

پهرهبرداری پهپنه شبکه توزیع هوشمند در حضور منابع انرژی پراکنده

سعید سلمانی<sup>۱</sup> شهرام جدید<sup>۲</sup>

۱- دانشکده مهندسی برق - دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

Saeed.salmani.a@Gmail.com

<sup>۲</sup>- پژوهشکده سیز-دانشگاه علم و صنعت ایران - تهران - ایران

Jadid@just.ac.ir

**چکیده:** با توجه به حضور گستردگی منابع انرژی پراکنده در سیستم قدرت امروزی و نیاز به ارتباط دوطرفه ببردار با واحدهای تولید و ذخیرهسازی انرژی پراکنده و بارهای کنترل پذیر، وجود یک شبکه توزیع هوشمند با زیرساختهای مخابراتی مناسب ضروری است. با توجه به پیچیده شدن ببرداری شبکه توزیع در حضور این منابع، روش‌های ببرداری متنوعی برای این شبکه‌ها وجود دارد، که تابع هدف بیشتر آن‌ها کمینه کردن هزینه ببرداری است. در این مقاله با در نظر گرفتن عواملی چون عمر مفید، تعداد دفعات شارژ و دشارژ و عمق دشارژ ذخیرهساز مدل دقیق‌تری از هزینه‌ی تحمیل شده به ببردار برای استفاده از سیستم‌های ذخیرهسازی انرژی در شبکه توزیع ارائه شده است، این مدل در تابع هزینه ببرداری بهینه شبکه توزیع در حضور تولیدات پراکنده و بارهای پاسخگو لحاظ شده است. به منظور بررسی محدودیت‌های شبکه، مدل ارائه شده بر روی یک شبکه توزیع ۶۹ شینه با ۵ واحد پیل سوتختی، ۵ واحد میکروتوربین، ۳ واحد باتری سرب-اسید و ۱۰ بار پاسخگو پیاده‌سازی شده است. برای رسیدن به پاسخ بهینه از الگوریتم آنبوه ذرات استفاده شده است. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های انجام شده کارایی مدل ارائه شده را تأیید می‌کند.

**کلمات کلیدی:** منابع تولید پر اکنده (DER)، ذخیره مسازه های انرژی، پاسخگویی، بار، شبکه توزیع هوشمند، بهربر دادی بهینه.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۳/۹/۱

تاریخ پذیرش مشروط مقاله: ۱۳۹۴/۴/۱۲

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۴/۱۰/۱۵

## نام نویسنده‌ی مسئول: سعید سلمانی

**نشانی نویسنده‌ی مسئول:** ایران - تهران - خیابان هنگام - خیابان دانشگاه علم و صنعت - دانشگاه علم و صنعت - دانشکده برق

مناسب و هزینه کم پیشنهاد می‌کند، اما در مدل خود اشاره‌ای به نحوه دقیق محاسبه هزینه ذخیره‌سازها ندارد.

در [۷] موضوع مدیریت بهره‌برداری بهینه چنددهفه در یک شبکه توزیع در حضور واحدهای پیل سوختی بررسی شده است. هدف این مرجع حداقل‌سازی هزینه انرژی الکتریکی، آلودگی ناشی از تولید واحدها و تلفات سیستم با در نظر گرفتن قیود فنی شبکه است. از برنامه پاسخگویی بار و سیستم‌های ذخیره‌ساز به عنوان متغیرهای مسئله بهره‌برداری بهینه استفاده نشده است. در [۸] مسئله مدیریت بهره‌برداری بهینه در یک ریز شبکه با واحدهای تجدیدپذیر بادی، خورشیدی و واحدهای پشتیبان پیل سوختی فسفریک اسید و میکروتوربین و باتری‌های هیبریدی، با استفاده از الگوریتم انسوهه ذرات توسعه یافته تطبیقی مطالعه شده است. مسئله به صورت تابع دو هدفه آلودگی و هزینه مدل شده و قیودی نظیر تعادل توان، ظرفیت واحدها، محدودیت‌های باتری مانند راندمان و حداکثر انرژی آن در نظر گرفته شده است، اما هزینه دفعات شارژ و دشارژ و استهلاک ناشی از آن مدل نشده است و پاسخگویی بار نیز در منابع DER در نظر گرفته نشده است. مرجع [۹] نقش ذخیره‌سازهای انرژی را در بهره‌برداری بهینه شبکه توزیع مطالعه کرده و سود و هزینه حضور و عدم حضور آن‌ها را در شبکه بررسی نموده است. نسبت به مقالات قبل در مدل‌سازی ذخیره‌سازها در این مقاله عواملی چون راندمان، چگالی انرژی و توان و نرخ شارژ و دشارژ در نظر گرفته شده است. اما از برنامه پاسخگویی بار در کنار ذخیره‌سازها استفاده نشده است.

در این مقاله تابع هزینه‌ای برای بهره‌برداری بهینه یک شبکه توزیع هوشمند دارای واحدهای پیل سوختی، میکرو توربین، بارهای پاسخگو و ذخیره‌سازهای سرب-اسید(Lead-Acid) ارائه شده است، تا به کمک آن هزینه بهره‌برداری کمینه شود. در مدل ارائه شده برای هزینه ذخیره‌سازها، علاوه بر قیود توان و انرژی حداقل و حدکش، شرایط ساعتی قبل و راندمان شارژ و دشارژ، عواملی چون ضریب خوددشارژی و هزینه استهلاک دفعات شارژ و دشارژ با توجه به عمق دشارژ و چرخه عمر باتری در نظر گرفته شده است. از این رو مدل ارائه شده در این مقاله نسبت به مدل‌های قبلی بهبود یافته است. برای یافتن نقطه کار بهینه DG‌ها، مقادیر شارژ و دشارژ باتری‌ها و میزان کاهش بارهای شرکت‌کننده در برنامه پاسخگویی بار از روش الگوریتم انسوهه ذرات(PSO)<sup>۲</sup> استفاده شده است.

این مقاله در ۶ بخش تهیه شده که بخش حاضر مقدمه آن است. در بخش دوم بیان ریاضی مسئله بهره‌برداری بهینه‌ی منابع تولید پراکنده انرژی در شبکه توزیع هوشمند ارائه شده است. بخش سوم داده‌های مربوط به شبکه توزیع موردمطالعه و ساختار آن را ارائه داده است. بخش چهارم روش حل مسئله و الگوریتم جستجوی پاسخ بهینه را شرح می‌دهد. نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری در بخش پنجم ارائه شده و درنهایت بخش ششم شامل نتیجه‌گیری مقاله است.

منابع انرژی پراکنده (DER)<sup>۱</sup> به مجموعه‌ای از تولیدات پراکنده، منابع ذخیره‌ساز انرژی و بارهای پاسخگو گفته می‌شود که حضور آن‌ها در شبکه توزیع امروزی باعث تغییرات اساسی در ساختار شبکه و نحوه بهره‌برداری آن شده است. حضور این منابع در شبکه توزیع باعث آن می‌شود که سیستم قدرت نیازمند یک شبکه هوشمند با ساختار اعطاف‌پذیر، قابل مشاهده و کنترل‌پذیر برای تحويل مطمئن انرژی باشد. شبکه‌های توزیع هوشمند، با استفاده از منابع پراکنده انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار، تا حد زیادی تلفات و هزینه‌های سیستم قدرت را کاهش می‌دهند. از سوی دیگر، برنامه‌ریزی منابع پراکنده انرژی در شبکه‌های توزیع هوشمند چالش جدید پراکنده انرژی و سیستم قدرت ایجاد کرده است. افزایش منابع تولید پراکنده، سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و برنامه‌های پاسخگویی بار، منجر به احجام محاسبات اضافی برای حل مسائل بهینه‌سازی می‌گردد و به طور قابل توجهی تعداد متغیرهایی که باید در بهره‌برداری سیستم توزیع در نظر گرفت را افزایش می‌دهد [۳-۱]. مقالات بسیاری به بررسی این موضوع و ارائه روش‌های متنوع برای بهره‌برداری از شبکه توزیع هوشمند پرداخته‌اند.

