

# جایابی بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با در نظرگیری عدم قطعیت‌های تولید منابع تجدیدپذیر، بار و قیمت برق

نوید تقی‌زادگان کلانتری، یوسف فنونی و مرتضی آهنگری حساس

ریسک حضور تولیدات انرژی تجدیدپذیر در بازار برق است. هرچه عدم قطعیت تولید بیشتر شود میزان سود نیروگاه در بازار برق کاهش می‌یابد [۳]. بنابراین به این منظور منابع انرژی تجدیدپذیر برای این که قابل اعتماد باشند باید انرژی را به صورت اولیه ذخیره‌سازی نمایند، بدین صورت که انرژی در زمانی که تولید مازاد است ذخیره می‌شود و در زمانی که تولید کمتر از تقاضا است، مورد استفاده قرار می‌گیرد [۴] و [۵].

پیشرفت‌های تکنولوژیکی جدید در سیستم‌های قدرت علی‌الخصوص اتصال منابع انرژی تجدیدپذیر و حرکت به سمت تجارت آزاد در بازارهای برق، فرصت‌ها و افق‌های جدیدی را پیش روی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی گشوده است. از سوی دیگر، اهمیت و کاربردهای مختلف تکنولوژی‌های ذخیره انرژی الکتریکی در دهه اخیر بسیار بیشتر از گذشته است [۶]. مشکلات اخیر موجب ایجاد نیاز اساسی در ارزیابی و تحلیل ویژگی‌های خاص هر تکنولوژی شده است. از جمله کاربردهای این تکنولوژی‌ها می‌توان به پیک‌سای، تسطیح منحنی بار، آریترایز انرژی، تثبیت فرکانس، به تعویق انداختن توسعه خطوط انتقال، کاهش نوسانات ولتاژ، افزایش کیفیت توان و افزایش قابلیت اطمینان اشاره کرد [۷] و [۸].

عملیات ذخیره‌سازی، تعیین اندازه و مکان ذخیره‌ساز، در مورد ذخیره انرژی در سیستم‌های قدرت دارای اهمیت فراوانی است. اکثر مقالات منتشرشده در این موضوع تمرکز بر عملیات ذخیره‌سازی دارند. محل ذخیره‌سازی پیچیده‌ترین این سه مسأله بوده و کمترین توجه را به خود جلب کرده است. اندازه ذخیره‌سازی بهینه (مقدار انرژی و قدرت) بستگی به عملکرد مطلوب ذخیره‌سازی نیز دارد [۹] و [۱۰]. مکان بهینه ذخیره‌ساز بستگی به اندازه ذخیره‌ساز در نظر گرفته شده و نحوه عملکرد آن دارد. این مشکل حتی پیچیده‌تر می‌شود اگر به جای یک واحد ذخیره‌سازی تنها، ذخیره‌سازی توزیع‌شده در نظر گرفته شود [۱۱].

مرجع [۱۲] تعیین اندازه ذخیره‌ساز را با در نظر گرفتن عدم قطعیت پیش‌بینی منابع انرژی تجدیدپذیر به منظور کاهش ریسک ژنراتورها، پیک‌سای و متعادل کردن نوسانات منابع انرژی تجدیدپذیر و عدم قطعیت خط‌های مربوط به پیش‌بینی و همچنین کاهش هزینه‌های تولید و افزایش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر انجام داده است. در [۱۳] اندازه ذخیره‌سازی بهینه برای تعادل انرژی در یک سیستم متشکل از تولید باد و بار با توجه به عدم قطعیت در پیش‌بینی‌های هر دو محاسبه شده است. مرجع [۱۴] بر روی مسأله مکان‌یابی و اندازه‌یابی مطلوب ذخیره‌سازها تمرکز دارد. روش پیشنهادی، پشتیبانی از ولتاژ و کاهش تلفات شبکه همراه با کمینه‌کردن هزینه انرژی از شبکه بیرونی و مدیریت تراکم را مورد توجه قرار می‌دهد. یک شبکه واقعی در مقیاس بزرگ با پروفیل واقعی بار و تولید فتوولتائیک توزیع‌شده به عنوان مطالعه موردی برای تجزیه و تحلیل اثربخشی روش پیشنهادی در نظر گرفته شده است. مرجع

چکیده: کاهش هزینه‌های شبکه و افزایش درآمد، یکی از اهداف مهم اپراتورهای شبکه می‌باشد. در این مقاله، مسأله جایابی و تعیین اندازه ذخیره‌سازهای انرژی مورد مطالعه قرار گرفته است. جایابی در جهت بیشینه‌کردن سود به دست آمده از تأسیس واحدهای تولید پراکنده و بهره‌برداری از ذخیره‌سازها انجام می‌پذیرد. مؤلفه‌های تشکیل‌دهنده تابع هدف مسأله جایابی شامل سود به دست آمده از بهره‌برداری واحد تولید پراکنده، سود به دست آمده از کاهش تلفات توان شبکه، هزینه نصب ذخیره‌ساز انرژی و سود به دست آمده از کاهش انرژی خریداری‌شده از شبکه بالادست می‌باشد. مدل به کار رفته به منظور جایابی، مبتنی بر رفتار احتمالاتی تابش خورشید، مصرف‌کننده‌های انرژی و اپراتورهای بازار برق است. به منظور مدل‌سازی طبیعت تصادفی توان خروجی نیروگاه‌های خورشیدی از تابع چگالی احتمال و برای مدل‌سازی بار و قیمت برق از روش سناریوبندی استفاده شده و شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار Matlab صورت گرفته است. در این مقاله، بالابردن قابلیت شبکه با بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی مسأله اصلی است.

کلیدواژه: بهینه‌سازی، تجدیدپذیر، ذخیره‌ساز، طراحی، عدم قطعیت.

## ۱- مقدمه

با توجه به رشد روزافزون مصرف انرژی الکتریکی و مشکلات زیست‌محیطی ناشی از نیروگاه‌های سوخت فسیلی، ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سیستم قدرت جدی به نظر می‌رسد. کشورهای مختلف جهان به منظور استفاده بیشتر از انرژی‌های تجدیدپذیر، سرمایه‌گذاری‌های زیادی در این زمینه انجام داده‌اند. انرژی‌های تجدیدپذیر، مانند انرژی خورشیدی و انرژی بادی، وابستگی مستقیمی به آب و هوا دارند. پیش‌بینی دقیق در مورد شرایط آب و هوایی موجب پیش‌بینی درست در مورد تولید این نیروگاه‌ها می‌شود [۱] و [۲]. به دلیل عدم قطعیت پیش‌بینی آب و هوا، میزان تولید این نیروگاه‌ها نیز دارای عدم قطعیت بوده و معمولاً این میزان با مقدار پیش‌بینی شده برابر نیست. عدم قطعیت در تولید باعث کاهش قابلیت اطمینان سیستم شده و سیستم قدرت نیاز به یک پشتیبان با ظرفیت زیاد خواهد داشت تا در صورت کاهش تولید، مقدار این کاهش را بتواند جبران کند. مشکل دیگر افزایش

این مقاله در تاریخ ۱۸ شهریور ماه ۱۳۹۹ دریافت و در تاریخ ۴ مرداد ماه ۱۴۰۰ بازنگری شد.

نوید تقی‌زادگان کلانتری (نویسنده مسئول)، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: taghizadegan@azaruniv.ac.ir).  
یوسف فنونی، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: eng.fonooni@gmail.com).  
مرتضی آهنگری حساس، گروه مهندسی برق قدرت، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان، تبریز، ایران، (email: m.ahangari@azaruniv.ac.ir).

روش برنامه‌ریزی چندهدفه برای جایابی ادوات ذخیره انرژی در یک سیستم نمونه دارای نیروگاه خورشیدی ارائه شده است. در روش پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در تولید واحدهای خورشیدی و قیمت انرژی، ادوات ذخیره انرژی به گونه‌ای تعیین مکان و اندازه شدند که استفاده حداکثری از منابع خورشیدی ممکن و از سویی با کنترل، شارژ و دشارژ باتری‌ها سعی در خرید انرژی از این واحدها شود.

