

# تخصیص بهینه باتری ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با هدف سودآوری حداکثری

محمدرسول جان‌نثار، محسن کلانتر و علیرضا صدیقی

عمل آورد [۱] و [۲]. در این موارد با توجه به قیمت بالای ذخیره‌سازها و به‌ویژه باتری‌ها، با در نظر گرفتن مزیت‌های دیگری همچون خرید و فروش (تجارت) انرژی، کاهش قیمت دسترسی به سیستم انتقال و بهبود انتشار گازهای گلخانه‌ای توجیه‌پذیر می‌باشد [۳].

موضوع استفاده از ذخیره‌سازها امروزه مورد توجه محققین قرار گرفته است. به عنوان نمونه، نویسندگان در [۴] یک راهبرد برای یافتن ظرفیت و نحوه شارژ و دشارژ بهینه باتری، به منظور کنترل ولتاژ و کاهش تلفات ارائه داده‌اند. در [۵] برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از باتری برای کاهش تلفات شبکه انجام شده است. در [۶] برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با هدف کاهش تلفات و افزایش ضریب نفوذ منابع تولید پراکنده و در [۷] یک روش بهینه به منظور یافتن مکان و اندازه ذخیره‌ساز ارائه شده است. در این دسته از مقالات مزیت تجارت انرژی لحاظ نشده است.

در [۸] یک برنامه‌ریزی چندهدفه به منظور کاهش تلفات و هزینه بهره‌برداری با در نظر گرفتن جبران‌سازی توان راکتیو ارائه شده است. در [۹] برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از باتری برای اهداف اقتصادی، زیست‌محیطی و فنی انجام شده است. در [۱۰] جایابی و اندازه بهینه ذخیره‌ساز با اهدافی همچون کاهش انحراف ولتاژ و هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز انجام شده است. در این مقالات مزیت تأخیر در توسعه شبکه لحاظ نشده است.

مکان و اندازه بهینه ذخیره‌ساز در [۱۱] به منظور کنترل ولتاژ ارائه شده و به عنوان راه‌حلی جایگزین برای به تأخیر انداختن توسعه شبکه معرفی شده است. در [۱۲] برنامه‌ریزی بهینه باتری با تابع چندهدفه به منظور کاهش هزینه و بهبود منحنی ولتاژ انجام شده است. در [۱۳] برنامه‌ریزی بهینه باتری با هدف کاهش تلفات و افزایش تجارت انرژی انجام شده است. در [۱۴] برنامه‌ریزی بهینه ذخیره‌ساز با اهداف تجارت انرژی، کاهش تلفات و تأخیر در توسعه شبکه انجام شده است. در [۱۵] مکان، اندازه و ضریب توان بهینه ذخیره‌سازهای کوچک پخش‌شده در شبکه با هدف کاهش حداکثر بار و تلفات شبکه محاسبه شده است. بهره‌برداری بهینه از باتری در این مقالات انجام نشده است.

نویسندگان در [۱۶] الگوریتمی را که قادر به محاسبه اندازه و مکان مناسب باتری باشد با لحاظ کردن تلفات پیشنهاد داده‌اند. در [۱۷] برنامه‌ریزی بهینه استفاده از ذخیره‌ساز به منظور کاهش انحراف ولتاژ، فلیکر، تلفات و بار خط انجام شده است. برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از ذخیره‌ساز با هدف کاهش تلفات و مدیریت تراکم در [۱۸] انجام شده است. مکان، اندازه و نحوه شارژ و دشارژ بهینه باتری‌ها به همراه یافتن نوع باتری مناسب در [۱۹] محاسبه شده است. مسایل زیست‌محیطی در این مقالات پوشش داده نشده است.

در [۲۰] یک روش جدید برای محاسبه ظرفیت ذخیره‌ساز مناسب به منظور کاربرد در مصرف‌کننده‌های پایین‌دست ارائه شده است. در [۲۱]

چکیده: در این مقاله، تخصیص بهینه باتری ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع با هدف کاهش اوج بار و سودآوری حداکثری انجام شده است. برای این منظور، شاخص‌هایی با استفاده از اطلاعات بار ساعتی، هزینه ارتقای فیدر و قیمت فروش برق به تعرفه‌های مختلف، معرفی شده است. در ادامه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، شاخص‌ها وزن‌دهی شده و فیدر مناسب برای نصب ذخیره‌ساز مشخص شده است. سپس به منظور دستیابی به میزان حداکثر ممکن کاهش اوج بار و تأمین سود حداکثری، یک تابع هدف اقتصادی با هدف یافتن اندازه و نحوه شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌ساز تعریف شده است. تابع هدف شامل هزینه‌های نصب و بهره‌برداری ذخیره‌ساز، سود خرید و فروش انرژی، سود به تعویق افتادن توسعه شبکه، سود ناشی از مسایل زیست‌محیطی و سود ناشی از کاهش هزینه‌های دسترسی به شبکه بالادست است. با توجه به کاهش اوج بار، محدوده توان و ظرفیت باتری و همچنین تعادل در میزان شارژ و دشارژ باتری، قیود مناسبی در نظر گرفته شده است. با توجه به غیر خطی بودن تابع هدف، در ابتدا مؤلفه‌هایی که در غیر خطی شدن تابع هدف نقش داشته‌اند با توجه به الگوریتم‌های ابتکاری (ژنتیک، دسته ذرات، مورچگان و جستجوی ممنوع) تعیین شده و سپس تابع هدف توسط روش خطی نقطه داخلی حل شده است. نتایج ضمن تأمین اهداف مد نظر، مناسب‌ترین باتری و روش بهینه‌سازی را از بین باتری‌ها و روش‌های معرفی شده ارائه می‌دهد.

کلیدواژه: الگوریتم‌های ابتکاری، باتری ذخیره‌ساز انرژی، تجارت انرژی، سودآوری حداکثری، کاهش اوج بار.

## ۱- مقدمه

یکی از دلایل استفاده از ذخیره‌ساز در شبکه‌های توزیع، به تعویق انداختن توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار است. احداث فیدرهای جدید یا توسعه فیدرهای موجود برای شرکت‌های توزیع برق هزینه‌بر است. همچنین مالکیت اراضی، رفع حریم خطوط و سایر مشکلات نیز از مسایلی هستند که شرکت‌های توزیع برق با آن مواجه می‌باشند. علی‌رغم این موارد، شرکت‌های توزیع موظف به تأمین بار مورد تقاضا هستند. با استفاده از نتایج پیش‌بینی بار می‌توان فیدرهای دارای اضافه بار در آینده را مشخص کرده و با نصب ذخیره‌ساز مناسب بر روی آنها، ضمن تأمین بار به صورت محلی، از اضافه بار شدن فیدر در زمان اوج بار جلوگیری به

این مقاله در تاریخ ۶ بهمن ماه ۱۳۹۷ دریافت و در تاریخ ۱۹ مرداد ماه ۱۳۹۸ بازنگری شد. این تحقیق توسط وزارت نیرو (شرکت توزیع نیروی برق استان تهران) بر اساس قرارداد شماره ۹۰/۱۸۲ پشتیبانی شده است.

محمدرسول جان‌نثار، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: mohammadrasol@gmail.com).

محسن کلانتر، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، (email: kalantar@iust.ac.ir).

علیرضا صدیقی (نویسنده مسئول)، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه یزد، یزد، ایران، (email: sedighi@yazd.ac.ir).

الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش حل در بخش چهارم بیان شده و بخش پنجم هم به بررسی و تحلیل نتایج می‌پردازد.

## ۲- انتخاب فیدر مناسب

در این بخش، به منظور یافتن فیدر مناسب جهت نصب باتری، شاخص‌هایی معرفی شده‌اند تا اهدافی همچون کاهش اوج بار، به تعویق انداختن توسعه تجهیزات شبکه و سوددهی بیشتر برآورده شوند [۲].

### ۱-۲ شاخص کاهش اوج بار

یکی از مهم‌ترین معضلات شرکت‌های توزیع، وجود اوج بار در ساعات خاصی از شبانه‌روز یا ساعات پربار شبکه است. بدین منظور، شاخص (۱) که بیانگر اختلاف اوج و میانگین بار فیدر و ساعات بهره‌برداری از فیدر است، برای هر فیدر تعریف شده است

$$PS_n = \frac{P_{maxf,n} - P_{meanf,n}}{P_{meanf,n}} \times \frac{T_{O,n}}{T_s} \quad (1)$$

که  $P_{maxf,n}$  و  $P_{meanf,n}$  به ترتیب بیشینه بار و میانگین بار فیدر و  $T_{O,n}$  ساعات مورد بهره‌برداری از فیدر  $n$ ام در طول دوره زمانی مطالعه شده  $(T_s)$  می‌باشد. برای حداکثر شدن سود حاصل از فروش انرژی توسط باتری، ساعات مورد بهره‌برداری فیدر در شاخص قرار داده شده است.