مرجع [۴] روشی برای حل مسئله برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در یک شبکه توزیع دارای واحدهای تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها و بارهای پاسخگو ارائه داده است. شبکه توزیع موردمطالعه یک شبکه واقعی برق فشار متوسط در کشور پرتغال بوده و دارای تعداد زیادی منابع DER است. این مرجع روش SiPSO را برای یافتن نقطه کار بهینه منابع DER باهدف حداقل‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری معرفی کرده که سرعت بیشتری در همگرایی دارد. در نظر نگرفتن قیود فنی شبکه، ساده مدل کردن ذخیره‌سازها و برنامه پاسخگویی بار از کاستی‌های این مقاله است. روش برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت ارائه شده در [۵] دارای دو سطح به صورت روز بعد و بازه‌های ۱۵ دقیقه‌ای میان روز است. تابع برنامه‌ریزی اقتصادی روزانه نقطه کار واحدهای DER را باهد夫 حداقل‌سازی هزینه انرژی سیستم، تنظیم کرده و برنامه‌ریزی میان روز در وقفه‌های ۱۵ دقیقه‌ای نقطه کار DERها و تپچنجر ترانسفورماتور اصلی را به روزرسانی می‌کند. برنامه‌ریزی روز بعد، نقطه کار واحدهای DER را در نظر گرفتن اطلاعاتی نظیر پیش‌بینی بار و حرارت مصرفی، پیش‌بینی تولیدات DERs هزینه انرژی، محدودیت تولید واحدهای DG و قیود واحدهای ذخیره‌ساز بهینه‌سازی می‌کند. اما در این مرجع نیز هزینه ذخیره‌سازها به صورت ساده و با قیود ابتدایی مدل شده است. مرجع [۶] مدل دوره‌لای برای برنامه‌ریزی کوتاه‌مدت در حضور منابع تجدیدپذیر باد و خورشید و ذخیره‌سازها ارائه داده است. نتایج تصمیمات ناشی از برنامه‌ریزی روزانه به مرحله دوم که یک برنامه‌ریزی زمان‌حقیقی (بازه‌های ۵ دقیقه‌ای) است داده می‌شوند. این مرجع ذخیره‌ساز سدیم-سولفار(NaS) و باتری را به دلیل چرخه عمر

## ۲- بیان ریاضی مسئله

حالت روشن یا خاموش بودن واحد پیل سوختی  $U_{Fc}(f,t)$  در ساعت  $t$  است که یا ۰ و یا ۱ است.  $StartUp_{Fc}(f)$  هزینه راهاندازی واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  است. و  $C_{Mt}(m,t)$  هزینه تولید توان توسط واحد میکروتوربین  $m\lambda^*$  در ساعت  $t$  است که با رابطه (۳) محاسبه می‌شود.  $U_{Mt}(m,t)$  حالت روشن یا خاموش بودن واحد میکروتوربین  $m\lambda^*$  در ساعت  $t$  است.  $StartUp_{Mt}(m)$  هزینه راهاندازی واحد میکروتوربین  $m\lambda^*$  است.  $C_{StDisch}(s,t)$  هزینه دشارژ واحد ذخیره‌ساز  $\lambda^*$  در ساعت  $t$  است که توسعه رابطه (۴) به دست می‌آید و  $U_{StDisch}(s,t)$  حالت استفاده از واحد ذخیره  $\lambda^*$  در ساعت  $t$  است.  $P_{Grid}(t)$  مقدار توان خریداری شده از شبکه سراسری در ساعت  $t$  و  $C_{Grid}(t)$  قیمت توان خریداری شده از شبکه سراسری در ساعت  $t$  است.  $P_{Loss}(t)$  تلفات توان در ساعت  $t$  و  $C_{Loss}(t)$  هزینه در نظر گرفته شده برای تلفات در ساعت  $t$  است.

$$C_{Fc}(f,t) = 3.19(Ect / kWh) \times \sum_{f=1}^{N_{Fc}} \frac{P_{Fc}(f,t)}{\eta_{Fc}(f)},$$

$$PLR(f,t) = \frac{P_{Fc}(f,t)}{P_{FcMax}(f)},$$

$$\eta_{Fc}(f) = \begin{cases} 0.2716 & , PLR(f,t) < 0.05 \\ \left( \begin{array}{l} 0.9033 \times (PLR(f,t))^5 \\ -2.9996 \times (PLR(f,t))^4 + 3.6503 \times (PLR(f,t))^3 \\ -2.0704 \times (PLR(f,t))^2 + 0.3747 \end{array} \right) & , PLR(f,t) \geq 0.05 \end{cases}$$

(۲)

در رابطه (۲)،  $P_{Fc}(f,t)$  توان خریداری شده از واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  در ساعت  $t$  و  $\eta_{Fc}(f)$  راندمان الکتریکی واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  در ساعت  $t$   $PLR(f,t)$  نسبت توان واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  در ساعت  $t$  به حداکثر توان ( $P_{FcMax}(f)$ ) واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  است. این رابطه که در مرجع [۷] نیز ارائه شده است هزینه دقیق‌تری برای واحدهای پیل سوختی محاسبه می‌کند که به راندمان و نقطه کار آن‌ها وابسته است. رابطه (۳) هزینه تولید توان توسط واحدهای میکروتوربین را ارائه می‌کند. در این رابطه  $P_{Mt}(m,t)$  توان تولیدی توسط واحد میکروتوربین  $m\lambda^*$  در ساعت  $t$  است.

$$C_{Mt}(m,t) = price_{Mt} \times P_{Mt}(m,t) \quad , \quad price_{Mt} = 7.8(Ect / kWh) \quad (3)$$

$$C_{StDisch}(s,t) = \sigma(s) \times P_{StDisch}(s,t), \quad (4)$$

$$\sigma(s) = \frac{BP(s)}{LifeCycle(s) \times MLES(s,t) \times DOD(s) \times \lambda_{Discharge}(s)},$$

$$DOD(s) = \frac{MLES(s) - LLES(s)}{MLES(s)}$$

با کمک رابطه (۴) هزینه دشارژ هر کیلووات توان از ذخیره‌ساز  $\lambda^*$  در زمان  $t$  را می‌توان محاسبه کرد.  $P_{StDisch}(s,t)$  توان دشارژ شده توسط واحد ذخیره  $s\lambda^*$  در ساعت  $t$  و  $\sigma(s)$  قیمت هر کیلووات توان دشارژ شده توسط واحد ذخیره  $s\lambda^*$  است.  $BP(s)$  قیمت کل واحد ذخیره‌ساز  $\lambda^*$  بر حسب سنت اروپا (Ect) ( $s$ )،  $LifeCycle(s)$  چرخه شارژ و دشارژ  $s\lambda^*$  و  $MLES(s)$  حداقل انرژی مانده در ذخیره بر حسب کیلووات‌ساعت،  $(s)$   $LLES(s)$  حداقل انرژی مانده در

بهره‌برداران یک شبکه توزیع به دنبال کمینه کردن هزینه‌های ناشی از بهره‌برداری شبکه و منابع DER موجود در آن هستند. در بهره‌برداری شبکه توزیع، تأمین توان موردنیاز برای بارها، از طریق تولیدات پراکنده داخلی (در اینجا پیل سوختی و میکرو توربین)، توان دشارژ واحدهای ذخیره‌ساز، خرید برق از شبکه سراسری و در موقع اضطراری با استفاده از برنامه‌های پاسخگویی بر انجام می‌شود. بنابراین بهره‌بردار باید بتواند نقطه کار هر واحد و میزان کاهش بار برای روز بعد در شبکه خود را از پیش برنامه‌ریزی نماید.