### ۳- مدل‌سازی ریاضی و عدم قطعیت‌ها

با توجه به کاربرد وسیع منابع تولید پراکنده در شبکه توزیع، روش‌های بهینه‌سازی متفاوتی جهت یافتن مکان و ظرفیت بهینه آنها ارائه شده است. مدل بار و قیمت برق تأثیر بسزایی بر مکان و اندازه منابع تولید پراکنده در مسأله جایابی دارد. تغییرات منحنی بار مشترکین و قیمت برق با استفاده از روش‌های پیش‌بینی دارای درصدی خطا بوده و به صورت قطعی مشخص نیست [۲۶] و [۲۷]. در این مطالعه عدم قطعیت در منحنی تداوم بار و قیمت برق به صورت احتمالی با استفاده از سناریوبندی مدل‌سازی شده است.

#### ۳-۱ عدم قطعیت بار و قیمت برق

تغییرات روزانه بار به صورت منحنی تداوم بار با  $N$  سطح تقاضا و هر سطح تقاضا به مدت یک ساعت مدل‌سازی می‌شود. توان‌های اکتیو، راکتیو و ظاهری مصرف‌شده به ترتیب به صورت زیر محاسبه خواهند شد

$$P_{i,t,h} = P_i \times DLF_{i,t,h} \times (1 + \alpha)^t \quad (1)$$

$$Q_{i,t,h} = Q_i \times DLF_{i,t,h} \times (1 + \alpha)^t \quad (2)$$

$$S_{i,t,h} = P_{i,t,h} + jQ_{i,t,h} \quad (3)$$

در (۱) تا (۳)،  $\alpha$  نرخ رشد بار،  $t$  سال دوره برنامه‌ریزی،  $h$  سطح تقاضا،  $i$  شماره باس،  $DLF$  شاخص سطح تقاضا و  $PLF$  شاخص سطح قیمت بوده که با استفاده از سناریوبندی که در ادامه توضیح داده خواهد شد محاسبه می‌شوند.

با توجه به میزان مصرف برق و رفتار بهره‌بردار بازار برق، قیمت برای برق خریداری‌شده از شبکه اصلی در هر سطح تقاضا و در هر سال از دوره برنامه‌ریزی توسط (۴) مدل‌سازی می‌شود

$$\rho_{i,t,h} = \rho \times PLF_{i,t,h} \quad (4)$$

در (۴)،  $\rho$  قیمت انرژی پایه می‌باشد.

منحنی تغییرات روزانه بار و قیمت برق با الگوی نشان داده شده در شکل ۱ صورت می‌گیرد. سناریوبندی برای شاخص سطح بار و قیمت برق، برای سه سطح بار (پیک بار، کم‌باری و بار متوسط) و همچنین به تبع آن قیمت برق (در پیک بار قیمت بیشتر، در کم‌باری قیمت کمتر و در بار متوسط قیمت استاندارد) با استفاده از تابع توزیع احتمال نرمال به صورت شکل ۲ در نظر گرفته می‌شوند.

احتمال و مقدار متوسط هر فاصله برای هر سناریو باید محاسبه شود. منحنی توزیع احتمال می‌تواند توسط تابع توزیع احتمال با مقدار متوسط صفر و انحراف معیار یک محاسبه شود. همچنین باید توجه شود که احتمالات مربوط به سناریوهای بار و قیمت برق به همدیگر وابسته هستند که به صورت زیر در نظر گرفته می‌شوند

$$\pi_S = \pi_D \times \pi_P \quad (5)$$

[۱۵] به منظور مکان‌یابی و اندازه‌یابی بهینه ذخیره‌ساز انرژی برای به حداقل رساندن هزینه‌های ادغام منابع تجدیدپذیر، شبیه‌سازی عملیاتی را تحت پروفیل‌های زمانی مختلف تولید متناوب و بارها بر روی شبکه IEEE انجام داده است. مرجع [۱۶] چارچوبی را برای مکان‌یابی، اندازه‌یابی و همچنین بهره‌برداری بهینه باتری‌ها به منظور کاهش نوسانات منابع تجدیدپذیر و دستیابی به مزایای قابل توجه اقتصادی و عملیاتی در میکروگریدها انجام داده است. مرجع [۱۷] سیستم‌های ذخیره انرژی باتری را به عنوان وسیله‌ای برای ارائه خدمات جانبی در شبکه‌های توزیع فعال برشمرده و از این رو، طراحی بهینه مکان و اندازه باتری‌ها را از لحاظ اقتصادی مورد مطالعه قرار داده است. مرجع [۱۸] تعیین اندازه و مکان بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی، برای برنامه‌ریزی عملیات سیستم‌های قدرت با ادغام قدرت باد در مقیاس بزرگ و با هدف کاهش نوسانات انرژی باد در طول بازه زمانی، به منظور حفظ تعادل بار تولیدی مورد مطالعه قرار داده است. در این مقاله یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه برای جایابی ادوات ذخیره انرژی در یک سیستم نمونه دارای نیروگاه خورشیدی، ارائه شده و برنامه‌ریزی هم‌زمان واحدهای تولید خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی با مشارکت مدیر سیستم توزیع برای افزایش توابع سود، مورد مطالعه قرار گرفته است. در روش پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در تولید واحدهای خورشیدی و قیمت انرژی، ادوات ذخیره انرژی به گونه‌ای تعیین مکان و اندازه شدند که ضمن استفاده حداکثری از منابع خورشیدی، با کنترل، شارژ و دشارژ باتری‌ها سعی در خرید انرژی از این واحدها شده است.

در این مقاله، بالابردن قابلیت شبکه با بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی مسأله اصلی بوده که با قراردادن دو پتل خورشیدی و جایابی دو باتری در شبکه توزیع ۶۹ باس مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۲- اهمیت جایابی ذخیره‌ساز در کنار منابع تجدیدپذیر

شبکه هوشمند می‌تواند به عنوان پاسخی مناسب به مسایل اقتصادی، اجتماعی و زیست‌محیطی تلقی شود. با حرکت شبکه‌های هوشمند به سوی اجرایی‌شدن، مطالعه طراحی سیستم توزیع در محیط جدید امری ضروری است [۱۹]. از این رو جایابی واحدهای تولید توان خورشیدی همراه با ذخیره‌سازهای انرژی در سیستم توزیع فعال از جمله مسایل مهم در شبکه توزیع به حساب می‌آیند. با نفوذ هرچه بیشتر این واحدها در شبکه قدرت، ضرورت این مسأله بیشتر احساس خواهد شد [۲۰]. اتصال تصادفی و بی‌برنامه این واحدهای تولید پراکنده به شبکه توزیع می‌تواند تأثیرات نامطلوبی بر تلفات سیستم، قابلیت اطمینان و پروفیل ولتاژ داشته باشد. به دلیل داشتن ماهیت غیر قطعی در تولید توان پتل‌های خورشیدی، در مدل‌سازی توان خروجی این واحدها عواملی تصادفی از جمله شدت تابش خورشید در طول روز و عمل‌نکردن باتری‌ها مطرح می‌شود که باید در مدل‌سازی، آنها در نظر گرفته شوند [۲۱] و [۲۲].

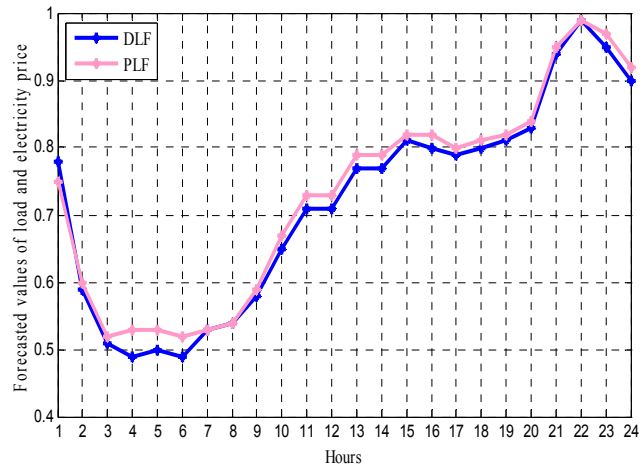
با توجه به این که میزان توان مصرفی مشترکان سیستم توزیع و تعیین نرخ برق از سوی بازار برق در هر بازه زمانی در حال تغییر است، بنابراین باید بار شبکه و قیمت برق مربوط به آن برای حل مسأله نیز مدل‌سازی شود.