### ۲-۲ شاخص به تعویق انداختن ارتقای شبکه

به تعویق انداختن ارتقای شبکه به وسیله کاهش اوج بار شبکه توزیع، یکی از مزیت‌های کوتاه‌مدت استفاده از ذخیره‌سازهای انرژی است که به صورت (۲) تعریف شده است

$$DF_n = \frac{C_{FI,n}}{C_{PG,n}} \quad (2)$$

که در آن  $C_{FI,n}$  نشان‌دهنده هزینه اجرای راه‌حل‌های مرسوم شامل احداث خط جدید و دو مداره کردن خط (به جز نصب ذخیره‌ساز)، جهت افزایش ظرفیت فیدر بر حسب MWh/ریال با لحاظ کردن طول خط است.  $C_{PG,n}$  مقدار هزینه لازم برای ارتقای یک کیلومتر از فیدر بر حسب MWh/ریال است. با این شاخص هرچه هزینه ارتقای فیدر بیشتر باشد برای انتخاب (جهت نصب باتری) مناسب‌تر است.

### ۳-۲ شاخص سوددهی بیشتر و کاهش هزینه‌ها

این شاخص با توجه به تفاوت قیمت خرید انرژی توسط بهره‌بردار و فروش آن به مصرف‌کننده، تنظیم شده که با (۳) بیان می‌گردد

$$BF_n = \frac{P_{r,r,n} P_{e,r,n} + P_{r,i,n} P_{e,i,n} + P_{r,c,n} P_{e,c,n} + P_{r,a,n} P_{e,a,n} + P_{r,p,n} P_{e,p,n}}{P_{r,mean}} \quad (3)$$

که در آن  $P_{r,mean}$  میانگین قیمت خرید برق از شبکه بالادست به وسیله شرکت‌های توزیع طی دوره مطالعه و  $P_{r,r,n}$ ،  $P_{r,i,n}$ ،  $P_{r,c,n}$ ،  $P_{r,a,n}$  و  $P_{r,p,n}$  به ترتیب میانگین قیمت فروش برق در تعرفه‌های خانگی، صنعتی، تجاری، کشاورزی و عمومی می‌باشند. به طور متناظر،  $P_{e,r,n}$ ،  $P_{e,i,n}$ ،  $P_{e,c,n}$ ،  $P_{e,a,n}$  و  $P_{e,p,n}$  درصد بارهای خانگی، صنعتی، تجاری، کشاورزی و عمومی فیدر است.

با مشخص شدن شاخص‌های مطرح‌شده در بالا و نرمالیزه کردن آنها با حداکثر هر شاخص، شاخص نهایی انتخاب فیدر به صورت ترکیبی وزن‌دار

بهره‌برداری بهینه از باتری به منظور کاهش تلفات و بهبود منحنی ولتاژ شبکه انجام شده است. در [۲۲] با توجه به نیاز به جابه‌جایی بار به واسطه اختلاف زیاد بار حداکثر و حداقل، نحوه محاسبه ظرفیت بهینه باتری‌ها بررسی شده است. در [۲۳] اندازه بهینه ذخیره‌ساز با هدف کاهش هزینه‌های کلی در مدار قرار گرفتن منابع انجام شده و هدف زیست‌محیطی نیز در نظر گرفته شده است. در این مقالات اندازه بهینه باتری بدون جابجایی تعیین شده است.

در [۲۴] با فرض مالکیت بهره‌بردار شبکه بر ذخیره‌ساز، یک تابع هزینه اقتصادی برای محاسبه ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز با هدف تجارت انرژی و تأخیر در توسعه شبکه ارائه شده است. در [۲۵] مکان بهینه ذخیره‌ساز با هدف کاهش انحراف ولتاژ، بار خط و تلفات انجام شده است. در [۲۶] به منظور محاسبه اندازه و مکان مناسب باتری، معیارهایی نظیر تجارت انرژی، کاهش پیک شبکه و تلفات، تعویق توسعه شبکه و کاهش اثرات گازه‌های گلخانه‌ای در نظر گرفته شده است. در [۲۷] برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از باتری با هدف افزایش مزایای اقتصادی انجام شده است. در [۲۸] برنامه‌ریزی و بهره‌برداری بهینه از باتری برای اهدافی همچون کاهش تلفات شبکه و ذخیره‌ساز ارائه شده است. در این مقالات از منحنی میانگین بار روزانه (و نه بار تک‌تک روزها) استفاده شده است.

همچنین استفاده از ذخیره‌ساز می‌تواند منجر به کاهش هزینه توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار شود [۲۹]. در [۳۰] راهبرد مدیریت انرژی یک ریزش‌بکه با هدف کاهش هزینه بهره‌برداری باتری و هزینه مربوط به انرژی تأمین‌نشده پیشنهاد شده است. مطالعات توسعه شبکه در حضور ذخیره‌ساز در [۳۱] مورد بررسی قرار گرفته است که با توجه به کاهش اوج بار و افزایش قابلیت اطمینان، باتری در دو حالت مطالعات بلندمدت و کوتاه‌مدت مناسب بوده است. در [۳۲] با توجه به رشد بار سریع منطقه مورد بررسی، بعضی از پست‌ها در ساعات اوج بار در حالت اضافه ظرفیت بهره‌برداری می‌شوند. به دلیل زمان‌بر بودن برنامه‌ریزی ارتقای پست‌ها و یا انتقال بخشی از بار این پست‌ها به سایر پست‌های کم‌بار، در [۳۳] استفاده از ذخیره‌ساز به عنوان یکی از بهترین راه‌حل‌ها معرفی شده است.

- با توجه به مقالات مرورشده، مشارکت مقاله حاضر در موارد زیر است:
- با هدف کاهش اوج بار و دستیابی به حداکثر بهره اقتصادی، بر اساس داده‌های واقعی برداشت‌شده از شبکه، اقدام به انجام هم‌زمان برنامه‌ریزی باتری که شامل تعیین بهینه اندازه و مکان (در مقایسه با [۲۰] تا [۲۳]) و بهره‌برداری (در مقایسه با [۱۱] تا [۱۵]) که شامل تعیین نحوه شارژ و دشارژ می‌باشد، گردیده است.
  - در مقالات بررسی‌شده شاخصی برای انتخاب فیدر ارائه نشده است. در این مقاله شاخص‌هایی جهت تعیین فیدر مناسب برای نصب ذخیره‌ساز پیشنهاد شده است.
  - در بهینه‌سازی انجام‌شده مزایایی همچون تجارت انرژی (در مقایسه با [۴] تا [۷])، هزینه دسترسی به سیستم انتقال، اهداف زیست‌محیطی (در مقایسه با [۱۶] تا [۱۹]) و تأخیر در توسعه شبکه (در مقایسه با [۸] تا [۱۰]) در نظر گرفته شده است.
  - در بهینه‌سازی از منحنی بار ساعتی تک‌تک روزها به جای روش‌های مرسوم که میانگین بار ساعتی را در نظر می‌گیرند (در مقایسه با [۲۴] تا [۲۸])، تفاوت نرخ خرید و فروش انرژی در ساعات مختلف شبانه‌روز و مقایسه الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی و انواع باتری‌های موجود، استفاده شده است.

در ادامه و در بخش دوم نحوه انتخاب فیدر مناسب شرح داده شده است. بخش سوم به معرفی تابع هدف و قیود اختصاص داده شده است.

$dr$  نرخ بهره سالانه است که این دو نرخ بر اساس میانگین سال‌های مورد مطالعه لحاظ شده است. همچنین  $B_{ARB}$  سود ناشی از تجارت انرژی،  $B_{ENV}$  سود ناشی از مزایای زیست‌محیطی،  $B_{TRANS}$  سود ناشی از قیمت‌های متفاوت دسترسی به شبکه انتقال در ساعات شبانه‌روز،  $B_{DEF}$  سود ناشی از تعویق توسعه شبکه،  $C_{O\&M}$  هزینه تعمیر و نگهداری و  $C_{ESS}$  هزینه سرمایه‌گذاری ذخیره‌ساز است.

به منظور انجام طراحی و بهره‌برداری هم‌زمان، در تابع هدف اقتصادی، سودهای ناشی از بهره‌برداری ذخیره‌ساز و هزینه تعمیر و نگهداری با استفاده از روش ارزش کنونی (بهره‌گیری از نرخ سود و تورم) به سال اول برنامه‌ریزی آورده می‌شود. این سود با هزینه سرمایه‌گذاری و سود تعویق توسعه شبکه (طراحی) قابل مقایسه می‌باشد.

