon)", [Online], Available: <http://www.eia.gov/petroleum/gasdiesel,2013>.
- [27] APX, "Day-ahead market – historical data", [Online]. Available: <ftp://ftp.apxgroup.com>, 2013.
- [28] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A. L. Cotter, D. T. Bradshaw, W. D. Gauntlett, "DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA.SANDIAREPORT", [Online], Available: <http://www.sandia.gov/ess/handbook.php>, July 2013.