استفاده از ادوات ذخیره انرژی و جایابی بهینه آنها می‌تواند تا حدود زیادی عدم قطعیت‌های مربوط به این منابع را کاهش دهد [۲۳] و [۲۴]. همچنین وجود منابع ذخیره انرژی در شبکه‌های هوشمند می‌تواند به کاهش هزینه و نیز تقویت شبکه کمک نماید [۲۵]. در این مقاله یک

Archive of SID

جدول ۱: سناریوهای تولیدشده برای شاخص‌های بار و قیمت.

سناریو	مقدار شاخص بار در هر سناریو	مقدار شاخص قیمت در هر سناریو	$\pi_s$
S1	$\mu_D - 1.5\sigma_D$	$\mu_p - 1.5\sigma_p$	۰٫۰۲
S2	$\mu_D$	$\mu_p - 1.5\sigma_p$	۰٫۰۶
S3	$\mu_D + 1.5\sigma_D$	$\mu_p - 1.5\sigma_p$	۰٫۰۲
S4	$\mu_D - 1.5\sigma_D$	$\mu_p$	۰٫۱۶
S5	$\mu_D$	$\mu_p$	۰٫۴۸
S6	$\mu_D + 1.5\sigma_D$	$\mu_p$	۰٫۱۶
S7	$\mu_D - 1.5\sigma_D$	$\mu_p + 1.5\sigma_p$	۰٫۰۲
S8	$\mu_D$	$\mu_p + 1.5\sigma_p$	۰٫۰۶
S9	$\mu_D + 1.5\sigma_D$	$\mu_p + 1.5\sigma_p$	۰٫۰۲



شکل ۱: منحنی پیش‌فرض سطح قیمت برق و بار.

$$E_{h+1} = E_h + (\eta^c \times P_h^c - \frac{P_h^{disc}}{\eta^{disc}}) \quad (8)$$

در (۸)،  $E_h$  انرژی باتری در ساعت  $h$ ،  $\eta^c$  و  $\eta^{disc}$  به ترتیب راندمان شارژ و دشارژ باتری و همچنین  $P_h^c$  و  $P_h^{disc}$  به ترتیب توان شارژ و دشارژ باتری می‌باشند [۲۹].

۳-۴ مدل‌سازی مسأله جایابی

ماکسیم‌کردن سود حاصل از کاهش تلفات توان اکتیو شبکه توزیع، سود به دست آمده از کاهش هزینه تأمین توان از طریق شبکه بالادست، سود به دست آمده از دشارژ باتری و هزینه سرمایه‌گذاری به عنوان تابع سود در نظر گرفته می‌شوند. در ادامه به مدل‌سازی توابع هدف ذکرشده خواهیم پرداخت.

۳-۴-۱ هزینه سرمایه‌گذاری منبع ذخیره انرژی

هزینه سرمایه‌گذاری برای هر باتری با استفاده از (۹) محاسبه می‌شود

$$C_{total}^{investment} = \sum_{t=1}^T \sum_{i=1}^{N_i} \sum_{b=1}^{N_b} C_{i,max}^b \times IC_b \times (\frac{1+InfR}{1+IntR})^t \quad (9)$$

در (۹)،  $IC$  قیمت سرمایه‌گذاری برای هر باتری،  $IntR$  و  $InfR$  به ترتیب میزان نرخ بهره و تورم،  $C$  مقدار ظرفیت باتری و اندیس‌های  $i$ ،  $b$  و  $t$  به ترتیب نشان‌دهنده شماره باتری، شماره باس و سال می‌باشند.

۳-۴-۲ سود حاصل از برنامه‌های دشارژ باتری

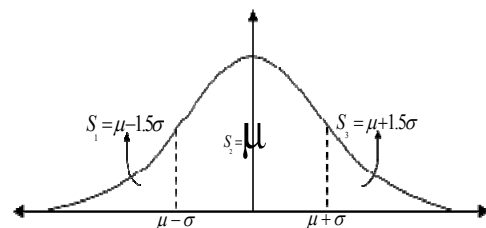
قابلیت ذخیره‌سازی انرژی، سیستم توزیع را قادر می‌سازد تا در پیک بار، بخشی از توان شبکه را با قیمت ارزان‌تر نسبت به شبکه بالادست تأمین کند و هزینه را برای مدیر سیستم کاهش دهد. سود حاصل از فناوری تزریق توان باتری به شبکه از روابط زیر محاسبه خواهد شد

$$C_{Total}^{discharge} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} (\frac{\rho_{t,h}^{grid}}{\mu_{conv}} + c_d) \times P_{i,t,h}^b \times \tau_{t,h} \times (\frac{1+InfR}{1+IntR})^t \quad (10)$$

$$R_{Total}^{discharge} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_i} \rho_{t,h} \times P_{i,t,h}^b \times \tau_{t,h} \times (\frac{1+InfR}{1+IntR})^t \quad (11)$$

$$B_{Total}^{discharge} = R_{Total}^{discharge} - C_{Total}^{discharge} \quad (12)$$

در (۱۰) تا (۱۲)،  $\rho_{t,h}^{grid}$  قیمت خرید برق از شبکه بالادستی،  $\rho_{t,h}$  قیمت برق تحویلی به مصرف‌کننده،  $\mu_{conv}$  راندمان تبدیل،  $c_d$  نرخ خرابی



شکل ۲: تابع احتمال توزیع برای DLF و PLF.

در (۵)،  $\pi_D$  و  $\pi_P$  به ترتیب احتمال شاخص سطح تقاضای بار و شاخص سطح قیمت هستند. تعداد کل سناریوها از ضرب تعداد حالات بار و قیمت به دست می‌آید که در اینجا ۹ سناریو طبق جدول ۱ خواهند بود.

۳-۲ مدل‌سازی توان خروجی پنل خورشیدی

توان خروجی پنل خورشیدی به شدت روشنایی خورشید وابسته است. با استفاده از اطلاعات آب و هوایی پیشین یک ناحیه، می‌توان شدت روشنایی خورشید را برای طول روز به دست آورد. تغییرات شدت تابش آفتاب برای روز نیز با استفاده از تابع چگالی احتمال به صورت (۶) تعیین می‌شود [۲۸]

$$S_h = \mu_h + \lambda_h \times \sigma_h \quad (6)$$

که  $\lambda$  متغیر تصادفی است و با استفاده از تابع توزیع بتا، ویبول و یا نرمال با مقدار متوسط صفر و انحراف معیار یک برای هر سطح تقاضا تولید می‌شود. البته تابع توزیع بتا در موضوع اخیر دارای دقت بیشتری است.  $\mu$  و  $\sigma$  به ترتیب مقادیر پیش‌بینی شده از شدت تابش آفتاب و انحراف معیار آنها می‌باشند.

رابطه بین شدت روشنایی و توان خروجی پنل خورشیدی به صورت (۷) می‌باشد

$$P_s = \begin{cases} P_{s-n} & , S_n < S \\ P_{s-n} \frac{S}{S_n} & , 0 \leq S \leq S_n \end{cases} \quad (7)$$

در (۷)،  $P_{s-n}$  توان نامی پنل خورشیدی،  $S$  شدت روشنایی و  $S_n$  شدت روشنایی نامی می‌باشند.

۳-۳ مدل‌سازی باتری

میزان سطح شارژ باتری در هر ساعت نسبت به ساعت قبل توسط (۸) به دست می‌آید که به راندمان شارژ و دشارژ باتری وابسته است

## Archive of SID

$$Q_{i,t,h}^{grid} - Q_{i,t,h}^b - V_{i,t,h} \sum Y_{ij} V_{j,t,h} \times \sin(\delta_{i,t,h} - \delta_{j,t,h} - \theta_{ij}) = 0 \quad (20)$$

که  $P^{solar}$  و  $P^b$  به ترتیب نشان‌دهنده توان باتری و واحد تولید توان خورشیدی می‌باشند.  $V$  دامنه ولتاژ در باس  $i$  و  $am$  و  $Y_{ij}$  ماتریس ادمیتانس المان‌های بین باس  $i$  و  $j$  می‌باشد.  $\delta$  زاویه ولتاژ و  $\theta$  فاز ماتریس ادمیتانس است.