هنگامی که از باتری‌ها به عنوان ذخیره‌ساز در شبکه استفاده می‌شود، باید مسائلی از قبیل دفعات تغییر حالت از شارژ به دشارژ، چرخه عمر مفید باتری و حد پایین انرژی باقیمانده در باتری را در تابع هزینه‌ی آن‌ها در نظر گرفت. این مسائل در مقالات پیشین مورد توجه قرار گرفته است. در مورد باتری‌ها نیز بایستی مانند چرخ طیار ضریب خوددادشتی در هنگام بهره‌برداری از آن‌ها در نظر گرفته شود. در ادامه تابع هزینه‌ای بر اساس عمر مفید، تعداد چرخه شارژ-دشارژ و عمق دشارژ باتری ارائه شده است که به کمک آن می‌توان هزینه واقعی استفاده از باتری‌ها در شبکه را محاسبه نمود.

## ۱-۲- تابع هدف مسئله

هزینه‌های ناشی از بهره‌برداری یک شبکه توزیع هوشمند شامل هزینه تولیدات پراکنده، هزینه‌های شارژ و دشارژ واحدهای ذخیره‌ساز، هزینه برنامه‌های پاسخگویی بار و نیز هزینه پرداخت شده برای خرید توان از بازار برق سراسری است. در حالت کلی تر هزینه‌های تلفات خطوط توزیع و بهره‌برداری از ترانسفورماتورهای پست توزیع و خازن‌های موجود در شبکه نیز در نظر گرفته می‌شود. به این ترتیب تابع هدف کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری و مدیریت شبکه توزیع با رابطه ریاضی (۱) مدل شده است.

$$Objective\ Function = Min \{Cost\}$$

$$Cost = \sum_{t=1}^{T=24} \left[ \begin{array}{l} \sum_{f=1}^{N_{Fc}} U_{Fc}(f,t) \times C_{Fc}(f,t) \\ + \sum_{f=1}^{N_{Fc}} StartUp_{Fc}(f) \times U_{Fc}(f,t) \times (1-U_{Fc}(f,t-1)) \\ + \sum_{m=1}^{N_{Mt}} U_{Mt}(m,t) \times C_{Mt}(m,t) \\ + \sum_{m=1}^{N_{Mt}} StartUp_{Mt}(m) \times U_{Mt}(m,t) \times (1-U_{Mt}(m,t-1)) \\ + \sum_{s=1}^{N_S} U_{StDisch}(s,t) \times C_{StDisch}(s,t) \\ + \sum_{lc=1}^{N_{LC}} Cost(P_{LC}(lc,t)) \\ + P_{Grid}(t) \times C_{Grid}(t) \\ + P_{Loss}(t) \times C_{Loss}(t) \end{array} \right] \quad (1)$$

در رابطه (۱)،  $C_{Fc}(f,t)$  هزینه تولید توان توسط واحد پیل سوختی  $\lambda^*$  در ساعت  $t$  است. که با رابطه (۲) محاسبه می‌گردد.



ساعت فعلی موجود در باتری، تفاضل مجموع انرژی مانده از وقفه قابل (با در نظر گرفتن ضریب خوددشارژ) و مقدار انرژی شارژ شده در طی وقفه با انرژی دشارژ شده در طی وقفه است.

$$E_{Storage(s,t)} = E_{Storage(s,t-1)} \times (1 - \xi(s) \cdot \Delta t) - (\frac{1}{\lambda_{Discharge}} \times P_{StorageDischarge(s,t-1)} \times \Delta t) + (\lambda_{Charge} \times P_{StorageCharge(s,t)} \times \Delta t); \quad (7)$$

$$LLES(s,t) \leq E_{Storage}(s,t) \leq MLES(s,t)$$

در رابطه (7)  $\lambda_{Discharge}$  و  $\lambda_{Charge}$  به ترتیب راندمان شارژ و دشارژ و  $E_{Storage(s,t)}$  انرژی قابل ذخیره شدن در واحد ذخیره  $\text{A}\text{m}$  در ساعت  $(s)$  یعنی ضریب خوددشارژ واحد ذخیره  $\text{A}\text{m}$  بر حسب کیلووات ساعت در ماه است. ضریب خوددشارژ بیان کننده درصدی از مقدار انرژی ذخیره شده در ذخیره ساز است که به صورت خوبه خود تخلیه می شود.

ولتاژ شین ها باید از حد مجاز افت ولتاژ ( $V_i \text{ min}$ ) و اضافه ولتاژ ( $V_i \text{ max}$ ) مورد قبول تجاوز کند. در این مقاله حدود مجاز ولتاژ شین ها بین  $0.95$  و  $1.05$  پرینویت در نظر گرفته شده است. همچنین توان عبوری خطوط باید از حداقل ظرفیت خطوط ( $P_{i,r,\text{limit}}$ ) شبکه بیشتر باشد و ضریب توان پست برق ورودی به شبکه نیز باید از  $0.8$  بیشتر باشد. تعییرات تپ چنجر ترانسفورماتور پست باید در میان محدوده حداقل ( $Tap_{\min}$ ) و حداقل ( $Tap_{\max}$ ) تعییرات شود. تعییرات پله های بانک خازنی باید در محدوده مجاز باشد و برنامه نباید به طور ناگهانی تعداد زیادی خازن را وارد مدار کند یا از مدار خارج نماید. بیان ریاضی این قیود در رابطه (9) ارائه شده است.

$$\begin{aligned} V_i \text{ min} &\leq V_i \leq V_i \text{ max} \\ P_{i,j} &\leq P_{i,j,\text{limit}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$P_f \text{ min} \leq P_f \leq P_f \text{ max}$$

$$Tap_{\min} < Tap < Tap_{\max}$$

در رابطه (9)،  $V_i$  ولتاژ بسیار  $i$   $\text{A}\text{m}$ ،  $P_{i,j}$  توان عبوری میان بسیار  $i$   $\text{A}\text{m}$  و  $j \text{ A}\text{m}$  و  $Tap$  پله تپ چنجر است.  $P_f$  ضریب توان شبکه است و به این منظور استفاده شده است که شبکه توزیع توان را کنیو قابل قبولی از شبکه سراسری دریافت کند. حدود ضریب توان شبکه در شبکه سازی ها بین  $0.8$  تا  $1$  در نظر گرفته شده است.

در این مقاله حداقل مجموع تعداد تعییر پله های بانک خازنی در طول روز  $10$  بار است. یکی از مهم ترین قیدهای مسئله، تعادل توان تولید و تقاضاست. همان گونه که در رابطه (10) مشاهده می شود، مجموع توان خریداری شده از شبکه سراسری، تولید شده توسط تولیدات پراکنده، دشارژ باتری ها و مقادیر کاهش بارهای پاسخگو باید با مجموع تقاضای توان بارهای شبکه و شارژ باتری ها برابر باشد.

$$\begin{aligned} \sum_{w=1}^{N_{FC}} P_{FC(f,t)} + \sum_{Pv=1}^{N_{Mf}} P_{Mf(m,t)} + \sum_{S=1}^{N_S} P_{StorageDischarge(S,t)} + \sum_{LC=1}^{N_{LC}} P_{LC(lc,t)} + P_{Grid}(t) = \\ \sum_{S=1}^{N_S} P_{Storagecharge(S,t)} + \sum_{L=1}^{N_L} P_{Load(L,t)} + P_{Loss}(t), \forall t \in \{1, \dots, T\} \end{aligned} \quad (10)$$

باتری است که قابل دشارژ نیست و  $DOD(s)$  عمق دشارژ واحد  $\text{A}\text{m}$  است. ضریب خوددشارژ نیز به عنوان یکی از قیود مسئله در بخش بعدی ارائه شده است.