### ۳-۱-۱ سود حاصل‌شده از خرید و فروش برق

این مؤلفه با توجه به نرخ متفاوت خرید و فروش انرژی توسط شرکت‌های توزیع و همچنین نرخ متفاوت قیمت انرژی در ساعات شبانه‌روز تعریف شده که در (۶) نمایش داده شده است

$$B_{ARB} = \sum_i (P_i^{E,d} \times K - P_i^{E,c}) \times p_{TEN,i} \quad (6)$$

که  $P_i^{E,d}$  توان باتری در دوره یک ساعت  $i$ ام دشارژ و  $P_i^{E,c}$  در دوره شارژ است. میزان توان باتری در هر ساعت برابر با مقدار  $P_i^{E,d} - P_i^{E,c}$  و  $i$  نشان‌دهنده تعداد ساعات شبانه‌روز است. در اینجا با توجه به مالکیت شرکت توزیع بر ذخیره‌ساز، قیمت خرید و فروش برق برای این ذخیره‌ساز با هم متفاوت است، به این صورت که قیمت میانگین دوره فروش  $K$  برابر بیشتر از دوره خرید انرژی توسط باتری است. این ضریب با توجه به درصد تعرفه بارهای فیدر و قیمت فروش به هر تعرفه محاسبه می‌شود که از واحد فروش شرکت اخذ شده است. ضریب  $p_{TEN,i}$  نشان‌دهنده قیمت ساعتی خرید انرژی از شبکه بالادست است.

### ۳-۱-۲ سود حاصل از اهداف زیست‌محیطی

با توجه به در مدار قرار گرفتن نیروگاه‌های مختلف در ساعات مختلف شبانه‌روز، میزان تولید گاز دی‌اکسید کربن ساعتی نیروگاه‌ها متفاوت است لذا ذخیره‌ساز می‌تواند در زمان‌های با آلودگی کمتر و بیشتر به ترتیب شارژ و دشارژ شود و در نتیجه منجر به کاهش آلودگی هوا گردد. با فرض این که میزان جریمه اخذشده به ازای انتشار هر کیلوگرم گاز دی‌اکسید کربن بر حسب Cent در اختیار باشد، میزان سود حاصل‌شده با (۷) بیان می‌شود

$$B_{ENV} = \sum_i (P_i^{E,d} - P_i^{E,c}) \times EMI_{rate,i} \times p_{TEN} \quad (7)$$

که در آن  $EMI_{rate,i}$  نرخ ساعتی تولید گاز دی‌اکسید کربن نیروگاه‌ها بر حسب kg/kWh و  $p_{TEN}$  جریمه اخذشده بر حسب Cent/kg است.

### ۳-۱-۳ سود حاصل از قیمت‌های متفاوت انتقال انرژی

به منظور مدیریت تراکم خطوط انتقال، هزینه دسترسی به سیستم انتقال دارای قیمت‌های ساعتی متفاوتی است. با شارژ و دشارژ مناسب باتری می‌توان این هزینه را کاهش داد. در (۸) نحوه محاسبه این سود آمده است [۲۷]

$$B_{TRANS} = \sum_i (P_i^{E,d} - P_i^{E,c}) \times p_{TRANS,i} \quad (8)$$

که در آن  $p_{TRANS,i}$  نشان‌دهنده قیمت ساعت  $i$ ام برای انتقال انرژی از شبکه بالادست است.

از شاخص‌های بالا و با (۴) تعریف می‌شود

جدول ۱: ضرایب وزنی محاسبه‌شده.

سوددهی بیشتر	به تعویق انداختن	کاهش اوج بار
۰٫۵۵	۰٫۱۸	۰٫۲۷

$$RAF_n = w_{PS} PS_n + w_{DF} DF_n + w_{BF} BF_n \quad (4)$$

به منظور یافتن هرچه بهتر ضرایب وزنی ( $w_{PS}$ ،  $w_{DF}$  و  $w_{BF}$ )، در این مقاله از روش تحلیل سلسله‌مراتبی (AHP) [۳۳] استفاده شده است. تحلیل سلسله‌مراتبی روشی است که امکان تصمیم‌گیری صحیح با حضور معیارهای کیفی و کمی و ترکیبی را فراهم می‌کند. با توجه به این که مقاله حاضر حاصل یک پروژه تحقیقاتی با شرکت توزیع نیروی برق استان تهران بوده است، به منظور استفاده از تجربیات فنی کارکنان این شرکت در انتخاب ضرایب وزنی و توجیه‌پذیری حداکثری نصب ذخیره‌ساز، از روش تحلیل سلسله‌مراتبی استفاده شده است. این ضرایب با استفاده از میانگین وزن‌هایی که از نظرات اعضای این شرکت جمع‌آوری شده تعیین شده است. با توجه به اهداف مقاله که کاهش اوج بار و سودآوری حداکثری است، ماتریس تصمیم برای معیارها (در اینجا شاخص‌های تعریف‌شده) به صورت زیر تشکیل می‌شود. هر مؤلفه ماتریس، نشان‌دهنده مزیت معیار سطر به ستون آن مؤلفه است. به عنوان نمونه، اولویت سوددهی بیشتر دو برابر اوج بار و سه برابر تعویق توسعه لحاظ شده است.

سوددهی بیشتر تعویق توسعه اوج بار

اوج بار	۱	$\frac{3}{2}$	$\frac{1}{2}$
تعویق توسعه	$\frac{2}{3}$	۱	$\frac{1}{3}$
سوددهی بیشتر	۲	۳	۱

با توجه به این که معیار دارای جهت مثبت می‌باشد (زیادبودن آن مطلوب است)، ستون سوم انتخاب شده و تمام درایه‌های آن به مجموع درایه‌ها تقسیم شده و در نهایت ضرایب وزنی برای سه شاخص به صورت جدول ۱ محاسبه می‌شود.

### ۳-۲ تابع هدف و قیود

در ادامه تابع هدف و قیود حاکم بر مسئله، شرح داده شده است.

#### ۳-۱-۱ تابع هدف

در این مقاله به منظور دستیابی به میزان حداکثر کاهش اوج بار و تأمین سود حداکثر، از تابع هزینه اقتصادی با در نظر گرفتن ارزش کنونی مؤلفه‌ها استفاده شده است. معادله (۵) تابع هدف را نشان می‌دهد

$$\sum_{l=1}^N \left( \sum_{t=1}^L [B_{ARB}(t) + B_{ENV}(t) + B_{TRANS}(t)] - C_{O\&M} \right) \times \left( \frac{1+ir}{1+dr} \right)^l + B_{DEF} - C_{ESS} \quad (5)$$

که در آن  $N$  تعداد سال‌های مورد مطالعه و  $L$  تعداد روزهای مورد استفاده از ذخیره‌ساز در طول سال  $l$  را نشان می‌دهد.  $ir$  نرخ تورم و

$$\begin{aligned} & \leq P_i^{E,c} \leq P_E^{c,max} \quad \forall i \\ & \leq P_i^{E,d} \leq P_E^{d,max} \quad \forall i \end{aligned} \quad (13)$$

که در آن  $P_E^{d,max}$  بیشترین توان تحویلی به شبکه توسط باتری و  $P_E^{c,max}$  بیشترین توان در حالت شارژ باتری‌ها است. این دو مقدار برابر  $P_{max}$  در نظر گرفته شده است.

همان طور که از (۶) تا (۸) استنباط می‌شود و در توضیحات (۶) نیز اشاره شده است، میزان توان نهایی شارژ یا دشارژ باتری در یک ساعت، از تفاضل توان‌های  $P_E^{c,max}$  و  $P_E^{d,max}$  حاصل می‌شود.

قیود (۱۴) شرایط اولیه و نهایی حالت انرژی ذخیره‌شده (که باید میزان انرژی در انتها و ابتدای روز با توجه به بازده باتری برابر باشد) و مقدار بهینه انرژی ذخیره‌ساز را برآورده خواهند نمود [۹]

$$\begin{aligned} & \sum_{i=1}^{24} P_i^{E,d} - P_i^{E,c} \eta_{ESS} = 0 \\ & \sum_{i=1}^{24} P_i^{E,d} \leq C_{max} \end{aligned} \quad (14)$$

تلفات مختلف از جمله تلفات ترانسفورماتور، تلفات سیستم مبدل الکترونیک قدرت و تلفات باتری، در بازده ذخیره‌ساز انرژی لحاظ شده که  $\eta_{ESS}$  بازده سیستم ذخیره‌ساز (برآیند باتری و سیستم الکترونیک قدرت) است.

### ۳-۲-۲ قید کاهش اوج بار و جلوگیری از اضافه بار

جهت دستیابی به بهترین ضریب کاهش اوج بار  $(\alpha)$ ، (۱۵) به صورت بدیهی برقرار است

$$P_{d,i} \leq P_{max f} \quad \forall i \quad (15)$$

که  $P_{d,i}$  مقدار بار و  $P_{max f}$  بیشینه بار فیدر در حال حاضر خواهد بود. از طرف دیگر اگر نسبت تفاضل شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز به حداکثر بار فیدر در انتهای دوره مطالعه در نظر گرفته شود، در حالت بیشینه (در زمان دشارژ کامل) برابر  $\alpha$  خواهد بود. این مفهوم در (۱۶) آمده است

$$\frac{P_i^{E,d} - P_i^{E,c}}{P_{max f}} = \alpha \quad (16)$$

با بازنویسی (۱۶) و تفریق آن از (۱۵)، قید کاهش اوج بار به صورت (۱۷) به دست می‌آید [۲۷]

$$P_{d,i} - (P_i^{E,d} - P_i^{E,c}) \leq (1 - \alpha) P_{max f} \quad \forall i \quad (17)$$

## ۴- الگوریتم‌های بهینه‌سازی و روش حل

### ۴-۱ الگوریتم‌های بهینه‌سازی

الگوریتم‌های مختلف بهینه‌سازی به دو دسته روش‌های سنتی (خطی، غیر خطی، غیر خطی عدد صحیح و غیره) و ابتکاری (الگوریتم ژنتیک<sup>۵</sup> (GA)، بهینه‌سازی دسته ذرات<sup>۶</sup> (PSO)، کلونی مورچگان<sup>۷</sup> (ACO)، جستجوی ممنوع<sup>۸</sup> (TS) و غیره) دسته‌بندی می‌شوند.

