

# تعیین هم‌زمان ظرفیت، تکنولوژی و مکان‌های بهینه جهت نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در ریزشبکه در حضور بارهای پاسخگو

میلاذ بی‌آزار قادیکلایی<sup>۱</sup>، کارشناسی ارشد؛ مجید شهابی<sup>۲</sup>، استادیار؛ تقی بارفورشی<sup>۳</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، Biazarmilad@stu.nit.ac.ir

۲- گروه پژوهشی پست‌های فشارقوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، Shahabi.m@nit.ac.ir

۳- گروه پژوهشی پست‌های فشارقوی، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، بابل، ایران، Barforoshi@nit.ac.ir

**چکیده:** در این مقاله، مدلی خطی جهت تعیین ظرفیت و مکان‌یابی بهینه هم‌زمان دو تکنولوژی مختلف از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی با منظور نمودن عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع انرژی تجدیدپذیر و بروز عیب در خط ارتباطی ریزشبکه و شبکه بالادست ارائه شده است. این درحالی است که اثر مشارکت بارهای پاسخگو در تعیین ظرفیت و مکان‌های بهینه جهت نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز بررسی شده است. روش پیشنهادی به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریوهای عدم قطعیت معرفی و در یک ریزشبکه ۳۳ شینه پیاده شده است. برای مدل‌سازی سناریوهای عدم قطعیت تولید مولد بادی و بروز عیب در خط ارتباطی بین ریزشبکه و شبکه بالادست به ترتیب از تئوری سری‌های زمانی و شبیه‌سازی مونت‌کارلو استفاده شده است. مدل پیشنهادی در نرم افزار GAMS به صورت یک مسئله برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح پیاده‌سازی شده است. مطالعات موردی متعدد، کارایی مدل پیشنهادی را نشان داده و تأیید می‌کنند.

**واژه‌های کلیدی:** مکان‌یابی، ذخیره‌ساز، تعیین ظرفیت، ریزشبکه.

## Optimal Size, Type and locations of Energy Storage Systems in Microgrid with The Presence of Responsive Loads

M.Biazar<sup>1</sup>, MSc; M.Shahabi<sup>2</sup>, Assistant professor; Taghi Barforoshi<sup>3</sup>, Assistant professor

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: Biazarmilad@stu.nit.ac.ir

2- HV Substations Research Group, Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: Shahabi.m@nit.ac.ir

3- HV Substations Research Group, Department of Electrical and Computer Engineering, Babol Noshirvani University of Technology, Babol, Iran, Email: Barforoshi@nit.ac.ir

**Abstract:** In this paper, a linear model for optimal sizing and allocating two types of energy storage systems in a microgrid is presented. Uncertainties such as, renewable resources generation and microgrid islanding capability are carried out in a stochastic framework. Also, the effects of considering responsive demands on optimum size and allocation of storages in a 33-bus network are investigated. The proposed method is modeled based on two stage stochastic programming problem. To handle uncertainties of renewable resource generation and upstream line failures, time series model and Monte Carlo simulation are used, respectively. The proposed model is implemented as a mixed integer linear programming (MILP) in GAMS software and is solved with CPLEX solver. Effectiveness of the proposed model is examined by various case studies.

**Keywords:** Allocation, storage, sizing, microgrid.

تاریخ ارسال مقاله: ۱۳۹۶/۰۱/۲۱

تاریخ اصلاح مقاله: ۱۳۹۶/۰۷/۰۵

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۸/۲۶

نام نویسنده مسئول: مجید شهابی

نشانی نویسنده مسئول: ایران- بابل- خیابان شریعتی- دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل- دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر- گروه پژوهشی پست‌های فشارقوی.

## ۱- مقدمه

اجتماعی تعیین شده‌است. روش حل نیز با استفاده از الگوریتم ژنتیک و تخمین نقطه‌ای بوده‌است.

در [۹]، مکان‌یابی بهینه ذخیره‌سازها در سیستم توزیع در نظر گرفتن درصد نفوذ زیاد واحدهای بادی در شبکه موردنظر بوده که در آن، هدف، حداکثرسازی سود مالکان منابع تولید پراکنده، شبکه و همچنین استفاده حداکثری از انرژی مازاد واحدهای بادی توسط ذخیره‌سازها به‌منظور کاهش هزینه سالیانه انرژی الکتریکی بوده‌است. در [۱۰]، استراتژی برنامه‌ریزی بلندمدت براساس معادلات پخش بار بهینه احتمالی و با منظور کردن عدم قطعیت‌ها صورت گرفته است. این درحالی‌است که حداقل‌سازی هزینه‌های ریزش‌بکه و حداقل‌سازی میزان انحرافات از قیود فنی به‌عنوان توابع هدف در نظر گرفته شده‌اند.