– حدود حرارتی فیدرها و باس‌ها

$$I_{i,t,h} \leq I_{max} \quad (21)$$

$$S_{i,t,h}^{grid} \leq S_{max}^{grid} \quad (22)$$

– حدود دامنه ولتاژ در هر باس

$$V_{min} \leq V_{i,t,h} \leq V_{max} \quad (23)$$

– حد بهره‌برداری از واحد تولید توان خورشیدی

$$P_{i,t,h}^{solar} \leq P_{i,max}^{solar} \quad (24)$$

– حد بهره‌برداری از باتری

باتری استفاده‌شده در مسأله مدیریت انرژی نمی‌تواند به صورت دلخواه شارژ یا دشارژ شود. روابط زیر نرخ شارژ- دشارژ باتری را بیان می‌کنند

$$0 \leq P_h^c \leq P_h^{c,max} \quad (25)$$

$$0 \leq P_h^{disc} \leq P_h^{disc,max} \quad (26)$$

$$E^{min} \leq E_h \leq E^{max} \quad (27)$$

– تعادل توان

$$P_h^{Grid} + P_h^{PV} + P_h^{disc} \cdot b_h^{disc} - P_h^c \cdot b_h^c = P_h^{Demand} \quad (28)$$

### ۶-۳ الگوریتم پیشنهادی برای حل مسأله

جایابی تولیدات پراکنده، مسایلی با مقیاس بزرگ و قیود مختلف می‌باشند که استفاده از روش‌های جستجوی جامع برای حل آنها زمان‌بر است. از این رو به منظور حل این نوع مسایل از روش‌های هوشمند استفاده می‌شود. عدم قطعیت‌های بار و قیمت برق معین نبوده و خود یک مسأله بهینه‌سازی می‌باشد. بنابراین مسأله جایابی منابع تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی پیچیده‌تر است که به کارگیری روش‌های هوشمند برای حل آن ضروری‌تر می‌باشد. از این رو، مسأله جایابی این واحدها توسط الگوریتم ژنتیک چندهدفه که یکی از روش‌های هوشمند حل مسایل بهینه‌سازی است، حل می‌شود.

کدگذاری متغیرهای تصمیم در الگوریتم ژنتیک به ارائه یک شبیه‌سازی و جایگذاری مناسب برای کلیه جواب‌های ممکن می‌پردازد. اهمیت این مرحله به این دلیل است که نحوه ادامه کار به این مرحله بستگی دارد. در واقع در این مرحله رشته‌های کروموزومی یا همان رشته‌های بیتی ممکن برای نشان‌دادن مکان و ظرفیت باتری ساخته می‌شود. به منظور حل مسأله بهینه‌سازی مکان باتری‌ها، هر کروموزوم از ۱۰ ژن به عنوان باس‌های کاندیدا، تشکیل شده است. هر ژن بیانگر حالت قرارگیری باتری‌ها در باس‌های کاندیدا می‌باشد و می‌تواند مقادیر صفر یا یک را به خود اختصاص دهد. به عنوان مثال شکل ۳ بیانگر نحوه قرارگیری ژن‌ها در هر کروموزوم است.

به منظور حل توابع هدف، هر کروموزوم از چندین زیرکروموزوم تشکیل می‌شود. تعداد زیرکروموزوم‌ها برابر با تعداد باتری‌ها برای نصب

باتری،  $\tau$  طول بازه شارژ یا دشارژ،  $R$  درآمد حاصل،  $C$  هزینه از دست رفته و  $B$  نشان‌دهنده سود کل می‌باشد.

### ۳-۴-۳ سود حاصل از کاهش خرید توان از شبکه بالادست

با نفوذ ذخیره‌سازهای انرژی در سیستم توزیع می‌توان میزان تأمین توان از شبکه بالادست را کاهش داد. در حقیقت ذخیره‌سازها هزینه‌های انرژی خریداری‌شده را کاهش می‌دهند و در نتیجه میزان سود برای مدیر سیستم توزیع افزایش می‌یابد

$$C_{total}^{load} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} (P_{t,h,pu}^{grid} \times \rho_{t,h}^{grid} \times \tau_{t,h}) \times \left( \frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (13)$$

$$R_{total}^{load} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} (P_{t,h}^{Load} \times \rho_{t,h} \times \tau_{t,h}^{load}) \times \left( \frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (14)$$

$$B_{Total}^{load} = R_{Total}^{load} - C_{Total}^{load} \quad (15)$$

### ۳-۴-۴ سود حاصل از کاهش تلفات توان اکتیو

تزیق توان به شبکه توسط واحدهای تولید توان خورشیدی و همچنین تزیق انرژی ذخیره‌شده در باتری‌ها، تلفات را تا حدی کاهش و میزان سود حاصل از فروش برق به مشتری‌ها را برای مدیر سیستم توزیع افزایش می‌دهد

$$B_{Total}^{loss} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} [(P_{loss,t,h}^{without-PV\&ESS} - P_{loss,t,h}^{with-PV\&ESS}) \times \rho_{t,h} \times \tau_{t,h}] \times \left( \frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (16)$$

در (۱۶)،  $P_{loss,t,h}^{without-PV\&ESS}$  و  $P_{loss,t,h}^{with-PV\&ESS}$  به ترتیب تلفات اکتیو بدون حضور سیستم فتوولتائیک و ذخیره‌ساز و تلفات اکتیو با حضور سیستم فتوولتائیک و ذخیره‌ساز می‌باشند.

### ۳-۴-۵ سود حاصل از بهره‌برداری پنل خورشیدی

با صرف نظر کردن از هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری واحدهای خورشیدی، سود حاصل از بهره‌برداری این واحدها مطابق با روابط زیر محاسبه می‌شوند [۳۰]

$$B_{total}^{solar} = \sum_{t=1}^T \sum_{h=1}^{N_h} \sum_{i=1}^{N_{pv}} \sum_{solar=1}^{N_{solar}} (P_{i,t,h}^{solar} \times \rho_{t,h} \times \tau_{t,h}) \times \left( \frac{1+InfR}{1+IntR} \right)^t \quad (17)$$

در (۱۷)،  $\rho$  و  $\tau$  به ترتیب قیمت و مدت زمان برق فروخته‌شده به مشتری‌ها در هر سطح تقاضا می‌باشد. در نتیجه تابع هدف برای مسأله بهینه‌سازی، طبق (۱۸) تعریف می‌شود

$$DSM = \max \{ B_{total}^{discharge} + B_{total}^{load} + B_{total}^{loss} + B_{total}^{solar} - C_{total}^{inv} \} \quad (18)$$

### ۳-۵-۵ روابط پخش بار و قیود مسأله

در این مقاله از روش نیوتن-رافسون برای حل روابط مربوط به پخش بار استفاده شده است. برای هر حالت از متغیرهای ورودی در هر سطح تقاضا و در هر سال از دوره برنامه‌ریزی، روابط پخش بار و قیود مسأله جایابی محاسبه می‌شوند

$$P_{i,t,h}^{grid} \pm P_{i,t,h}^b + P_{i,t,h}^{solar} - P_{i,t,h}^D - V_{i,t,h} \sum Y_{ij} V_{j,t,h} \times \cos(\delta_{i,t,h} - \delta_{j,t,h} - \theta_{ij}) = 0 \quad (19)$$

Archive of SID

جدول ۲: اطلاعات مورد نیاز در مطالعه.

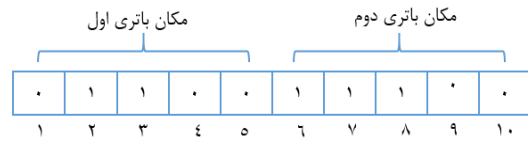
پارامتر	مقادیر	واحد	توضیحات
$\alpha$	۳	درصد	نرخ رشد بار
$V_{min}$	۰٫۹	پریونیت	مینیمم مقدار ولتاژ
$V_{max}$	۱٫۱	پریونیت	ماکسیمم مقدار ولتاژ
$InfR$	۴	درصد	نرخ تورم
$IntR$	۵	درصد	نرخ سود
$\sigma_{t,h}$	$0.1 \times \mu_{t,h}$		انحراف معیار برای هر سطح شدت تابش

جدول ۳: اطلاعات بازار برق.