در رابطه (1)،  $Cost(P_{LC}(lc,t))$  هزینه پرداخت شده به بار  $lc$  شرکت کننده در برنامه پاسخگویی بار در ساعت  $\text{A}\text{m}$  به ازای قطع بار به اندازه  $P_{LC}$  است. در این مدل، برنامه مزایده/خرید مجدد تقاضا (DBB)<sup>۴</sup> برای مشترکین بزرگ داوطلب در پاسخگویی بار انتخاب شده است. همان گونه که در مرجع [۱۰] گفته شده، برنامه DBB پاسخگویی باری است که با پرداخت های تشویقی به مشترکین بزرگ، آن ها را تشویق می کند تا منحنی مصرف خود را بر نامه بزی مجدد نمایند و بار خود را در ساعت اوج مصرف کاهش دهند. همچنین از این راه به مردار هم می تواند تعادل توان در ساعت اوج مصرف و بحرانی را برقرار نموده، امنیت سیستم خود را تضمین نماید. در برنامه DBB مشترکین می توانند مستقیماً در بازار برق، شرکت کرده و قیمت های پیشنهادی خود را برای مقادیر کاهش توان بار مصرفی در پله های مختلفی که توسط به مردار تعیین می گردند، اعلام نمایند. در مدل این مقاله مشترکین می توانند کاهش بار خود را به صورت درصدی از بار مورد تقاضای خود و در سه پله قیمتی، به شبکه پیشنهاد دهند. بنابراین بر اساس این مدل هزینه قطع بار برای به مردار شبکه توزیع را می توان به صورت رابطه (5) تعریف کرد.

$$\begin{aligned} Cost(P_{LC}(lc,t)) = \\ \begin{cases} a \times P_{LC} \times C_1, & P_{LC} \leq a \times P_{LC} \\ a \times P_{LC} \times C_1 + (b-a) \times P_{LC} \times C_2, & a \times P_{LC} \leq P_{LC} \leq b \times P_{LC} \\ a \times P_{LC} \times C_1 + b \times P_{LC} \times C_2 + (c-b-a) \times P_{LC} \times C_3, & b \times P_{LC} \leq P_{LC} \leq c \times P_{LC} \end{cases} \end{aligned} \quad (5)$$

در رابطه (5)،  $a$  و  $b$  و  $c$  درصدی از بار مشترک  $\text{A}\text{m}$  در هر پله از قطع بار و  $C_3, C_2, C_1$  قیمت های پیشنهادی بار  $lc$   $\text{A}\text{m}$  است.

## ۲-۲- قیود مسئله

محدودیت هایی برای مسئله به مرداری بهینه شبکه توزیع هوشمند وجود دارد. یکی از این قیود آن است که توان تولیدی واحدها نباید از حداقل و حداقل مجاز هر واحد تجاوز نماید.

$$\begin{aligned} P_{FC} \text{ min} &\leq P_{FC} \leq P_{FC} \text{ max} \\ P_{Mt} \text{ min} &\leq P_{Mt} \leq P_{Mt} \text{ max} \\ P_{StCh} &\leq P_{StCh} \text{ max} \\ P_{StDisch} &\leq P_{StDisch} \text{ max} \\ P_{grid} \text{ min} &\leq P_{grid} \leq P_{grid} \text{ max} \end{aligned} \quad (6)$$

در نامساوی های فوق  $P_{Fc}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل و  $P_{Ft}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل توان تولیدی توسط واحد پل سوختی  $\text{A}\text{m}$ ،  $P_{Mt}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل و  $P_{Grid}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل توان تولیدی توسط واحد میکرو توربین  $\text{A}\text{m}$ ،  $P_{StCh}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل و  $P_{Grid}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل توان قابل دریافت از شبکه سراسری،  $P_{StCh}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل توان شارژ توسط واحد ذخیره ساز  $\text{A}\text{m}$  و  $P_{StDisch}$   $\text{A}\text{m}$  حداقل توان دشارژ توسط واحد ذخیره ساز  $\text{A}\text{m}$  است. برای باتری ها قیود دیگری نیز وجود دارد. باید توجه داشت انرژی

جدول(۱): قیمت ساعتی (Ect - سنت اروپا) برق شبکه سراسری

ساعت	قیمت
۲/۶	۳/۶
۱۲	۱۱
۴/۷	۴/۳
۱۸	۱۷
۴/۹	۴/۹
۲۴	۲۳
۳/۶	۴/۲
۵	۵
۴	۴
۳	۳
۲	۲
۱	۱

جدول(۲): اطلاعات منابع پراکنده انرژی در شبکه توزیع موردمطالعه

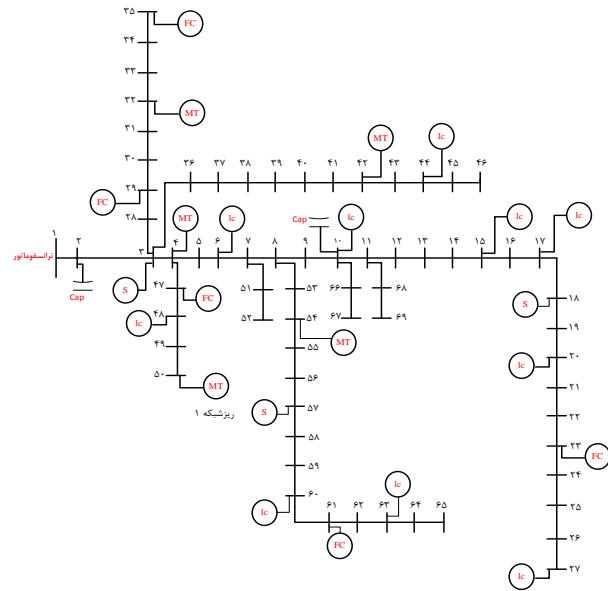
۱	شماره شین	تپ چنجر (Tap)
۱۰	شماره شین	(Cap)
۶ بانک ۲۰۰ کیلوواری	۶ بانک ۲۰۰ کیلوواری	ظرفیت
۶۱	۴۷	شماره شین
۱۵۰	۹۰	حداکثر توان (kW)
۱۵	۹	حداقل توان
۸۲۵	۴/۹۵	هزینه راه اندازی (Ect)
۵۴	۵۰	شماره شین
۱۲۰	۱۵۰	حداکثر توان (kW)
۲۴	۳۰	حداقل توان (kW)
۳/۸۴	۴/۸	هزینه راه اندازی (Ect)
۵۷	۱۸	شماره شین
۵۰	۴۰	حداکثر توان (kW) شارژر
۰/۷۸	۰/۷۸	راندمان شارژ
۵۰	۴۰	حداکثر توان (kW) دشارژر
۰/۷۸	۰/۷۸	راندمان دشارژ
۴۵	۳۶	حداقل انرژی (kWh)
۱۵۰	۱۲۰	حداکثر انرژی (kWh)
۲۰۰	۲۰۰	چرخه عمر
۸۷۸۲۵۰	۷۰۲۶۰۰	قیمت کل (Ect)
۰/۰۵	۰/۰۵	ضریب خود دشارژ (kWh/month)
۷۵	۶۰	انرژی ذخیره شده در ساعت (kWh) اول
		شماره شین با پاسخگو

جدول(۳): اطلاعات مربوط به بارهای شرکت کننده در برنامه DBB

C <sub>3</sub> (Ect/kw)	c (درصدی از بار)	C <sub>2</sub> (Ect/kw)	b (درصدی از بار)	C <sub>1</sub> (Ect/kw)	a (درصدی از بار)	شماره شین با پاسخگو
۱۴	۳۰	۸/۴	۲۰	۷	۱۰	۶
۱۲/۶	۳۰	۱۱/۲	۲۰	۷	۱۰	۱۰
۹/۸	۱۰	۹/۱	۱۰	۸/۴	۱۰	۱۵
۱۱/۲	۲۰	۹/۸	۱۰	۶/۳	۱۵	۱۷
۱۱/۲	۵	۹/۸	۱۰	۷	۲۵	۲۰
۹/۱	۱۰	۸/۴	۱۰	۵/۶	۵	۲۷
۹/۸	۵	۸/۴	۱۰	۷	۱۵	۴۴
۱۴	۲۵	۹/۸	۱۵	۸/۴	۱۰	۴۸
۱۴	۵	۶/۳	۵	۵/۶	۵	۶۰
۷/۷	۱۰	۶/۳	۵	۵/۶	۵	۶۳