در مقاله حاضر برای الگوریتم ژنتیک [۳۸]، فضای اولیه جواب به صورت یک رشته دوتایی (کروموزوم) متشکل از ۲۱ بیت (ژن) است و

### ۳-۱-۴ سود به تأخیر انداختن ارتقای تجهیزات

سیستم ذخیره‌سازی انرژی زمانی که تقاضای بار کم است شارژ می‌شود و هنگامی که تقاضای آن بالا است تخلیه می‌گردد، در نتیجه با کاهش اوج بار ارتقای تجهیزات فیدر به تعویق خواهد افتاد. اگر سرمایه‌گذاری مورد نیاز جهت ارتقای امکانات  $C_{inv}$  باشد، سود به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری با (۹) محاسبه می‌شود [۱]

$$B_{DEF} = C_{inv} \times \left(1 - \left(\frac{1+ir}{1+dr}\right)^{\Delta N}\right) \quad (9)$$

که در آن  $\Delta N$  نشان‌دهنده تعداد سال‌های تعویق توسعه شبکه است و با استفاده از (۱۰) محاسبه می‌شود

$$\Delta N = \frac{\log(1+\alpha)}{\log(1+\tau)} \quad (10)$$

که در آن  $\alpha$  درصد کاهش اوج بار توسط ذخیره‌ساز و  $\tau$  درصد رشد بار است. به منظور پیش‌بینی بار فیدر، از اطلاعات دریافتی از شرکت توزیع نیروی برق استان تهران استفاده شده است.

### ۳-۱-۵ هزینه سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری

هزینه سرمایه‌گذاری برای نصب سیستم ذخیره‌ساز وابسته به حداکثر توان قابل انتقال (مربوط به هزینه‌های مبدل الکترونیک قدرت و آماده‌سازی زمین برای نصب باتری  $(C_p)$ ) و حداکثر انرژی قابل ذخیره (مربوط به باتری  $(C_w)$ ) است. هزینه سرمایه‌گذاری با (۱۱) بیان شده که  $P_{max}$  و  $C_{max}$  به ترتیب حداکثر توان و ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز است [۳۴]

$$C_{ESS} = C_p P_{max} + C_w C_{max} \quad (11)$$

هزینه سالانه بهره‌برداری که شامل تعمیر و نگهداری از سیستم ذخیره‌ساز انرژی است (۱۲) به دو بخش ثابت  $(C_{Mf})$  و متغیر  $(C_{Mv})$  تقسیم می‌شود [۳۴]. بخش ثابت وابسته به تعمیر تجهیزات الکترونیک قدرت بوده و بخش متغیر به هزینه تلفات انرژی در هنگام تعمیر تجهیزات الکترونیک قدرت بستگی دارد

$$C_{O\&M} = (C_{Mf} + C_{Mv}) \times P_{max} \quad (12)$$

### ۳-۲ محدودیت‌ها و قیود مسئله

قیود به دو بخش سیستم ذخیره‌ساز و درصد کاهش اوج بار تقسیم شده که در ادامه شرح داده می‌شود.

### ۳-۲-۱ قیود سیستم ذخیره‌ساز

باتری‌ها بر اساس فناوری ساخت به دو دسته باتری‌های مرسوم همانند سرب اسیدی<sup>۱</sup>، نیکل کادمیم<sup>۲</sup> (Ni-Ca) و سدیم سولفار<sup>۳</sup> (Na-S) و باتری‌های جریان همانند وانادیم ریداکس<sup>۴</sup> (V-R) تقسیم‌بندی می‌شوند.

چگالی انرژی بالا، چرخه عمر بالا و قیمت کم از جمله مزایای باتری‌های سدیم سولفار هستند. باتری وانادیم ریداکس در بین باتری‌های جریان پیشرفته‌ترین باتری و در بین باتری‌های معرفی شده دارای بیشترین تعداد دفعات شارژ و دشارژ است [۳۵] و [۳۶].

قیود توان باتری از (۱۳) حاصل شده است [۳۷]

5. Genetic Algorithm
6. Particle Swarm Optimization
7. Ant Colony Optimization
8. Tabu Search

1. Lead-Acid
2. Nickel-Cadmium
3. Sodium-Sulphur
4. Vanadium-Redox

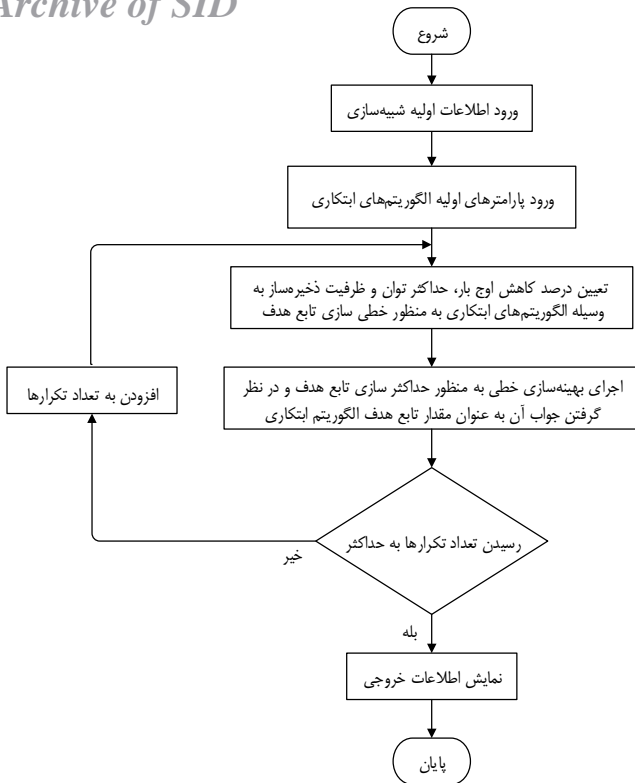


جدول ۲: نسبت فروش به خرید انرژی برای تعرفه‌های مختلف.

نوع تعرفه	نسبت
خانگی	۱
عمومی	۰٫۸
کشاورزی	۰٫۳
صنعتی	۱
تجاری	۳

جدول ۳: هزینه ارتقای فیدر و ساعات کل بهره‌برداری.

هزینه ارتقای فیدر (\$kM)	۸۴۰۰
ساعات کل بهره‌برداری (h)	۱۵۲×۲۴



شکل ۱: روندنمای کلی حل مسئله.

برنامه‌نویسی خطی به روش نقطه داخلی<sup>۱</sup> با الگوریتم‌های ابتکاری استفاده شده است.

روش حل به این صورت است که در ابتدا مقادیر  $P_{max}$ ،  $C_{max}$  و  $\alpha$  با الگوریتم‌های ابتکاری تعیین شده و تابع هدف خطی می‌شود. این تابع هدف خطی با برنامه‌نویسی خطی نرم‌افزار MATLAB حل شده و جواب آن به عنوان مقدار تابع هدف الگوریتم ابتکاری در نظر گرفته می‌شود. در تکرارهای بعدی این روند ادامه پیدا می‌کند تا بیشترین سود به وسیله الگوریتم‌های ابتکاری حاصل شود. در حقیقت در این روش حل، مسئله به روش خطی حل شده که جواب دقیق ریاضی حاصل شده (رعایت تمام قیود) و خروجی برنامه خطی به عنوان مقدار تابع هدف الگوریتم‌های ابتکاری در نظر گرفته می‌شود تا سود نهایی حداکثر شود. اتمام برنامه وابسته به تعداد جمعیت، تکرار و سایر مشخصه‌های الگوریتم‌های ابتکاری خواهد بود. روندنمای کلی حل مسئله در شکل ۱ آمده است.

## ۵- نتایج

این مطالعه در محدوده ۸ فیدر از مناطق ری و کهریزک شرکت توزیع نیروی برق نواحی تهران انجام شده است.

نسبت فروش انرژی برای تعرفه‌های مختلف به خرید آن از شبکه بالادست در جدول ۲ آورده شده است.

به منظور محاسبه شاخص‌های انتخاب فیدر، مقدار هزینه ارتقای فیدر و ساعات کل بهره‌برداری (با توجه اطلاعات پنج ماه) در جدول ۳ نشان داده شده است.