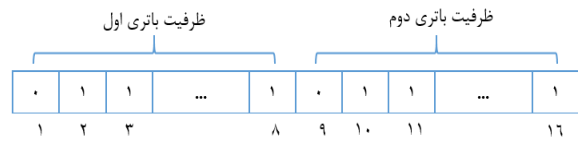
پارامتر	مقادیر	واحد	توضیحات
$\rho_{t,h}$	۷۵	دلار بر مگاوات ساعت	قیمت پایه برق فروخته شده به مشتری‌ها
$\rho_{t,h}^{grid}$	۶۵	دلار بر مگاوات ساعت	قیمت پایه برق خریداری شده از شبکه بالادست
$C_d$	۰٫۰۰۱	دلار بر مگاوات ساعت	هزینه استهلاک باتری‌ها
$IC_b$	۱۰۰۰	دلار بر کیلووات ساعت	هزینه سرمایه‌گذاری برای باتری‌ها

جدول ۴: مشخصات شبکه مورد مطالعه.

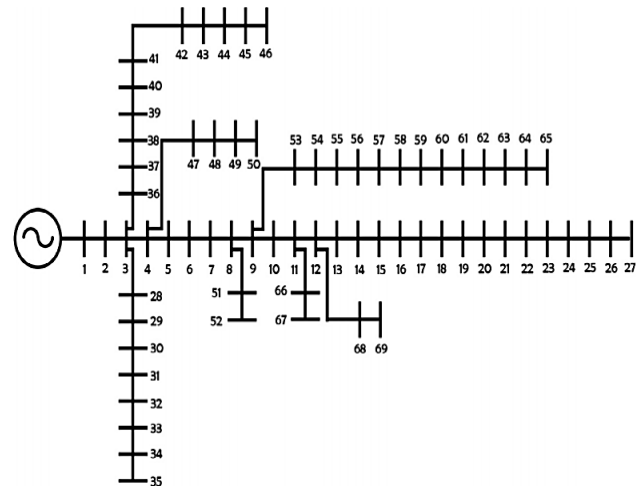
اطلاعات خطوط			مشخصات باس‌ها		
از باس	به باس	مقاومت	راکتانس	باس	بار راکتیو
۱	۲	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۱۲	۱	۰
۲	۳	۰٫۰۰۰۵	۰٫۰۰۱۲	۲	۰
۳	۴	۰٫۰۰۱۵	۰٫۰۰۳۶	۳	۰
۴	۵	۰٫۰۲۵۱	۰٫۰۲۹۴	۴	۰
۵	۶	۰٫۳۶۶	۰٫۱۸۶۴	۵	۰
۶	۷	۰٫۳۸۱۱	۰٫۱۹۴۱	۶	۲٫۶
۷	۸	۰٫۰۹۲۲	۰٫۰۴۷	۷	۴۰٫۴
۸	۹	۰٫۰۴۳۹	۰٫۰۲۵۱	۸	۷۵
۹	۱۰	۰٫۰۸۱۹	۰٫۰۲۷۰۷	۹	۳۰
۱۰	۱۱	۰٫۱۸۷۲	۰٫۰۶۱۹	۱۰	۲۸
۱۱	۱۲	۰٫۷۱۱۴	۰٫۲۳۵۱	۱۱	۱۴۵
۱۲	۱۳	۱٫۰۳	۰٫۳۴	۱۲	۱۴۵
۱۳	۱۴	۱٫۰۴۴	۰٫۳۴۵	۱۳	۸
۱۴	۱۵	۱٫۰۵۸	۰٫۳۴۹۶	۱۴	۸
۱۵	۱۶	۰٫۱۹۶۶	۰٫۰۶۵	۱۵	۰
۱۶	۱۷	۰٫۳۷۴۴	۰٫۱۲۳۸	۱۶	۴۵٫۵
۱۷	۱۸	۰٫۰۰۴۷	۰٫۰۰۱۶	۱۷	۶۰
۱۸	۱۹	۰٫۳۲۷۶	۰٫۱۰۸۳	۱۸	۶۰
۱۹	۲۰	۰٫۲۱۰۶	۰٫۰۶۹۶	۱۹	۰
۲۰	۲۱	۰٫۳۴۱۶	۰٫۱۱۲۹	۲۰	۱
۲۱	۲۲	۰٫۰۰۱۴	۰٫۰۰۴۶	۲۱	۱۱۴
۲۲	۲۳	۰٫۱۵۹۱	۰٫۰۵۲۶	۲۲	۵٫۳
۲۳	۲۴	۰٫۳۴۶۳	۰٫۱۱۴۵	۲۳	۰
۲۴	۲۵	۰٫۷۴۸۸	۰٫۲۴۷۵	۲۴	۲۸
۲۵	۲۶	۰٫۳۰۸۹	۰٫۱۰۲۱	۲۵	۰
۲۶	۲۷	۰٫۱۷۳۲	۰٫۰۵۷۲	۲۶	۱۴
۲۷	۲۸	۰٫۰۰۴۴	۰٫۰۱۰۸	۲۷	۱۴
۲۸	۲۹	۰٫۰۶۴	۰٫۱۵۶۵	۲۸	۲۶
۲۹	۳۰	۰٫۳۹۷۸	۰٫۱۳۱۵	۲۹	۲۶



شکل ۳: ساختار کروموزوم‌های مسأله بهینه‌سازی.



شکل ۴: ساختار زیر کروموزوم‌های مسأله بهینه‌سازی.



شکل ۵: شبکه مورد مطالعه ۶۹‌باسه.

می‌باشد و عدد متناظر با هر زیرکروموزوم ظرفیت باتری‌ها را نشان می‌دهد. به عنوان مثال شکل ۴ بیانگر ظرفیت باتری با ظرفیت ۱۷۰۰ کیلووات ساعت است که در مکان‌های مشخص شده قرار می‌گیرند. باید اشاره نمود که بیشینه عددی که هر ژن از زیرکروموزوم می‌تواند به خود گیرد، برابر با بیشینه ظرفیت باتری در مکان متناظر با آن ژن می‌باشد.

۴- نتایج شبیه‌سازی

به منظور بررسی و ارزیابی کارایی روش پیشنهادی، برنامه‌ریزی بر روی شبکه توزیع ۶۹‌باسه مطابق شکل ۵ صورت گرفته است. مشخصات شبکه و همچنین اطلاعات بازار برق و داده‌های فرضی در جداول ۲ تا ۴ آورده شده است. شبکه مورد آزمایش دارای یک باس مرجع با ولتاژ ۱۲٫۶۶ کیلوولت و ۶۸ باس بار است که خطوط توزیع توسط سوئیچ‌ها از هم جدا شده‌اند. تمامی نقطه بارها به عنوان باس کاندیدا برای نصب باتری‌ها انتخاب می‌شوند. پنل‌های خورشیدی در باس‌های ۲۷ و ۶۵ به ترتیب با ظرفیت‌های ۳۰۰ و ۵۰۰ کیلووات قرار گرفته و تعیین مکان و اندازه دو باتری با ظرفیت مجاز ۱۰۰۰ تا ۳۰۰۰ کیلووات ساعت انجام می‌شود. همچنین برنامه‌ریزی برای ۲۰ سال و هر سال از دوره برنامه‌ریزی به ۲۴ سطح تقاضا تقسیم می‌شود که مدت زمان برای هر سطح تقاضا ۳۶۵ ساعت می‌باشد.

بعد از حل مسأله بهینه‌سازی، مکان بهینه برای باتری‌ها به ترتیب باس‌های ۵ و ۱۷ می‌باشد. ظرفیت بهینه نیز برای هر یک از آنها ۱۰۰۰ کیلووات ساعت به دست می‌آید. با در نظر گرفتن این مسایل مقادیر توابع سود نیز به صورت جدول ۵ به دست آمده است. با مقایسه مقادیر سود با و بدون حضور باتری‌ها در شبکه به این نتیجه خواهیم رسید که سود حاصل از کاهش وابستگی به شبکه بالادست، سود حاصل از دشارژ باتری‌ها، سود



Archive of SID

جدول ۵: مقایسه مقادیر سود (بر حسب دلار).