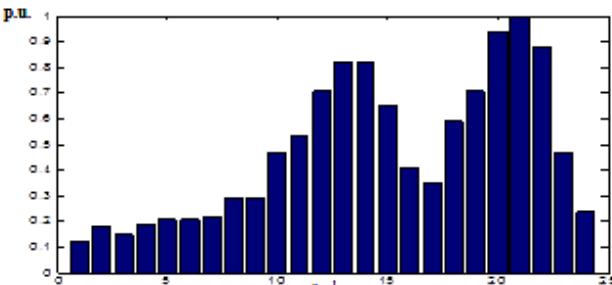
### ۳- داده های مربوط به شبکه توزیع

این بخش به توصیف شبکه توزیع موردمطالعه و واحد های تولیدی، ذخیره و بارهای موجود در آن پرداخته است. ساختار شبکه توزیع IEEE ۶۹ شینه برای مطالعه انتخاب شده است.

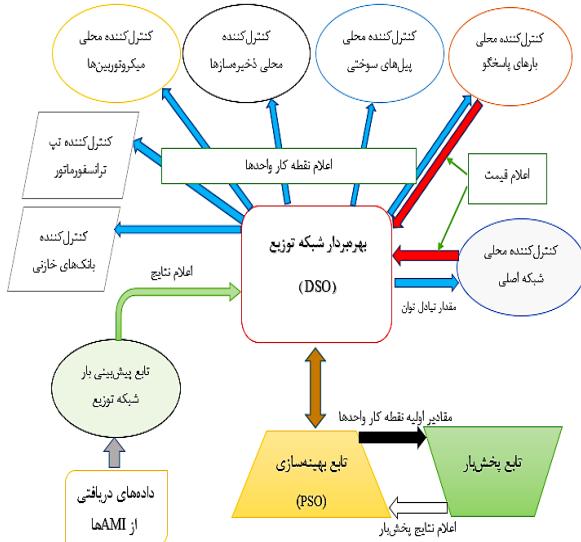


شکل(۱): ساختار شبکه توزیع موردمطالعه

در این شبکه توزیع، ۵ واحد پیل سوتی، ۵ واحد میکروتوربین و ۳ واحد ذخیره ساز از نوع باتری سرب- اسید موجود است و نیز ۱۰ بار شرکت کننده در برنامه پاسخگویی بار ظرفیتی حضور دارند. محل قرار گرفتن واحد های پیل سوتی (FC)، میکروتوربین (MT)، سیستم های ذخیره (S) و بارهای پاسخگو (Lc) در شکل(۱) نمایش داده شده است. فرض بر آن است که تمام DG ها در ضریب توان ۱ کار می کنند و توان راکتیو تولیدی نادیده گرفته شده است. تپ چنجر روی شین شماره ۱ قرار دارد و امکان تبدیل توان راکتیو میان شبکه توزیع و شبکه سراسری بالا دست آن را فراهم می کند. پروفیل بار شبکه و قیمت برق شبکه سراسری در ۲۴ ساعت از مرجع [۱۱] استخراج شده و به ترتیب در شکل (۲) و جدول (۱) ارائه شده است. محل قرار گیری واحد های ذخیره شده در شکل (۲) و جدول (۲) ارائه شده است. میکروتوربین، ذخیره سازها و خازن ها در جدول (۲) ارائه شده است. داده های فنی واحد های ذخیره ساز، که در این مقاله همان باتری های سرب- اسید هستند، از مرجع [۱۲] استخراج شده است.



شکل(۲): پروفیل بار مصرفی (P.u) روزانه شبکه توزیع



شکل(۳): روند نمای مرحله بهرهبرداری متمرکز شبکه توزیع هوشمند

هر ذره یک مقدار شایستگی دارد که توسط تابع هدف محاسبه می‌شود و دارای یک سرعت است که هدایت حرکت ذره را بر عهده دارد و با دنبال کردن ذرات بهینه در حالت فعلی، به حرکت خود در فضای مسئله ادامه می‌دهد. به این ترتیب گروهی از ذرات PSO در آغاز کار به صورت تصادفی به وجود می‌آیند و با بهروز کردن ذرات، سعی در یافتن راه حل بهینه می‌نمایند. در هر تکرار، هر ذره با استفاده از دو بهترین مقدار بروز می‌شود. اولین مورد، بهترین موقعیتی ( $P_{best}$ ) است که تاکنون ذره موفق به رسیدن به آن شده است و دیگری بهترین موقعیتی است که تاکنون توسط جمعیت ذرات بدست آمده است. این موقعیت با  $G_{best}$  نمایش داده می‌شود. پس از یافتن بهترین مقادیر، سرعت و مکان هر ذره با استفاده از معادلات (۱۱) و (۱۲) بروز می‌شود.

$$V_i^{new} = \omega \times V_i^{old} + c_1 \times rand_1 \times (P_{best} - X_i) + c_2 \times rand_2 \times (G_{best} - X_i) \quad (11)$$

$$X_i^{new} = X_i + V_i^{new} \quad (12)$$

در رابطه (۱۱)،  $V_i^{new}$  سرعت فعلی ذره است و  $C_1$  ضریب یادگیری تجارب شخصی هر ذره و  $C_2$  ضریب یادگیری تجارب گروهی می‌باشد و  $rand$  یک عدد تصادفی میان ۰ و ۱ است.  $\omega$  ضریب اینرسی ذره است. در هر تکرار  $G_{best}$  و  $P_{best}$  به روز رسانی می‌شوند [۱۴].

بنابراین، متغیرهای مسئله به صورت یک ماتریس  $26 \times 24$  انتخاب شدند که ۲۶ سطر نماینده واحدهای موجود در ریزشبکه و ۲۴ ستون نماینده ۲۴ ساعت یک شباه روز هستند. سپس هر ذره یا پرنده مقدار تصادفی برای این ماتریس متغیرها ایجاد کرده و مقدار تابع هدف را با این مقادیر محاسبه می‌کند. در هر تکرار، جواب پرندگانی که بهترین مقدار تابع هدف را به دست آورد به عنوان بهینه محلی، و هر پرنده ای که به مجموع تکرارها بهترین مقدار را بیابد به عنوان بهینه جهانی شناخته می‌شود. سایر پرندگان با توجه به ضرایب  $C_1$  و  $C_2$  به سمت بهینه محلی و جهانی حرکت می‌کنند. در این مقاله،  $C_1=2.2$  و  $C_2=1.8$  و تعداد پرندگان ۵۰ و تعداد ۲۰۰۰۰ تکرار برای شبیه‌سازی

اطلاعات مربوط به بارهای شرکت‌کننده در برنامه DBB در جدول (۳) ارائه شده است. هر بار داوطلب، سه پله بر حسب درصدی از بار مصرفی خود را با سه قیمت به بهره‌بردار پیشنهاد می‌کند و اگر بهره‌بردار آن مشترک را فراخوانی نماید، موظف است مقدار بار از پیش تعیین شده را در ساعت مقرر کاهش دهد. اطلاعات مربوط به مقادیر امدادی خطوط شبکه و مقادیر بار هر شین در مقاله [۱۳] ارائه شده است.