با توجه به امکان تهیه مکان مناسب برای نصب ذخیره‌ساز توسط بهره‌بردار، به منظور انتخاب فیدر مناسب فرض شده که در هر فیدر یک مکان مناسب برای نصب ذخیره‌ساز، متعلق به شرکت توزیع وجود دارد

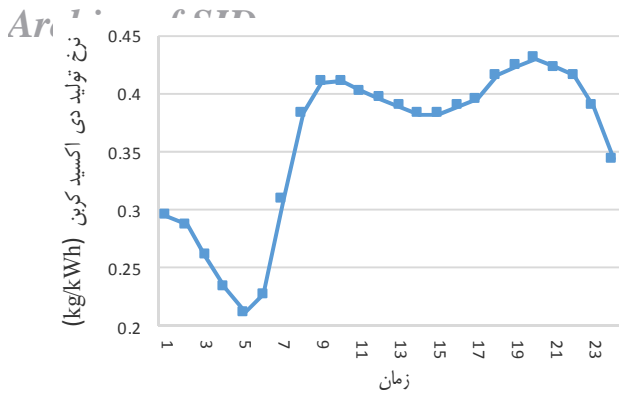
بیت‌های آن در ابتدا به صورت تصادفی انتخاب می‌شوند. ۱۱ بیت اول مربوط به  $P_{max}$  بوده و محدوده آن بین صفر تا ۱۵۰۰۰ kW است. همچنین ۶ بیت بعدی مربوط به  $C_{max}$  بوده و محدوده آن بین ۳ تا ۶ برابر  $P_{max}$  در نظر گرفته شده است. ۵ بیت باقیمانده مربوط به  $\alpha$  بوده و حداکثر آن ۰٫۴ (۴۰٪) در نظر گرفته شده است.

در این مقاله، در بهینه‌سازی دسته ذرات [۳۹] و [۴۰]، از روش کددهی حقیقی یا پیوسته (و نه دوتایی یا گسسته) استفاده شده است به صورتی که در الگوریتم فقط مقدار متغیر  $P_{max}$  در محدوده ۱۵۰۰۰-۱ kW تعیین شده است. مقدار متغیر  $C_{max}$  از ضرب اعداد تصادفی ۳، ۴، ۵ و ۶ در  $P_{max}$  و مقدار  $\alpha$  به صورت  $P_{max}/۱۰۰۰۰۰$  در نظر گرفته شده است. همچنین مقادیر ضرایب اینرسی و کنترلی ( $c_1$  و  $c_2$ ) به ترتیب برابر ۱، ۳ و ۳ فرض شده است. بازه توابع تولید عدد تصادفی بین صفر و یک است. همچنین مقدار سرعت حداکثر برابر یک‌دهم بازه  $P_{max}$  لحاظ شده است. در این مقاله در روش مورچگان [۴۱]، فضای اولیه جواب مانند روش ژنتیک است. تعداد مورچه‌ها برابر ۲۱ عدد در نظر گرفته شده است. فضای مسیر حرکت به صورت رشته دوتایی اولیه تولید شده که هر مورچه می‌تواند از هر بیت به بیت دیگر برود. در هر مرحله اگر جواب بهینه‌سازی مثبت باشد (سود مثبت) مقدار فرمون گذاشته‌شده بر روی مسیر به صورت مقدار جواب نهایی بخش بر عدد ۱۰۰۰۰۰ (به منظور زیاد از حد نبودن مقدار فرمون روی مسیر) در نظر گرفته شده است.

در روش جستجوی ممنوع [۴۲] این مقاله، به منظور کاهش زمان بهینه‌سازی، تنها مقدار حداکثر توان ذخیره‌ساز به صورت فضای گسسته تعریف شده و حداکثر انرژی و ضریب کاهش اوج بار همانند روش بهینه‌سازی دسته ذرات تعریف شده است. در ادامه با استفاده از جابه‌جایی بیت‌ها و تعویض مکان بیت‌ها در یک بازه، جواب‌هایی در همسایگی جواب اولیه حاصل می‌شود که هر کدام مناسب‌تر باشد در لیست ممنوعه قرار می‌گیرد.

## ۴-۲ روش حل

همان طور که قبلاً اشاره شد در ابتدا با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، فیدر مناسب برای نصب ذخیره‌ساز به وسیله تعریف شاخص‌های مناسب و وزن‌دهی آنها انتخاب می‌شود. در ادامه مقادیر بهینه نوع، اندازه و نحوه شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز تعیین می‌شود. با توجه به (۵) اگر  $P_{max}$ ،  $C_{max}$  و  $\alpha$  در هر مرحله توسط الگوریتم‌های ابتکاری تعیین شود تابع هدف به یک مسئله خطی تبدیل شده و جواب با استفاده از روش‌های خطی قابل محاسبه است، بنابراین در این مقاله از ترکیب



شکل ۲: منحنی تولید گاز دی‌اکسید کربن توسط نیروگاه‌ها.

جدول ۴: اولویت انتخاب فیدرها.

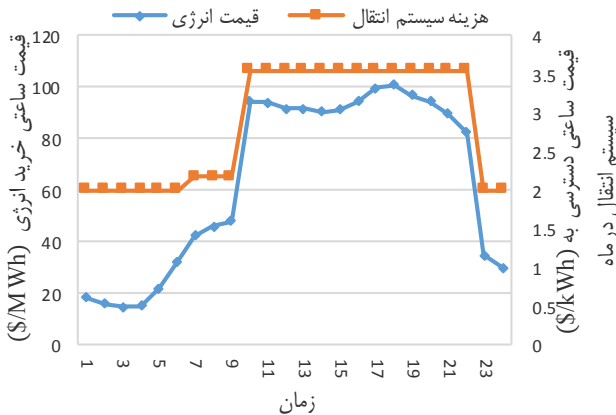
نام فیدر	طول فیدر (km)	حداکثر بار (MW)	مقادیر محاسبه شده اولویت
افضلی	۴۰	۷,۴۱	۰,۸۶۷۱
وطن	۲۵	۸,۳۶	۰,۷۷۷۱
ادیب	۳	۷,۳۷	۰,۷۴۴۹
شهرک صنعتی	۱۵	۵,۷۹	۰,۷۰۴۶
گل‌آذین	۶	۶,۶۹	۰,۶۳۱۷
گلشید	۶	۷,۱۲	۰,۶۱۰۹
درنا	۴	۷,۴۱	۰,۵۸۰۸
آسیا	۴	۶,۱۰	۰,۵۷۴۰

جدول ۵: نرخ سود، تورم و میزان جریمه برای تولید گاز دی‌اکسید کربن.

۹	نرخ سود (%)
۱,۵	نرخ تورم (%)
۲۵	جریمه برای تولید گاز دی‌اکسید کربن (Cent/kg)

جدول ۶: مدل‌سازی اقتصادی باتری‌ها.

باتری	$C_p$ (\$/kW)	$C_w$ (\$/kWh)	$C_{Mf}$ (\$/kW)	$C_{Mv}$ (\$/kW)	$\eta_{ESS}$ (%)
سرب اسید	۲۶۵	۱۲۵۸	۱۶,۵	۷	۷۵
نیکل کادمیم	۳۴۴	۱۴۲۴	۱۵,۱	۶,۷	۷۵
سدیم سولفار	۳۳۹	۱۹۶	۴۲,۲	صفر	۷۷
وانادیم ریداکس	۵۶۶	۲۳۶	۵۶,۱	صفر	۷۵



شکل ۳: قیمت ساعتی دسترسی به سیستم انتقال و خرید انرژی.

جدول ۷: سود نهایی باتری‌ها در روش‌های بهینه‌سازی بر حسب دلار.

وانادیم ریداکس	سدیم سولفار	نیکل کادمیم	سرب اسید	زنتیک
$۲,۴۵۹۹ \times ۱۰^۵$	$۱,۰۷۳۹ \times ۱۰^۶$	منفی	منفی	منفی
$۲,۴۷۰۲ \times ۱۰^۵$	$۱,۱۰۴۴ \times ۱۰^۶$	منفی	منفی	دسته ذرات
$۲,۱۹۵۲ \times ۱۰^۵$	$۸,۸۵۷۹ \times ۱۰^۵$	منفی	منفی	مورچگان
$۶,۷۴۵۰ \times ۱۰^۴$	$۷,۷۶۴۲ \times ۱۰^۵$	منفی	منفی	جستجوی ممنوع

نمودار متوسط سالانه نوعی تولید گاز دی‌اکسید کربن نیروگاه‌ها در شکل ۲ آمده است [۴۴].

قیمت ساعتی دسترسی به سیستم انتقال و خرید انرژی در طول شبانه‌روز همانند [۲۷] در نظر گرفته شده و در شکل ۳ نشان داده است. در جدول ۷ با توجه به شبیه‌سازی انجام شده برای باتری‌ها و روش‌های مختلف بهینه‌سازی، مقدار سود نهایی انتهای دوره مطالعه بر حسب دلار نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود باتری سدیم سولفار در روش بهینه‌سازی دسته ذرات دارای بیشترین مقدار سود نهایی است. در صورت لحاظ نشدن ضریب  $K$ ، یا به عبارت دیگر برابر بودن نرخ خرید و فروش انرژی، سود نهایی در تمام روش‌ها و باتری‌ها منفی می‌شود، بنابراین این ضریب نقش اساسی در بهینه‌سازی اقتصادی دارد. همچنین اگر از منحنی میانگین بار روزانه به جای بار تک‌تک روزها استفاده شود، سود نهایی در تمام روش‌ها و باتری‌ها منفی می‌شود.