	بدون ESS	با ESS
سود حاصل از کاهش وابستگی به شبکه بالادست	$1,543 \times 10^4$	$2,3018 \times 10^4$
سود حاصل از دشارژ باتری‌ها	-	$4,2845 \times 10^3$
سود حاصل از کاهش تلفات	۴۹,۵۸	۵۴,۳۰۴۷
سود حاصل از توان تولیدی پنل خورشیدی	$2,1577 \times 10^4$	$2,1577 \times 10^4$
کل سود	$3,7056 \times 10^4$	$4,6933 \times 10^4$

جدول ۶: مقایسه تلفات توان سیستم (بر حسب مگاوات).

	بدون حضور باتری		با حضور باتری	
	PV با	بدون PV	PV با	بدون PV
کم‌باری	۰,۶۶	۰,۵۱	۰,۴۳	۰,۷۷
پرباری	۰,۹۸	۱,۲۸	۰,۸۲	۰,۸۳
کل	۱,۶۴	۱,۷۹	۱,۲۵	۱,۶

همان‌طور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود تلفات کل شبکه با حضور هر یک از دو عامل PV و ذخیره‌ساز هم در ساعات کم‌باری و هم در ساعات پرباری نسبت به حالتی که هیچ کدام در شبکه نباشند کاهش پیدا کرده است. همچنین مشاهده می‌شود که تأثیر حضور PV در کاهش تلفات شبکه نسبت به تأثیر حضور فقط باتری، تقریباً یکسان بوده و در نتیجه اگر ترتیبی اتخاذ شود که هر دو را در شبکه داشته باشیم به مراتب تأثیر بیشتری در کاهش تلفات شبکه خواهیم داشت.

همان‌طور که در مدل‌سازی توابع هدف مسأله بهینه‌سازی اشاره شد، یکی از عوامل‌های افزایش سود برای مدیر سیستم توزیع در حضور تولیدات پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی، کاهش وابستگی به شبکه بالادست است. یعنی از میزان توان خریداری‌شده توسط سیستم توزیع، از مرجع تولید توان، با حضور تولیدات پراکنده و باتری‌ها با شارژ-دشارژ بهینه کاسته می‌شود. قسمتی از تقاضای بار شبکه در ساعات پیک توسط باتری‌ها تأمین می‌شود. همچنین تولید توان خورشیدی نیز با کاهش تلفات شبکه توزیع، باعث کاهش میزان توان تقاضاشده می‌شود. شکل ۶ میزان توان خریداری‌شده از شبکه بالادست را برای کل دوره برنامه‌ریزی با حضور و بدون حضور واحدهای تولید توان خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی نشان می‌دهد. همچنین در این شکل قاعده پیک‌زدایی (کاهش تقاضای بار در ساعات پیک) به وضوح نمایان است.

در شبکه توزیع، ولتاژ باس‌ها نباید از مقدار ماکسیمم، بیشتر و کمتر از مقدار مینیمم خود باشند. در این مطالعه محدوده مجاز برای ولتاژ باس‌ها، بین ۰,۹ تا ۱,۱ پریونیت در نظر گرفته شده است. شکل ۷ منحنی ولتاژ را در حضور و عدم حضور واحدهای تولید توان خورشیدی و باتری‌ها برای ساعات پیک بار مقایسه می‌کند. با توجه به حضور پنل‌های خورشیدی در باس‌های انتهایی شبکه توزیع به کار برده شده و نصب باتری‌ها در باس‌های میانی، تغییرات ولتاژ در آنها بیشتر بوده و بهبود ولتاژ نیز در آنها بهتر می‌باشد.

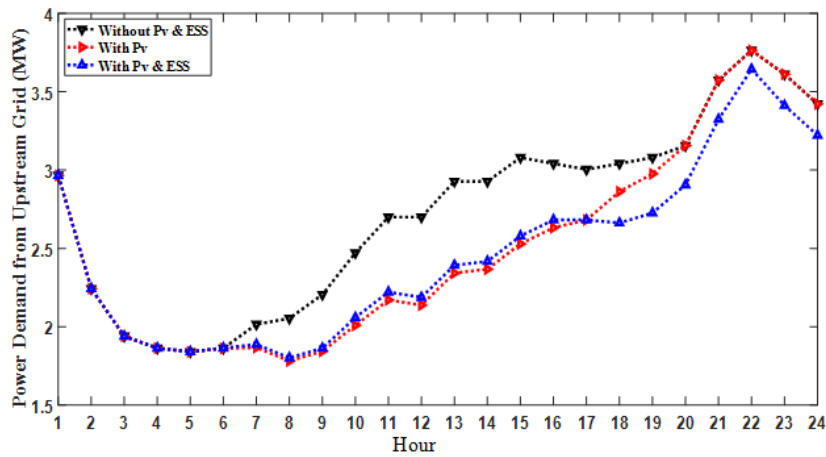
۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله یک روش برنامه‌ریزی چندهدفه برای جایابی ادوات ذخیره انرژی در یک سیستم نمونه دارای نیروگاه خورشیدی ارائه شد و برنامه‌ریزی هم‌زمان واحدهای تولید خورشیدی و ذخیره‌سازهای انرژی با

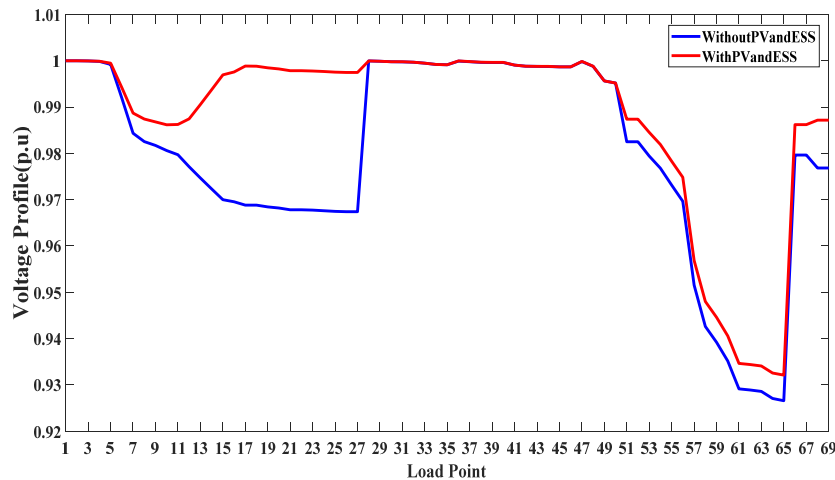
۳۰	۳۱	۰,۰۷۰۲	۰,۰۲۳۲	۳۰	.	.
۳۱	۳۲	۰,۳۵۱	۰,۱۱۶	۳۱	.	.
۳۲	۳۳	۰,۸۳۹	۰,۲۸۱۶	۳۲	.	.
۳۳	۳۴	۱,۷۰۸	۰,۵۶۴۶	۳۳	۱۴	۱۰
۳۴	۳۵	۱,۴۷۴	۰,۴۸۷۳	۳۴	۱۹,۵	۱۴
۳	۳۶	۰,۰۰۴۴	۰,۰۱۰۸	۳۵	۶	۴
۳۶	۳۷	۰,۰۶۴	۰,۱۵۶۵	۳۶	۲۶	۱۸,۵۵
۳۷	۳۸	۰,۱۰۵۳	۰,۱۲۳	۳۷	۲۶	۱۸,۵۵
۳۸	۳۹	۰,۰۳۰۴	۰,۰۳۵۵	۳۸	.	.
۳۹	۴۰	۰,۰۰۱۸	۰,۰۰۲۱	۳۹	۲۴	۱۷
۴۰	۴۱	۰,۷۲۸۳	۰,۸۵۰۹	۴۰	۲۴	۱۷
۴۱	۴۲	۰,۳۱	۰,۳۶۲۳	۴۱	۱,۲	۱
۴۲	۴۳	۰,۰۴۱	۰,۰۴۷۸	۴۲	.	.
۴۳	۴۴	۰,۰۰۹۲	۰,۰۱۱۶	۴۳	۶	۴,۳
۴۴	۴۵	۰,۰۱۰۸۹	۰,۰۱۳۷۳	۴۴	.	.
۴۵	۴۶	۰,۰۰۰۹	۰,۰۰۱۲	۴۵	۳۹,۲	۲۶,۳
۴	۴۷	۰,۰۰۳۴	۰,۰۰۸۴	۴۶	۳۹,۲	۲۶,۳
۴۷	۴۸	۰,۰۸۵۱	۰,۲۰۸۳	۴۷	.	.
۴۸	۴۹	۰,۲۸۹۸	۰,۷۰۹۱	۴۸	۷۹	۵۶,۴
۴۹	۵۰	۰,۰۸۲۲	۰,۲۰۱۱	۴۹	۳۸۴,۷	۲۷۴,۵
۸	۵۱	۰,۰۹۲۸	۰,۰۴۷۳	۵۰	۳۸۴,۷	۲۷۴,۵
۵۱	۵۲	۰,۳۳۱۹	۰,۱۱۱۴	۵۱	۴۰,۵	۲۸,۳
۹	۵۳	۰,۱۷۴	۰,۰۸۸۶	۵۲	۳,۶	۲,۷
۵۳	۵۴	۰,۲۰۳	۰,۱۰۳۴	۵۳	۴,۲۵	۳,۵
۵۴	۵۵	۰,۲۸۴۲	۰,۱۴۴۷	۵۴	۲۶,۴	۱۹
۵۵	۵۶	۰,۲۸۱۳	۰,۱۴۳۳	۵۵	۲۴	۱۷,۲
۵۶	۵۷	۱,۵۹	۰,۵۳۳۷	۵۶	.	.
۵۷	۵۸	۰,۷۸۳۷	۰,۲۶۳	۵۷	.	.
۵۸	۵۹	۰,۳۰۴۲	۰,۱۰۰۶	۵۸	.	.
۵۹	۶۰	۰,۳۸۶۱	۰,۱۱۷۲	۵۹	۱۰۰	۷۲
۶۰	۶۱	۰,۵۰۷۵	۰,۲۵۸۵	۶۰	.	.
۶۱	۶۲	۰,۰۹۷۵	۰,۰۴۹۶	۶۱	۱۲۴۴	۸۸۸
۶۲	۶۳	۰,۱۴۵	۰,۰۷۳۸	۶۲	۳۲	۲۳
۶۳	۶۴	۰,۷۱۰۵	۰,۳۶۱۹	۶۳	.	.
۶۴	۶۵	۱,۰۴۱	۰,۵۳۰۲	۶۴	۲۲۷	۱۶۲
۱۱	۶۶	۰,۲۰۱۲	۰,۰۶۱۱	۶۵	۵۹	۴۲
۶۶	۶۷	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰۱۴	۶۶	۱۸	۱۳
۱۲	۶۸	۰,۷۳۹۴	۰,۲۴۴۴	۶۷	۱۸	۱۳
۶۸	۶۹	۰,۰۰۴۷	۰,۰۰۱۶	۶۸	۲۸	۲۰
				۶۹	۲۸	۲۰