#### ۴- راهبرد متمرکز برای بهره‌برداری از شبکه توزیع هوشمند

در روش متمرکز تمامی اطلاعات موردیاز در اختیار بهره‌بردار شبکه توزیع (DSO)<sup>۵</sup> قرار می‌گیرد و سپس DSO با استفاده از توابع کنترلی خود، مقادیر مربوط به نقطه کار هر واحد را به اطلاع آن واحد می‌رساند.

در این مقاله وظایف DSO به شرح زیر است:

- دریافت نمودار قیمت روزانه برق از شبکه سراسری،
- تعیین تابع هزینه برای واحدهایی که DSO خود صاحب آن هاست،
- پیش‌بینی بار مصرفی شبکه در روز پیش رو و تعیین منحنی بار مصرفی روزانه،
- دریافت قراردادهای بارهای شرکت‌کننده در برنامه پاسخگویی بار (شامل درصد توان قابل قطع و قیمت پیشنهادی آنها)
- اجرای برنامه درمدار قرارگیری واحدهای (بر اساس تابع هزینه آنها) با کمک تابع بهینه‌سازی برای تعیین نقطه کار واحدهای، و سپس انجام برنامه پخش بار برای برآوردن قیود شبکه،
- رعایت قیود مربوط به تعادل توان، محدودیت ولتاژ شین‌ها، تراکم خطوط، ضریب توان شبکه و محدودیتهای واحدهای ذخیره‌ساز در برنامه پخش بار.

بنابراین DSO پس از دریافت دادهای مربوط به قیمت روز بعد برق از شبکه سراسری، قراردادهای بارهای شرکت‌کننده در برنامه پاسخگویی بار و در دست داشتن منحنی بار و تابع هزینه تولید منابع انرژی پراکنده‌ی در اختیار خود، با استفاده از تابع بهینه‌سازی سعی در کمینه‌سازی هزینه بهره‌برداری شبکه توزیع با رعایت قیود و محدودیتهای فنی موجود می‌نماید.

#### ۴-۱- تابع بهینه‌سازی در DSO

در این مقاله، روش بهینه‌سازی تابع هدف توصیف شده در بخش ۲ که در واقع برای تعیین نقطه کار واحدهای باهدف کمینه شدن هزینه‌های بهره‌برداری است، الگوریتم انبوه ذرات (PSO) است. در این بخش به طور مختصر این روش بهینه‌سازی شرح داده شده است.

الگوریتم بهینه‌سازی انبوه ذرات بر مبنای حرکت برخی از حیوانات که به صورت گروهی زندگی می‌کنند ایجاد شده است. هر راه حل که به آن یک ذره گفته می‌شود، در الگوریتم PSO معادل یک ذره در الگوی حرکت جمعی ذرات است.

منحصر به فرد شبکه های توزیع یعنی بارهای سه فاز نامتقابران، ساختار شعاعی و نسبت R/X بالا، استفاده از روش های مرسوم پخش بار شبکه های انتقال را در شبکه های توزیع با مشکل مواجه کرده است. روش های پیشرو و پسرو به صورت گسترده در حل شبکه های توزیع مورد استفاده قرار می گیرند، و بر اساس ساختار شعاعی شبکه های توزیع پایه ریزی شده اند. ایده اصلی این روش ها توسط شیرمحمدی و همکارانش در سال ۱۹۸۸ ارائه شد [۱۵].

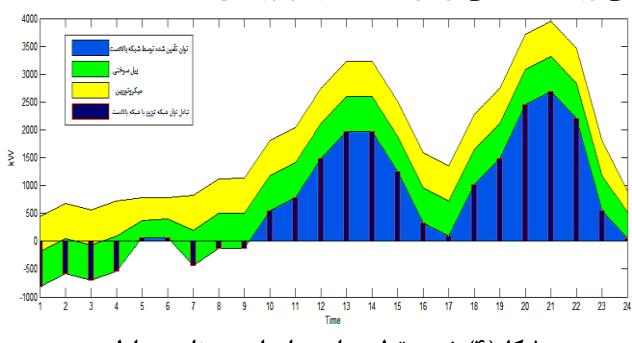
رون دنیای مراحل بهره برداری و کنترل مت مرکز شبکه توزیع، توسط کنترل کننده مرکزی (DSO) و سایر کنترل کننده های محلی، به همراه توابع بهینه سازی، پخش بار و پیش بینی بار آن در شکل (۳) مشاهده می شود. شبیه سازی روش مت مرکز برای بهره برداری شبکه توزیع موردمطالعه همراه با توابع بهینه سازی و پخش بار در نرم افزار MatLab انجام شده است.

## ۵- نتایج حاصل از شبیه سازی ها

در این بخش نتایج حاصل از شبیه سازی مدل کمینه سازی هزینه های بهره برداری شبکه توزیع هوشمند در دو سناریو ارائه شده است. در سناریوی اول فرض شده که تنها واحد های پیل سوختی و میکرو توربین در شبکه حضور دارند اما در سناریوی دوم واحد های ذخیره ساز و برنامه پاسخ گویی بار نیز در شبکه توزیع مدل شده و نتایج ارائه شده است. در هر دو سناریو فرض بر آن است که بهره بردار شبکه توزیع مالکیت منابع ذخیره ساز و واحد های تولید پراکنده را در اختیار دارد.

### سناریوی اول

در سناریوی اول که ذخیره سازها و بارهای پاسخگو در شبکه حضور ندارند، مقدار حداقل هزینه بهره برداری برابر با ۸۸۶۳۳ سنت اروپا شده است. در این سناریو در مجموع ۱۵۶۶۱ کیلووات ساعت انرژی از شبکه بالادست دریافت شده است. ۵ واحد میکرو توربین در مجموع ۱۴۴۳۰ کیلووات ساعت و ۵ واحد پیل سوختی در مجموع ۱۴۳۴۰ کیلووات ساعت انرژی تولید کردند. نمودار نحوه تولید واحد های DG برای پوشش توان مورد تقاضای بارهای شبکه توزیع و خرید توان از شبکه بالادست در شکل (۴) ارائه شده است. مشاهده می شود که در ساعات ۲۰، ۲۱ و ۲۲ توان تولید شبکه توزیع به شبکه بالادست توان می فروشد تا بخشی از هزینه های خود را پوشش دهد.



شکل (۴): نحوه تولید واحد ها برای - سناریوی اول

فرآیند PSO در نظر گرفته شده است. به منظور رفع تخطی از قیود از روش اصلاح مستقیم، یعنی افزودن تابع جریمه به مقدار تابع هدف استفاده شده است. روابطی که برای قیود کلیدزنی تپ چنجر و بانک های حازنی استفاده شده به شرح زیر است.

$$Tap_{total} = 100 \times \sum_{t=1}^{24} |Tap(t+1) - Tap(t)| \quad (13)$$

$$Cap_{total} = \sum_{t=1}^{24} |Cap(t+1) - Cap(t)| \quad (14)$$

$$V_{Cap} = \alpha \times \max((Cap_{total} / 10) - 1, 0)$$

$$Vu_{voltage} = \sum_{b=2}^{69} \sum_{t=1}^{24} \alpha \times \max(Voltage(b,t) / 1.05 - 1, 0) \quad (15)$$

$$Vd_{voltage} = \sum_{b=2}^{69} \sum_{t=1}^{24} \alpha \times abs(\min(Voltage(b,t) / 0.95 - 1, 0)) \quad (15)$$

$$Vu_{storage} = \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{t=1}^{24} \alpha \times \max((E_{Storage}(s,t) / MLES(s)) - 1, 0) \quad (16)$$

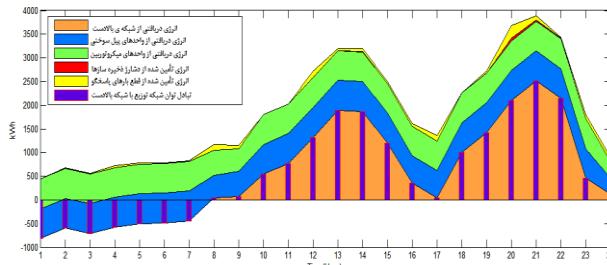
$$Vd_{storage} = \sum_{s=1}^{Ns} \sum_{t=1}^{24} \alpha \times abs(\min((E_{Storage}(s,t) / LLES(s)) - 1, 0)) \quad (16)$$