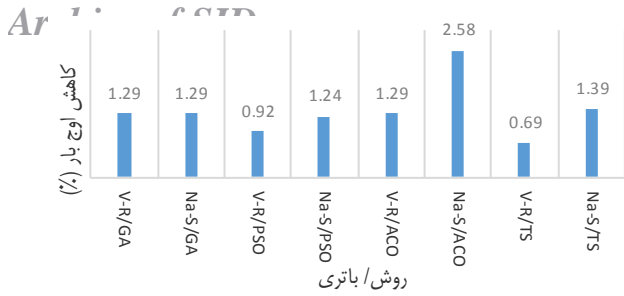
مقادیر بهینه توان و ظرفیت، کاهش اوج بار و کاهش آلاینده‌گی هوا، باتری سدیم سولفار، در چهار روش بهینه‌سازی در جدول ۸ آمده است. در جدول ۹ مقادیر عبارت تشکیل‌دهنده تابع هدف برای باتری سدیم سولفار در چهار روش بهینه‌سازی نشان داده شده است.

(همانند پست‌های توزیع) و نیازی به خریداری آن نیست، در نتیجه اطلاعات داده شده برای بارها از محل نصب ذخیره‌ساز بر روی فیدرها استخراج شده است.

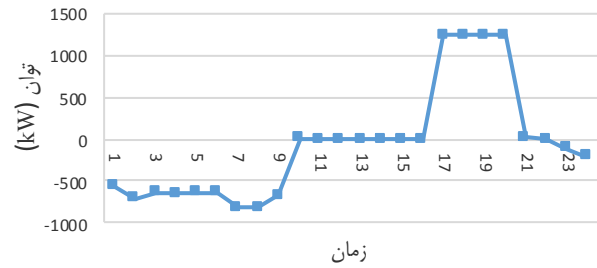
اطلاعات مربوط به هشت فیدر مورد مطالعه شامل طول فیدر، بیشینه بار ثبت شده، میزان رشد بار، مقدار ساعات مورد بهره‌برداری، میانگین بار و درصد تعرفه‌های موجود در فیدر، از شرکت توزیع اخذ شده و به ترتیب در جدول‌های ۴ و پیوست آمده است. با توجه به شاخص‌های تعریف شده و استفاده از اطلاعات جدول ۱ که به عنوان ضرایب وزنی شاخص‌ها در نظر گرفته شده‌اند، اولویت انتخاب فیدرها در جدول ۴ آمده است.

همان‌گونه که در جدول پیوست ملاحظه می‌شود، فیدر افضلی دارای بیشترین درصد بارهای تجاری در مقایسه با سایر فیدرها است. این موضوع، با توجه به حدود سه برابر بودن قیمت فروش انرژی به خرید آن در تعرفه تجاری، نقشی اساسی در انتخاب این فیدر دارد. از طرف دیگر، با توجه به این که محاسبه هزینه ارتقای فیدر به روش مرسوم رابطه مستقیم با طول فیدر دارد و طول فیدر افضلی از طولانی‌ترین فیدر بعدی ۱۵ کیلومتر بیشتر است، بنابراین این فیدر در نهایت برای نصب باتری انتخاب شده است. همچنین با توجه به درصد تعرفه‌های بارهای فیدر افضلی و قیمت فروش برق به این تعرفه‌ها، ضریب  $K$  برابر  $۱,۲۲$  محاسبه شده و با توجه به طول و هزینه ارتقای فیدر ضریب  $C_{inv}$  برابر  $\$ ۳۳۶۰۰۰$  در نظر گرفته شده است. همچنین درصد رشد بار سالانه برای فیدر منتخب در جدول پیوست نشان داده شده است.

مقادیر نرخ سود و تورم [۲۷] و میزان جریمه برای تولید گاز دی‌اکسید کربن [۴۳] در جدول ۵ نشان داده شده است. در جدول ۶ مدل‌سازی اقتصادی انواع باتری‌ها برای یک دوره ۲۰ ساله (با توجه به بازه عمر و احتساب هزینه جایگزینی) آورده شده است [۳۴].



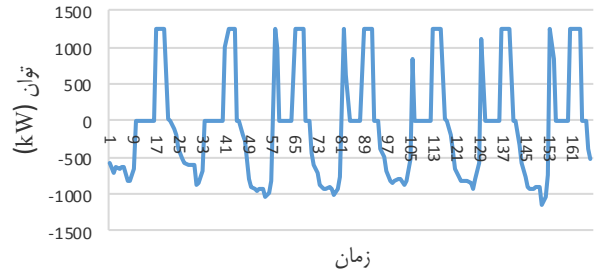
شکل ۶: مقایسه باتری‌ها از نظر کاهش اوج بار.



شکل ۴: شارژ و دشارژ باتری در روز اول برنامه‌ریزی.

جدول ۸: مقادیر بهینه در چهار روش بهینه‌سازی با باتری سدیم سولفار.

کاهش	کاهش	بیشینه توان	بیشینه انرژی	
آلاینده‌گی	اوج بار	$(P_{max})$	$(C_{max})$	
(kg)	(%)	(kW)	(kWh)	
۶۹۴۵۷	۱,۲۹	۱۴۵۱,۶	۷۳۹۶,۳	ژنتیک
۵۸۷۰,۲	۱,۲۴	۱۲۴۰,۲	۷۴۴۰,۹	دسته ذرات
۵۲۱۱۷	۲,۵۸	۹۲۳,۷	۴۷۹۴,۷	مورچگان
۵۷۱۳۸	۱,۳۹	۱۳۹۳	۸۳۵۷,۸	جستجوی ممنوع



شکل ۵: شارژ و دشارژ باتری در هفته ابتدایی برنامه‌ریزی.

جدول ۹: مقادیر عبارت تشکیل‌دهنده تابع هدف برای باتری سدیم سولفار.

هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه بهره‌برداری	سود تأخیر ارتقا	سود دسترسی به سیستم	سود خرید و فروش
$(C_{ESS})$	$(C_{O\&M})$	$(B_{DEF})$	انتقال $(B_{TRANS})$	انرژی $(B_{ARB})$
(\$)	(\$)	(\$)	(\$)	(\$)
$۱,۹۴ \times 10^6$	$۶,۱۳ \times 10^4$	$۵,۰۰ \times 10^3$	$۳,۳۷ \times 10^4$	$۷,۲۴ \times 10^4$
$۱,۸۸ \times 10^6$	$۵,۲۳ \times 10^4$	$۴,۸۱ \times 10^3$	$۳,۳۴ \times 10^4$	$۷,۰۴ \times 10^4$
$۱,۲۵ \times 10^6$	$۳,۹۰ \times 10^4$	$۹,۸۷ \times 10^3$	$۲,۲۸ \times 10^4$	$۴,۹۹ \times 10^4$
$۲,۱۱ \times 10^6$	$۵,۸۸ \times 10^4$	$۵,۴۰ \times 10^3$	$۳,۶۵ \times 10^4$	$۷,۶۲ \times 10^4$

جدول ۱۰: مقادیر بهینه توان و غیره برای دو باتری سدیم سولفار و وانادیم ریداکس در روش دسته ذرات.

بیشینه توان	بیشینه انرژی	کاهش اوج	کاهش آلاینده‌گی
$(P_{max})$	$(C_{max})$	بار $(\alpha)$	آلاینده‌گی (kg)
(kW)	(kWh)	(%)	
۱۲۴۰,۲	۷۴۴۰,۹	۱,۲۴	۵۸۷۰,۲
۹۲۴,۳	۵۵۴۵,۹	۰,۹۲	۳۹۴۳,۱

همان طور که مشاهده می‌شود، باتری در ساعات کم‌باری و قیمت کم شارژ شده و در زمان اوج بار و قیمت بالاتر دشارژ می‌شود.

کل انرژی تزریق‌شده به شبکه در طول دوره مطالعه ۱۵۲ روزه برای باتری سدیم سولفار و در روش دسته ذرات برابر با  $۱,۱ \times 10^6$  kWh است. مقایسه دو باتری سدیم سولفار (Na-S) و وانادیم ریداکس (V-R) که دارای سود نهایی مثبت هستند، بر اساس میزان کاهش اوج بار، در چهار روش بهینه‌سازی (ژنتیک (GA)، دسته ذرات (PSO)، مورچگان (ACO) و جستجوی ممنوع (TS)) در شکل ۶ آورده شده است.

همان طور که مشاهده می‌شود باتری سدیم سولفار در روش مورچگان دارای بیشترین ضریب کاهش اوج بار است. از طرفی باتری سدیم سولفار در روش بهینه‌سازی دسته ذرات دارای بیشترین سود نهایی است. بنابراین به دلیل این که تابع هدف با توجه به برآیند سودها و هزینه‌ها تعریف شده است، روشی که دارای بیشترین سود نهایی است لزوماً دارای بیشترین ضریب کاهش اوج بار نیست.