حاصل از کاهش تلفات و در نهایت کل تابع سود به دلیل ذخیره انرژی در ساعات کم‌باری و تزریق آن به شبکه در ساعات پیک بار افزایش پیدا کرده و این نشان از حضور مفید باتری‌ها و پنل‌های خورشیدی با برنامه‌ریزی بهینه در شبکه توزیع می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد یکی از مزایای استفاده از منابع تولید توان خورشیدی و ذخیره‌سازها در شبکه قدرت، کاهش تلفات توان اکتیو می‌باشد. با نصب بهینه این منابع به همراه باتری‌ها در شبکه توزیع، مقدار تلفات توان اکتیو در ساعات پیک و کل دوره برنامه‌ریزی به طور چشم‌گیری کاهش پیدا می‌کند. تأثیر حضور این منابع در کاهش تلفات را می‌توان در جدول ۶ مشاهده کرد.



شکل ۶: تقاضای توان از شبکه بالادست.



شکل ۷: بهبود پروفیل ولتاژ (پیک بار).

- [2] D. Yang and S. Alessandrini, "An ultra-fast way of searching weather analogs for renewable energy forecasting," *Solar Energy*, vol. 185, no. 1, pp. 255-261, Jun. 2019.
- [3] D. Peng and R. Poudineh, "Electricity market design under increasing renewable energy penetration: misalignments observed in the European Union," *Utilities Policy*, vol. 61, Article No.: 100970, Dec. 2019.
- [4] S. Liu and M. Xie, "Modeling the daily generation schedules in under-developed electricity markets with high-share renewables: a case study of Yunnan in China," *Energy*, vol. 201, Article No.: 117677, Jun. 2020.
- [5] J. Sobon, A. Roscoe, and B. Stephen, "Energy storage day-ahead scheduling to reduce grid energy export and increase self-consumption for micro-grid and small power park applications," in *Proc. 52nd Int. Universities Power Engineering Conf., UPEC'17*, 6 pp., Heraklion, Greece, 29 Aug.-1 Sept. 2017.
- [6] S. Wang, *et al.*, "Design and advanced control strategies of a hybrid energy storage system for the grid integration of wind power generations," *IET Renewable Power Generation*, vol. 9, no. 2, pp. 89-98, Mar. 2015.
- [7] W. Jing, C. Hung-Lai, S. Hui, and M. Ling, "Battery-supercapacitor hybrid energy storage system in standalone DC microgrids: a review," *IET Renewable Power Generation*, vol. 11, no. 4, pp. 461-469, May 2017.
- [8] W. Huang and J. Abu-Qahouq, "Distributed battery energy storage system architecture with energy sharing control for charge balancing," in *Proc. IEEE Applied Power Electronics Conf. and Exposition*, pp. 1126-1130, Fort Worth, TX, USA, 16-20 Mar. 2014.
- [9] A. Headley and D. Copp, "Energy storage sizing for grid compatibility of intermittent renewable resources: a California case study," *Energy*, vol. 198, Article No.: 117310, May 2020.
- [10] Z. Yuan, S. He, A. Alizadeh, S. Nojavan, and K. Jermstittiparsert, "Probabilistic scheduling of power-to-gas storage system in renewable energy hub integrated with demand response program," *J. of Energy Storage*, vol. 29, Article No.: 101393, Jun. 2020.

مشارکت مدیر سیستم توزیع برای افزایش توابع سود، مورد مطالعه قرار گرفت. در روش پیشنهادی با توجه به عدم قطعیت‌های موجود در تولید واحدهای خورشیدی و قیمت انرژی، ادوات ذخیره انرژی به گونه‌ای تعیین مکان و اندازه شدند که ضمن استفاده حداکثری از منابع خورشیدی، با کنترل، شارژ و دشارژ باتری‌ها سعی در خرید انرژی از این واحدها شود.

در این مقاله، بالابردن قابلیت شبکه با بهره‌برداری از واحدهای تولید پراکنده و ذخیره‌سازهای انرژی مسئله اصلی بود که با قراردادن دو پتل خورشیدی و جایابی دو باتری در شبکه توزیع ۹۶باسه مورد بررسی قرار گرفت. در این حالات ظرفیت و مکان بهینه باتری‌ها در شبکه توزیع با هزینه‌های نصب مشخص شد. مشاهده گردید که سرمایه‌گذاری در این واحدها علاوه بر این که از لحاظ اقتصادی به صرفه است، برخی از شاخص‌های شبکه را نیز بهبود می‌بخشد. استفاده از واحدهای تولید پراکنده، تلفات و وابستگی به شبکه بالادست را برای سیستم توزیع کاهش داده و ولتاژ باس‌ها را برای برنامه‌ریزی‌های بلندمدت در محدوده مجاز نگه می‌دارد. در کارهای آتی، تأثیر جایابی هم‌زمان منابع تولید پراکنده و ادوات ذخیره‌ساز بر شاخص‌های فنی، اقتصادی و قابلیت اطمینان آنها می‌تواند مورد بررسی قرار گیرد.

## مراجع

- [1] K. Saidi and A. Omri, "The impact of renewable energy on carbon emissions and economic growth in 15 major renewable energy-consuming countries," *Environmental Research*, vol. 186, Article No.: 109567, Jul. 2020.