در رابطه (۱۳)،  $Tap(t)$  مقدار تپ در ساعت  $t$ ،  $V_{Tap}$  مجموع کل تغییرات پله های تپ چنجر در ۲۴ ساعت و  $V_{Cap}$  میزان جریمه تخطی تعداد عملکرد تپ چنجر از مقدار مجاز است که به تابع هدف اضافه می شود. در رابطه (۱۴)،  $Cap(t)$  تعداد پله های خازن موجود در مدار در ساعت  $t$ ،  $V_{Cap}$  مجموع تغییر پله های هر یک از بانک های خازنی قارگرفته در مدار در ۲۴ ساعت و  $V_{Cap}$  میزان جریمه تخطی تعداد عملکرد بانک خازنی (یعنی تعداد ورود و خروج های بانک های خازنی) از مقادیر مجاز است که به تابع هدف اضافه می شود. در رابطه (۱۵)،  $Vu_{voltage}$  میزان جریمه تخطی ولتاژ باس  $b$  در ساعت  $t$ ،  $Vd_{voltage}$  میزان جریمه تخطی ولتاژ باس ها از حد بالایی و  $Vd_{voltage}$  میزان جریمه تخطی ولتاژ باس ها از حد پایین است. به طور مشابه، رابطه (۱۶) نیز با توجه به روابط (۷) و (۸) برای تعیین تابع جریمه تخطی منابع ذخیره ساز از قیود آن هاست که به تابع هدف اضافه می شود.  $\alpha$  ضریب جریمه است که در شبیه سازی ها ۱۰۰۰۰۰ در نظر گرفته شده است.

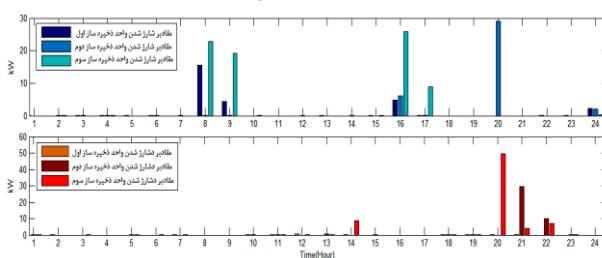
## ۴-۲- تابع پخش بار در DSO

برای انجام پخش بار و برآورده کردن محدودیت هایی مانند ولتاژ شین ها، توان عبوری از خطوط، ضریب توان ریز شبکه و... از روش پخش بار جاروب پیشرو-پسرو استفاده شده است. کلیات پخش بار در شبکه های توزیع مشابه شبکه های انتقال است. اما خصوصیات

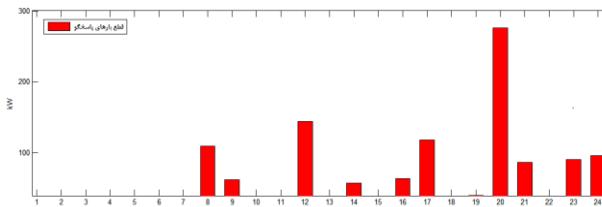
راکتیو نیز در شبکه توزیع بهدرستی صورت گرفته است و ولتاژ همه شین‌ها در ۲۴ ساعت در محدوده مجاز قرار دارد. بیشینه ولتاژ در شین‌های ۲۴،۰۵ و ۲۶ آم و در ساعت ۲ بامداد رخ داده که مقدار آن ۱۰۴۴۲ پریونیت است.



شکل(۶): نحوه تولید منابع پراکنده انرژی برای پوشش توان مورد تقاضای بارهای شبکه توزیع- سناریوی اول

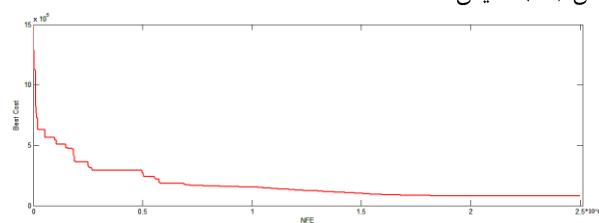


شکل(۷): نمودار مقادیر شارژ و دشارژ ذخیره‌سازها - سناریوی دوم



شکل(۸): مقادیر کاهش بار در برنامه پاسخگویی بار-سناریوی دوم کمینه ولتاژ در ساعت ۲۴ و در شین ۵ آم رخ داده و مقدار آن ۹۵۰ پریونیت است. همچنین کمترین مقدار ضربیت توان شبکه ۸/۰ و لذا هیچ‌گونه تخطی از قید ضربیت توان در شبکه نیز وجود ندارد. در سناریوی دوم مجموع تلفات راکتیو خطوط در شبکه توزیع ۵۹۱ کیلووات‌ساعت و مجموع تلفات اکتیو ۲۷۲ کیلووار ساعت شده است و این به معنی کاهش ۳۸/۴ درصدی تلفات اکتیو نسبت به حالتی است که در شبکه واحدهای ذخیره‌ساز وجود ندارد و برنامه پاسخگویی بار اجرا نمی‌شود. از طرفی چون هزینه دشارژ باتری‌ها بیشتر از اکثر DG‌های شبکه است، میزان استفاده بهره‌بردار از آن‌ها کم است.

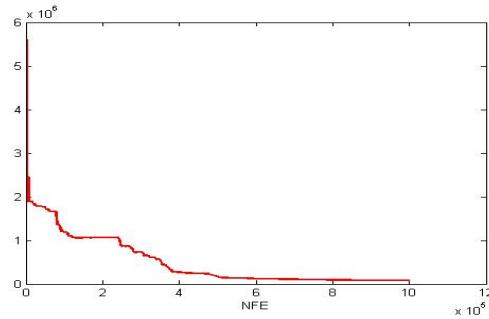
نمودار همگرایی الگوریتم PSO در این سناریو در شکل (۹) و نحوه در مدار قرارگیری واحدهای میکروتوربین و پیل سوختی در شکل (۱۰) نمایش داده شده است.



شکل(۹): نمودار همگرایی الگوریتم PSO در سناریوی دوم

در این سناریو با توجه به تعیین صحیح مقادیر تپچنجر ترانسفورماتور پست ورودی و کلیدزنی بهموقع و در مدار قرار دادن بانکهای خازنی، کنترل ولتاژ و توان راکتیو نیز در شبکه توزیع بهدرستی صورت گرفته است و ولتاژ همه شین‌ها در ۲۴ ساعت در محدوده مجاز قرار دارد. همچنین کمترین مقدار ضربیت توان شبکه ۰/۸ است و در ساعت ۲۴ رخ داده است و لذا هیچ‌گونه تخطی از قید ضربیت توان در شبکه نیز وجود ندارد. در این سناریو مجموع تلفات راکتیو ۴۲۸ کیلووار ساعت شده است. قسمت منفی نمودار بیانگر توان مبادله شده با شبکه بالادست در ساعت ابتدایی روز است که توسط میکروتوربین و پیل سوختی تأمین می‌شود.

نمودار همگرایی الگوریتم PSO در شکل (۵) نمایش داده شده است.