با توجه به این که روش دسته ذرات دارای بیشترین مقدار سود نهایی است، تابع هدف ارائه‌شده در [۲۷] با استفاده از روش دسته ذرات بهینه‌سازی شده و مقدار سود نهایی با روش [۲۷] مقایسه شده است. مقادیر بهینه توان و ظرفیت باتری و سود نهایی با استفاده از روش دسته ذرات و روش پیشنهادی [۲۷]، در جدول ۱۱ آورده شده است.

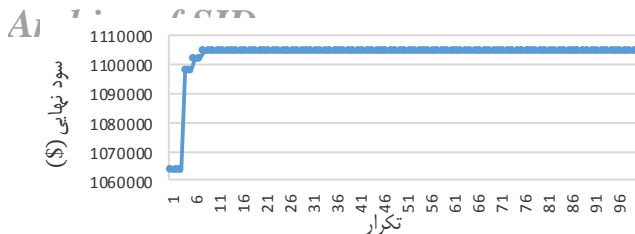
همان طور که مشاهده می‌شود روش دسته ذرات مقدار سود نهایی بیشتری نسبت به روش ارائه‌شده در [۲۷] دارد. در شکل ۷ به عنوان نمونه، منحنی همگرایی روش دسته ذرات با باتری سدیم سولفار نشان داده شده است. همان طور که مشاهده می‌شود میزان تکرارهای در نظر گرفته شده برای همگرایی کافی است و بهینگی را تضمین می‌کند.

همان طور که مشاهده می‌شود برای باتری سدیم سولفار در روش ژنتیک، بیشترین کاهش آلاینده‌ها حاصل شده است لیکن با توجه به این که در تابع هدف پارامترهای دیگری همچون سود خرید و فروش انرژی، دسترسی به سیستم انتقال و هزینه نصب و بهره‌برداری وجود دارد (جدول ۹)، روش دسته ذرات سود نهایی بیشتری را ایجاد کرده است. در نتیجه ملاحظه می‌شود، اهداف تابع هدف در بعضی موارد در جهت عکس هم عمل می‌کنند و بنابراین باید با مصالحه‌ای بین سودها و هزینه‌ها، بهترین جواب حاصل شود.

مقادیر بهینه توان و ظرفیت دو باتری سدیم سولفار و وانادیم ریداکس، کاهش اوج بار و کاهش آلاینده‌گی هوا در روش بهینه‌سازی دسته ذرات، در جدول ۱۰ آمده است.

ملاحظه می‌شود باتری سدیم سولفار، درصد کاهش اوج بار بالاتر و میزان کاهش آلاینده‌گی بیشتری دارد.

در این مقاله، نحوه شارژ و دشارژ باتری در یک روز خاص برای تمام سال‌های مطالعه یکسان فرض شده است. با توجه به این موضوع، شکل ۴ و ۵ به ترتیب نشان‌دهنده شارژ و دشارژ برای روز اول و هفته ابتدایی دوره مطالعه هستند.



شکل ۷: همگرایی روش دسته ذرات با باتری سدیم سولفار.

جدول ۱۱: بیشینه توان و انرژی و سود نهایی روش‌های بهینه‌سازی.

سود نهایی (US\$)	بیشینه انرژی (kWh) ( $C_{max}$ )	بیشینه توان (kW) ( $P_{max}$ )
$۴,۵۰۲۵ \times ۱۰^۶$	$۴,۵۸۳۳ \times ۱۰^۴$	$۷,۶۳۸۶ \times ۱۰^۳$
$۴,۳۹۸۹ \times ۱۰^۶$	$۵,۶۱۳۹ \times ۱۰^۴$	$۸,۶۹۶ \times ۱۰^۳$

دسته ذرات [۲۷]

جدول پ-۱: اطلاعات فیدرهای مورد مطالعه.

نام فیدر	درصد رشد بار سالانه	ساعات بهره‌برداری	میانگین بار (MW)	صنعتی (%)	تجاری (%)	خانگی (%)	کشاورزی (%)	عمومی (%)
افضلی	۶,۲۸	۴۰۰۶	۳,۸۱	۰	۱۵	۷۰	۱۰	۵
وطن	۱۱,۸	۴۳۹۳	۴,۷۵	۲۰	۱۰	۷۰	۰	۰
ادیب	۷,۹۸	۳۴۷۲	۲,۲۳	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
شهرک صنعتی	۱۲,۲	۳۶۷۱	۲,۴۴	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
گل‌آذین	۱۰,۵	۳۴۶۶	۳,۰۹	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
گلشید	۷,۲۸	۳۴۵۴	۳,۵۹	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
درنا	۱۲,۷	۴۳۹۳	۴,۶۴	۱۰۰	۰	۰	۰	۰
آسیا	۱۰	۳۱۹۷	۲,۳۸	۱۰۰	۰	۰	۰	۰

[۶] ن. بیابانی، م. رضانی و ح. فلقی، "افزایش نفوذ منابع تولید پراکنده توسط جایابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در شبکه‌های توزیع"، نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، سال ۱۱، شماره ۲، صص. ۶۵-۵۷، تابستان ۱۳۹۲.

[7] M. Chen, et al., "Optimal allocation method on distributed energy storage system in active distribution network," *Energy Procedia*, vol. 141, no. 4, pp. 525-531, Dec. 2017.

[8] V. F. Pires, A. V. Pombo, and J. M. Lourenço, "Multi-objective optimization with post-pareto optimality analysis for the integration of storage systems with reactive-power compensation in distribution networks," *J. of Energy Storage*, vol. 24, pp. 1-14, Aug. 2019.

[9] M. R. Jannesar, A. Sedighi, M. Savaghebi, and J. M. Guerrero, "Optimal placement, sizing, and daily charge/discharge of battery energy storage in low voltage distribution network with high photovoltaic penetration," *Applied Energy*, vol. 226, pp. 957-966, Sep. 2018.

[10] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal planning of distributed energy storage systems in active distribution networks embedding grid reconfiguration," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 33, no. 2, pp. 1577-1590, Mar. 2018.

[11] A. F. Crossland, D. Jones, and N. S. Wade, "Planning the location and rating of distributed energy storage in LV networks using a genetic algorithm with simulated annealing," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 59, pp. 103-110, Jul. 2014.

[12] H. Mehrjerd, "Simultaneous load leveling and voltage profile improvement in distribution networks by optimal battery storage planning," *Energy*, vol. 181, pp. 916-926, Aug. 2019.

[13] A. Giannitrapani, S. Paoletti, A. Vicino, and D. Zarrilli, "Optimal allocation of energy storage systems for voltage control in LV distribution networks," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 8, no. 6, pp. 2859-2870, Nov. 2017.

[14] A. S. A. Awad, T. H. M. EL-Fouly, and M. M. A. Salama, "Optimal ESS allocation for load management application," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 30, no. 1, pp. 327-336, Jan. 2015.

[15] D. Q. Hung and N. Mithulananthan, "Community energy storage and capacitor allocation in distribution systems," in AUPEC, Brisbane, 2011.

[16] E. Grover-Silva, R. Girard, and G. Kariniotakis, "Optimal sizing and placement of distribution grid connected battery systems through an SOCP optimal power flow algorithm," *Applied Energy*, vol. 219, pp. 385-393, Jun. 2018.

[17] C. K. Das, et al., "Optimal allocation of distributed energy storage systems to improve performance and power quality of distribution networks," *Applied Energy*, vol. 252, pp. 1-19, Oct. 2019.

[18] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal siting and sizing of distributed energy storage systems via alternating direction method of multipliers," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 72, pp. 33-39, Nov. 2015.

## ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله توان، ظرفیت و نحوه شارژ و دشارژ بهینه ذخیره‌ساز با توجه به تابع هدف اقتصادی تعریف‌شده در شبکه‌های توزیع انرژی الکتریکی محاسبه گردیده است. مشاهده شد به دلیل سه‌برابری تعرفه فروش انرژی نسبت به خرید آن برای بارهای تجاری و همچنین وابسته‌بودن هزینه ارتقای فیدر به طول آن، فیدر مناسب دارای بیشترین درصد بارهای تجاری و طول می‌باشد. به علاوه باتری سدیم سولفار و روش بهینه‌سازی دسته ذرات به عنوان باتری و روش بهینه معرفی شد. همچنین این نتیجه حاصل شد که اگر از منحنی میانگین بار روزانه به جای بار تک‌تک روزها استفاده شود و یا اختلاف نرخ خرید و فروش انرژی لحاظ نشود، سود نهایی در تمام روش‌ها و باتری‌ها منفی می‌شود. با توجه به هزینه نسبتاً زیاد باتری‌ها، تخصیص بهینه با دستیابی به حداکثر اهداف انجام شد. همچنین مشاهده شد بیشتر بودن میزان کاهش اوج بار و یا کاهش آلاینده‌ها لزوماً منجر به ایجاد بیشترین سود نهایی نمی‌شود.