[۲۷] ا. عطاپور، م. رحیمی و ا. اخباری، "کنترل و مدیریت توان سیستم ترکیبی میکروتوربین- بادی در حالت تغذیه بار مستقل AC"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق، سال ۱۸، شماره ۳، صص. ۱۹۰-۱۷۸، پاییز ۱۳۹۹.

- [28] B. Gu, H. Shen, X. Lei, H. Hu, and X. Liu, "Forecasting and uncertainty analysis of day-ahead photovoltaic power using a novel forecasting method," *Applied Energy*, vol. 299, Article No.: 117291, Oct. 2021.
- [29] S. Aissou, D. Rekioua, N. Mezzai, T. Rekioua, and S. Bacha, "Modeling and control of hybrid photovoltaic wind power system with battery storage," *Energy Conversion and Management*, vol. 89, pp. 615-625, Jan. 2015.
- [30] M. Khodayar, M. Feizi, and A. Vafamehr, "Solar photovoltaic generation: benefits and operation challenges in distribution networks," *The Electricity J.*, vol. 32, no. 4, pp. 50-57, May 2019.

**نوید تقی‌زادگان کلانتری** تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق به ترتیب در سال‌های ۱۳۶۸ و ۱۳۷۳ از دانشگاه‌های تبریز و تهران و در مقطع دکتری مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت در سال ۱۳۸۶ از دانشگاه تبریز به پایان رسانده است و هم‌اکنون دانشیار دانشکده فنی و مهندسی دانشگاه شهید مدنی آذربایجان می‌باشد. نام‌برده قبل از پیوستنش به دانشگاه شهید مدنی آذربایجان در سال‌های ۱۳۷۴ الی ۱۳۹۱ در وزارت نیرو مشغول به کار بوده است. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: قابلیت اطمینان سیستم‌های قدرت، حفاظت سیستم‌های قدرت، ریزش‌بکه‌ها، انرژی‌های نو، مدیریت انرژی، ذخیره‌کننده‌های انرژی.

**یوسف فنونی** تحصیلات خود را در مقطع کارشناسی مهندسی برق گرایش شبکه‌های انتقال و توزیع در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه جامع علمی-کاربردی وزارت نیرو با کسب رتبه دوم و در مقطع کارشناسی ارشد مهندسی برق گرایش سیستم‌های قدرت در سال ۱۳۹۸ از دانشگاه شهید مدنی آذربایجان با کسب رتبه دوم به پایان رسانده است و هم‌اکنون کارشناس فنی شرکت برق منطقه ای آذربایجان می‌باشد. نام‌برده از سال ۱۳۸۹ در شرکت برق منطقه ای آذربایجان در زمینه شبکه‌های انتقال و توزیع و هم‌زمان بعنوان طراح و ناظر تاسیسات الکتریکی در سازمان نظام مهندسی استان آذربایجان شرقی مشغول به فعالیت بوده است. زمینه‌های علمی و تحقیقاتی مورد علاقه نام‌برده شامل موضوعات متنوعی مانند ایده‌های نو در مدیریت شبکه‌های انتقال و توزیع، نیروگاه‌های تولید پراکنده، مدیریت و بهینه‌سازی مصرف برق و هوشمندسازی خانه‌های مسکونی می‌باشد.

**مرتضی آهنگری حساس** در سال ۱۳۹۱ مدرک کارشناسی مهندسی برق و در سال ۱۳۹۴ نیز مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را دریافت نمود. نام‌برده از سال ۱۳۹۶ تحصیلات خود را در مقطع دکتری تخصصی رشته مهندسی برق در دانشگاه شهید مدنی آذربایجان آغاز و اینک در همان جا مشغول تحقیق و پژوهش‌های علمی می‌باشد. عضویت در بنیاد ملی نخبگان، همکاری با گروه مهندسی برق دانشگاه‌های شهید مدنی آذربایجان و آزاد در زمینه‌های آموزشی و پژوهشی، عضویت در هیأت مدیره انجمن انرژی ایران، انتشار و ارائه بیش از بیست مقاله علمی در ژورنال‌ها و کنفرانس‌های معتبر بین‌المللی از سوابق نام‌برده می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان شامل موضوعات متنوعی همچون زنجیره انرژی الکتریکی و آب، منابع انرژی تجدیدپذیر، نیروگاه‌های ترکیبی، ریزسیستم‌ها، تولیدات پراکنده و مدیریت انرژی می‌باشد.

- [11] P. Chaudhary and M. Rizwan, "Voltage regulation mitigation techniques in distribution system with high PV penetration: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pt. 3, pp. 3279-3287, Feb. 2018.
- [12] K. Baker, G. Hug, and X. Li, "Energy storage sizing taking into account forecast uncertainties and receding horizon operation," *IEEE Trans. on Sustainable Energy*, vol. 8, no. 1, pp. 331-340, Aug. 2016.
- [13] 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, 2015.
- [14] K. Dvijotham, M. Chertkov, and S. Backhaus, "Storage sizing and placement through operational and uncertainty-aware simulations," in *Proc. 47th Hawaii Int. Conf. on System Sciences*, pp. 2408-2416, Waikoloa, HI, USA, 6-9 Jan. 2014.
- [15] R. Kolluri, et al., "Siting and sizing distributed storage for microgrid applications," in *Proc. IEEE Int. Conf. on Smart Grid Communications*, pp. 128-133, Dresden, Germany, 23-27 Oct. 2018.
- [16] A. Rigas, G. Messinis, and N. Hatzigiorgiou, "Application of topology identification on optimal BESS sizing in distribution systems," in *Proc. IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conf. Europe*, 6 pp., Sarajevo, Bosnia and Herzegovina, 21-25 Oct. 2018.
- [17] H. Zhao, et al., "Optimal siting and sizing of energy storage system for power systems with large-scale wind power integration," in *Proc. IEEE Eindhoven PowerTech*, 6 pp., Eindhoven, Netherlands, 29 Jun.-2 Jul. 2015.
- [18] L. Flatley, R. MacKay, and M. Waterson, "Optimal strategies for operating energy storage in an arbitrage or smoothing market," *J. of Dynamics and Games*, vol. 3, no. 4, pp. 371-398, Oct. 2016.
- [19] D. Zoltan and R. Martyr, "Real option valuation of a decremental regulation service provided by electricity storage," *Philosophical Trans. of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, vol. 375, no. 2100, 14 pp., Aug. 2017.
- [20] M. Hartner and A. Permoser, "Through the valley: the impact of PV penetration levels on price volatility and resulting revenues for storage plants," *Renewable Energy*, vol. 115, pp. 1184-1195, Jan. 2018.
- [21] J. Dong, et al., "Novel stochastic methods to predict short-term solar radiation and photovoltaic power," *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 333-346, Jan. 2020.
- [22] Y. Tang, J. Cheng, Q. Duan, C. Wing-Lee, and J. Zhong, "Evaluating the variability of photovoltaics: a new stochastic method to generate site-specific synthetic solar data and applications to system studies," *Renewable Energy*, vol. 133, pp. 1099-1107, Apr. 2019.
- [23] E. Oh and S. Son, "Theoretical energy storage system sizing method and performance analysis for wind power forecast uncertainty management," *Renewable Energy*, vol. 155, pp. 1060-1069, Aug. 2020.
- [24] L. Luo, S. Abdulkareem, A. Rezvani, M. Miveh, S. Samad, N. Aljojo, and M. Pazhooesh, "Optimal scheduling of a renewable based microgrid considering photovoltaic system and battery energy storage under uncertainty," *J. of Energy Storage*, vol. 28, Article No.: 101306, Apr. 2020.
- [25] S. Bozorgavari, J. Aghaei, S. Pirouzi, A. Nikoobakht, H. Farahmand, and M. Korpas, "Robust planning of distributed battery energy storage systems in flexible smart distribution networks: a comprehensive study," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 123, Article No.: 109739, May 2020.

[۲۶] م. خواجه‌رضایی، غ. یوسفی، م. ا. لطیفی و ا. شایسته، "محاسبه هزینه قطع برق و نحوه بهینه تخصیص خاموشی به مشترکین"، نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران، الف- مهندسی برق، سال ۱۸، شماره ۳، صص. ۱۷۷-۱۶۹، پاییز ۱۳۹۹.