شکل(۵): نمودار همگرایی الگوریتم PSO در سناریوی اول

## سناریوی دوم

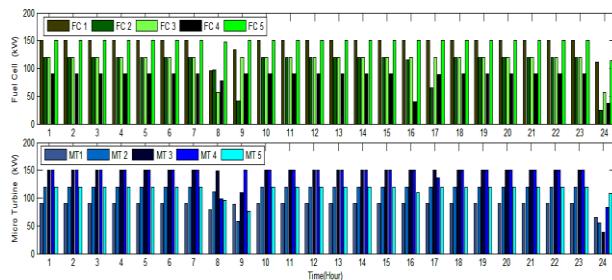
در این سناریو ۳ واحد ذخیره‌ساز و ۱۰ بار پاسخگو به شبکه افزوده شده است. مقدار حداقل هزینه بهره‌برداری در این سناریو برابر با ۷۸۲۷۰ سنت اروپا شده است؛ که ۱۱/۷ درصد کاهش در هزینه بهره‌برداری به خاطر حضور واحدهای ذخیره‌ساز و کاهش بارهای پاسخگو اتفاق افتاده است. در این سناریو در مجموع ۱۳۷۰۹ کیلووات-ساعت انرژی از شبکه بالادست دریافت شده است. ۵ واحد میکروتوربین در مجموع ۱۴۵۷۲ کیلووات‌ساعت و ۵ واحد پیل سوختی در مجموع ۱۴۴۷۱ کیلووات‌ساعت انرژی تولید کرده‌اند. نمودار نحوه تولید واحدهای پراکنده و دشارژ ذخیره‌سازها و عملکرد بارهای پاسخگو برای پوشش توان مورد تقاضای بارهای شبکه توزیع و خرید توان از شبکه بالادست در شکل (۶) ارائه شده است. در ساعات ۱ تا ۷ بالامداد شبکه توزیع به شبکه بالادست توان می‌فروشد تا بخشی از هزینه‌های خود را پوشش دهد. در ساعات اوج بار از ساعت ۱۱ تا ۱۵ پاسخگویی بار باعث کاهش بخشی از تقاضای توان موردنیاز شبکه توزیع شده و در ساعات ۱۹ تا ۲۲ که اوج بار دوم اتفاق می‌افتد از دشارژ واحدهای ذخیره‌ساز نیز استفاده شده است.

نمودار مقادیر شارژ و دشارژ سه واحد ذخیره‌ساز در شکل (۷) و نمودار مقادیر کاهش بار در برنامه پاسخگویی بار تشویقی در شکل (۸) نمایش داده شده است. با توجه به تعیین صحیح مقادیر تپچنجر ترانسفورماتور پست ورودی و بانکهای خازنی، کنترل ولتاژ و توان

- [5] Borghetti A., Bosetti M., Grillo S., Massucco S., Nucci C.A., Paolone M., Silvestro F., "Short-Term Scheduling and Control of Active Distribution Systems With High Penetration of Renewable Resources", IEEE System Journal, Vol. 4, NO. 3, pp. 313-322, September 2010.
- [6] Galvan, E., Gutierrez-Alcaraz G., "Two-phase Short-term Scheduling with Renewable Energy Resources and Storage", North American Power Symposium (NAPS), pp. 1-6, 2013.
- [7] Niknam T., Zeinoddini Meymand H., Doagou Mojarrad H.; "A practical multi-objective PSO algorithm for optimal operation management of distribution network with regard to fuel cell power plants", Elsevier Renewable Energy 36, pp. 1529-1544, 2011.
- [8] Anvari Moghaddam A., Seifi A., Niknam T., Alizadeh Pahlavani M.R., "Multi-objective operation management of a renewable MG (micro-grid) with back-up micro-turbine/fuel cell/battery hybrid power source", Elsevier Energy 36, pp. 6490-6507, 2011.
- [9] Celli G., Pilo F., Pisano G., Soma G.G., "Optimal operation of active distribution network with distributed energy storage", 2nd IEEE Energy Conference & Exhibition, 2012.
- [10] Javad Saebi, Javad Mohammadi, Hamid Taheri, Seyedeh Sara Nayer; "Demand Bidding/Buyback Modeling and Its Impact on Market Clearing Price", IEEE International Energy Conference, pp. 791-796, 2010.
- [11] Ahmad Reza Malekpour, Taher Niknam; "A probabilistic multi-objective daily Volt/Var control at distribution networks including renewable energy sources", Elsevier Energy 36, pp. 3477-3488, 2011.
- [12] Yu Hou Ruxandra, Vidiu Pieter Stroeve; "Report on Solar Energy Storage Methods and Life Cycle Assessment", Prepared by: California Solar Energy Collaborative (CSEC), University of California Davis, MAY 2012.
- [13] D.Das; "Optimal placement of capacitors in radial distribution system using a Fuzzy-GA method", Elsevier, Electrical Power and Energy Systems 30, pp. 361-367, 2008.
- [14] Miranda V, Fonseca N.; "EPSO: Evolutionary Particle Swarm Optimization, a new algorithm with applications in power systems", IEEE/PES Transmission and distribution Conference and Exhibition Asia Pacific, Vols. 1-3, pp. 745-750, 2002.
- [15] D. Shirmohammadi, H. W. Hong, A. Semlyen, and G. X. Luo, "A Compensation-based power flow method for weakly meshed distribution and transmission networks", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 3, No.2, May, pp. 753-762, 1988.

## زیرنویس‌ها

- <sup>1</sup> Distributed Energy Resources  
<sup>2</sup> Particle Swarm Optimization  
<sup>3</sup> Cent of Euro  
<sup>4</sup> Demand Buy-Back  
<sup>5</sup> Distribution System Operator



شکل(۱۰): نمودار درمداد قرارگیری واحدهای میکروتوربین و پیل سوختی

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله، راهبردی برای بهره‌برداری بهینه‌ی یک شبکه توزیع هوشمند باهدف کمینه‌سازی هزینه‌های بهره‌برداری از منابع پراکنده انرژی ارائه شد، که در آن رابطه دقیق‌تری برای هزینه استفاده از باتری‌های تجاری مورداستفاده در شبکه‌های برق لحاظ شده است. برای بررسی این روش یک شبکه شعاعی ۶۹ شینه در نظر گرفته شد و با الگوریتم PSO نحوه درمداد قرارگیری واحدهای باهدف کمترین هزینه بهره‌برداری از شبکه توزیع هوشمند انجام شده است. با توجه به نتایج حاصل از شبیه‌سازی‌های نرم‌افزاری می‌توان گفت حضور بارهای پاسخگو و باتری‌ها علاوه بر کاهش هزینه‌ها، بهره‌برداری منعطف‌تری را نیز منجر می‌شود.

همچنین به علت استفاده ازتابع هزینه دقیق برای باتری‌های سرب-اسید، به‌گونه‌ای که هزینه مربوط به دفعات شارژ و دشارژ و محدودیت‌های مربوط به عمق دشارژ و خوددشارژ این ذخیره‌سازها نیز لحاظ شوند، نمی‌توان بهطور گسترده در بهره‌برداری شبکه از آن‌ها، به جز در موقع اضطراری استفاده کرد. بنابراین استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز همراه با برنامه پاسخگویی بار توصیه می‌شود.

## مراجع

- [۱] جدید، شهرام و ذکریازاده، علیرضا، شبکه‌های توزیع هوشمند، چاپ اول، تهران، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۹۱.
- [۲] جلال‌آبادی، اسماعیل و رحیمی‌کیان، اشکان، "بهره‌برداری بهینه و مدیریت ریسک یک ریز شبکه متصل به شبکه"، مجله انجمن مهندسین برق و الکترونیک ایران، سال یازدهم، شماره اول، ۱۸-۹، تابستان ۱۳۹۳.
- [۳] Jadid.S., Homae.O., Zakariazadeh.A., "Voltage Control Approach in Smart Distribution Network with Renewable Distributed Generation", Journal of Iranian Association of Electrical and Electronics Engineers, Vol.10, No.2, pp.11-21, Fall & Winter 2013.
- [۴] Soares J., Silva M., Sousa T., Vale Z., Morais H., "Distributed energy resource short-term scheduling using Signaled Particle Swarm Optimization", Elsevier Energy (42), pp. 466-476, 2012.