## پیوست

اطلاعات فیدرهای مورد مطالعه در جدول پ-۱ آمده است.

## مراجع

[1] F. A. Chacra, P. Bastard, G. Fleury, and R. Clavreul, "Impact of energy storage costs on economical performance in a distribution substation," *IEEE Trans. Power Systems*, vol. 20, no. 2, pp. 684-691, May 2005.

[2] A. Nourai, Installation of the first distributed energy storage system at AEP, Sandia National Laboratories, 2007.

[3] L. A. Wong, et al., "Review on the optimal placement, sizing and control of an energy storage system in the distribution network," *J. Energy Storage*, vol. 21, pp. 489-504, Feb. 2019.

[4] N. Jayasekara, M. A. S. Masoum, and P. J. Wolfs, "Optimal operation of distributed energy storage systems to improve distribution network load and generation hosting capability," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 7, no. 1, pp. 250-261, Jan. 2016.

[5] P. Lazzeroni and M. Repetto, "Optimal planning of battery systems for power losses reduction in distribution grids," *Electric Power Systems Research*, vol. 167, pp. 94-112, Feb. 2019.



- [35] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, "Energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, vol. 57, no. 12, pp. 3881-3895, Dec. 2010.
- [36] A. Oudalov, D. Chartouni, C. Ohler, and G. Linhofer, "Value analysis of battery energy storage applications in power systems," in *IEEE PES Power Systems Conf. and Expos.*, pp. 2206-2211, Atlanta, USA, 29 Oct.-1 Nov. 2006.
- [37] S. X. Chen, H. B. Gooi, and M. Q. Wang, "Sizing of energy storage for microgrids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 3, no. 1, pp. 142-151, Mar. 2012.
- [۳۸] د. اتابکی و خ. کلک، "الگوریتم ژنتیک قسمت دوم،" ماهنامه پردازشگر، شماره ۸۰، صص. ۲۶-۲۹، دی ۱۳۸۹.
- [39] I. Chung, W. Liu, D. A. Cartes, and K. Schoder, "Control parameter optimization for a microgrid system using particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Inter. Conf. Sustainable Energy Technology*, pp. 837-842, Singapore, 24-27 Nov. 2008.
- [۴۰] ح. شریفزاده و ن. امجدی، "توزیع بهینه توان راکتیو با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی دسته ذرات،" مجله مل‌سازی در مهندسی، دوره ۴، شماره ۱۸، صص. ۶۹-۶۳ پاییز ۱۳۸۸.
- [۴۱] ر. قاضی و ا. عرب‌پور، "برنامه‌ریزی توان راکتیو چندهدفه در شبکه‌های قدرت با استفاده از روش کلونی مورچه شتاب‌یافته و وزن‌دهی سلسله‌مراتبی،" نشریه دانشکده فنی، دوره ۴۰، شماره ۳، صص. ۳۹۸-۳۸۷، پاییز ۱۳۸۵.
- [۴۲] م. ا. همدانی گلشن، س. ع. عارفی‌فر و ق. مصلحی، "به کارگیری الگوریتم جستجوی ممنوع در تخصیص بهینه تولیدات پراکنده و منابع توان راکتیو،" نوزدهمین کنفرانس بین‌المللی برق، صص. ۱۲-۱۰، تهران، ایران، آذر ۱۳۸۳.
- [43] A. Zangeneh, S. Jadid, and A. Rahimi-Kian, "Promotion strategy of clean technologies in distributed generation expansion planning," *Renewable Energy*, vol. 34, no. 12, pp. 2765-2773, Dec. 2009.
- [44] A. Talaie, K. Begg, and T. Jamasb, *The Large Scale Roll-Out of Electric Vehicles: the Effect on the Electricity Sector and CO2 Emissions*, EPRG Working Paper 1222, 2012.
- محمدرسول جان نثار** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۹۲، ۱۳۹۷ و ۱۳۹۷ در دانشگاه صنعتی اصفهان، علم و صنعت و یزد به پایان رسانده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌سازها، کیفیت توان و مباحث اقتصادی سیستم قدرت می‌باشد.
- محسن کلانتر** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۵، ۱۳۶۷ و ۱۳۷۰ در انستیتوی تکنولوژی منطقه‌ای بوپال و انستیتوی تکنولوژی هند به پایان رسانده است. وی هم‌اکنون استاد دانشکده مهندسی برق دانشگاه علم و صنعت می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل کنترل، پایداری و دینامیک سیستم قدرت، انرژی‌های تجدیدپذیر، ریزشبه، شبکه هوشمند، سیستم‌های توزیع و اتوماسیون، مدیریت انرژی و پاسخگویی بار می‌باشد.
- علیرضا صدیقی** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی، کارشناسی ارشد و دکتری مهندسی برق قدرت به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۹، ۱۳۷۳ و ۱۳۸۳ در دانشگاه صنعتی اصفهان و تربیت مدرس به پایان رسانده است. وی هم‌اکنون دانشیار دانشکده مهندسی برق دانشگاه یزد می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان شامل پردازش سیگنال‌های الکتریکی، کاربرد روش‌های هوشمند در بهینه‌سازی، طراحی سیستم‌های توزیع و کنترل و بهره‌برداری سیستم قدرت می‌باشد.
- [19] M. Daghi, M. Sedghi, A. Ahmadian, and M. Aliakbar-Golkar, "Factor analysis based optimal storage planning in active distribution network considering different battery technologies," *Applied Energy*, vol. 183, pp. 456-469, Dec. 2016.
- [20] D. Parra, M. Gillott, S. A. Norman, and G. S. Walker, "Optimum community energy storage system for PV energy time-shift," *Applied Energy*, vol. 137, pp. 576-587, Jan. 2015.
- [21] H. Mehrjerdi and R. Hemmati, "Modeling and optimal scheduling of battery energy storage systems in electric power distribution networks," *J. of Cleaner Production*, vol. 234, pp. 810-821, Oct. 2019.
- [22] W. Bingying, Z. Buhan, M. Biao, and Z. Jiajun, "Optimal capacity of flow battery and economic dispatch used in peak load shifting," in *Proc. 4th Inter. Conf. DRPT*, pp. 1395-1400, Shandong, China, 6-9 Jul. 2011.
- [23] M. Zolfaghari, N. Ghaffarzadeh, and A. J. Ardakani, "Optimal sizing of battery energy storage systems in off-grid micro grids using convex optimization," *J. of Energy Storage*, vol. 23, pp. 44-56, Jun. 2019.
- [24] G. Carpinelli, et al., "Optimal integration of distributed energy storage devices in smart grids," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 985-995, Jun. 2013.
- [25] C. K. Das, O. Bass, G. Kothapalli, T. S. Mahmoud, and D. Habibi, "Optimal placement of distributed energy storage systems in distribution networks using artificial bee colony algorithm," *Applied Energy*, vol. 232, pp. 212-228, Dec. 2018.
- [26] J. Sardi, N. Mithulananthan, M. Gallagher, and D. Q. Hung, "Multiple community energy storage planning in distribution networks using a cost-benefit analysis," *Applied Energy*, vol. 190, pp. 453-463, Mar. 2017.
- [27] R. C. Leou, "An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation," *International J. of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 34, no. 1, pp. 132-137, Jan. 2012.
- [28] R. C. Johnson, M. Mayfield, and S. B. M. Beck, "Optimal placement, sizing, and dispatch of multiple BES systems on UK low voltage residential networks," *J. of Energy Storage*, vol. 17, pp. 272-286, Jun. 2018.
- [29] H. Saboori, R. Hemmati, and V. Abbasi, "Multistage distribution network expansion planning considering the emerging energy storage systems," *Energy Conversion and Management*, vol. 105, pp. 938-945, Nov. 2015.
- [۳۰] ع. مهدی‌زاده و ن. تقی‌زادگان کلانتری، "برنامه‌ریزی بهینه اقتصادی یک ریزشبه در حالت جزیره‌ای با در نظر گرفتن منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی، باتری و سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی در حضور برنامه پاسخگویی بار،" نشریه مهندسی برق و کامپیوتر ایران، سال ۱۵، شماره ۱-الف، صص. ۱۱-۱، تابستان ۱۳۹۶.
- [31] X. Shen, M. Shahidehpour, Y. Han, S. Zhu, and J. Zheng, "Expansion planning of active distribution networks with centralized and distributed energy storage systems," *IEEE Trans. Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 126-134, Jan. 2017.
- [32] H. I. Elsayed, S. R. Chaudhry, and A. A. Al-Mahmoud, "PV, battery storage and energy conversion system for meeting peak load in a substation," in *Proc. CIREC 2012 Workshop*, Lisbon, 2012.
- [۳۳] م. خلیلی، تکنیک تصمیم‌گیری چند معیار تحلیلی سلسله‌مراتبی، مؤسسه تحقیق در عملیات معین گستر گیتی، ۱۳۸۸.
- [34] -, *EPRI-DOE Handbook Supplement of Energy Storage for Grid Connected Wind Generation Applications*, Technical Update, Dec. 2004.