در [۱۱]، روشی مناسب برای تعیین هم‌زمان ظرفیت و مکان‌یابی بهینه ۲۴ ساعته چند نوع از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن مدل طول عمر بهینه سیستم ذخیره‌ساز در شبکه انتقال، ارائه شده‌است. این درحالی‌است که با انجام مطالعات در بازه‌های زمانی کمتر از ساعت، امکان مشارکت تکنولوژی‌های مختلف از سیستم‌های ذخیره‌ساز در خدمات مختلف در نظر گرفته شده‌است.

در [۲۵]، تعیین ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی در شبکه توزیع با سطح نفوذ زیاد سلول‌های فتوولتائیک به‌دست‌آمده است. اصلی‌ترین هدف روش بررسی شده، بهینه‌سازی ظرفیت باتری‌ها و تحلیل سود و هزینه آن‌ها، زمانی که از آن‌ها در تأمین خدماتی همچون تنظیم ولتاژ و پیک‌زدایی بار استفاده می‌شود. برای پیاده‌سازی استراتژی پیشنهادی، مدلی شامل رفتار فیزیکی باتری و یک سیستم مدیریت انرژی با هدف تنظیم ولتاژ و پیک‌زدایی بار، توسعه داده شده‌است.

در [۲۶]، یک مدل برنامه‌ریزی با رویکرد بهره‌برداری چندساله برای تعیین ظرفیت بهینه باتری‌ها (هم از لحاظ انرژی و هم از لحاظ توان) ارائه شده‌است. مدل ارائه‌شده شامل فرمول‌بندی مسئله به‌صورت مسئله در مدار قرارگرفتن واحدها با در نظر گرفتن قیود منابع تجدیدپذیر و باتری‌های ذخیره‌کننده انرژی می‌باشد. تصمیم‌گیری‌های برنامه‌ریزی بهینه برای تکنولوژی‌های مختلف باتری‌ها، با در نظر گرفتن بسیاری از سناریوهای مالکیت انجام شده‌است. این مسئله بهینه‌سازی با استفاده از روش تجزیه مسائل بهینه‌سازی دوسطحی حل شده‌است.

براساس مطالعات انجام‌شده در زمینه تعیین ظرفیت و مکان‌یابی سیستم ذخیره‌ساز مشاهده می‌شود که توابع هدف استفاده‌شده اغلب با اهدافی همچون حداقل‌سازی هزینه بهره‌برداری از شبکه، حداقل‌سازی تلفات، حداقل‌سازی انحرافات ولتاژ و شین‌های موجود در شبکه، حداکثرسازی قابلیت اطمینان شبکه و حداکثرسازی سود حاصل از فروش انرژی الکتریکی باتری‌ها در بازار برق بوده‌اند. هم‌چنین بهینه‌سازی‌های انجام‌شده با روش‌های برنامه‌ریزی دینامیکی، برنامه‌ریزی آمیخته با اعداد صحیح و الگوریتم‌هایی نظیر شبکه عصبی، ازدحام ذرات، ژنتیک و دیگر روش‌های بهینه‌سازی انجام شده‌است.

این درحالی‌است که در اغلب مراجع مورد بررسی، تنها انتخاب یک نوع سیستم ذخیره‌ساز مورد بررسی قرار گرفته است. هم‌چنین، اثر

ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در سیستم‌های قدرت همواره مورد توجه قرار گرفته است. علی‌رغم پیشرفت‌های بسیار در زمینه ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی هنوز در مقیاس وسیع این امر با مشکلات عدیده روبرو می‌باشد. تعداد کم نیروگاه‌های با تکنولوژی ذخیره‌سازی انرژی نسبت به نیروگاه‌های سنتی و هزینه‌های زیاد سیستم‌های ذخیره‌سازی گواهی بر این مشکلات می‌باشند. هم‌چنین، با توجه به خدمات گوناگون قابل حصول از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی [۱] و نیاز ریزش‌بکه‌ها به منابع تولید محلی در تأمین بدون وقفه بارهای مصرفی، نقش سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی بسیار پررنگ شده‌است. اصلی‌ترین مسئله در مرحله نخست مطالعات استفاده از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی، تعیین ظرفیت و مکان‌های مناسب برای نصب، چه از منظر قیود فنی و چه از منظر قیود اقتصادی سیستم می‌باشد.

تاکنون مطالعات گسترده‌ای در زمینه مکان‌یابی منابع تولید پراکنده در شبکه‌های توزیع [۲] و ریزش‌بکه‌ها [۳] انجام شده‌است. سیستم‌های ذخیره‌سازی را نیز می‌توان به‌نوعی منبع تولید توان بشمار آورد، بنابراین تعیین ظرفیت، تکنولوژی‌های اقتصادی و مکان‌های بهینه جهت نصب این سیستم‌ها از اهمیت به‌سزایی برخوردار می‌باشند.

در [۴]، مکان‌یابی سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی و استراتژی شارژ و دشارژ بهینه آنها، با هدف کاهش ریسک و افزایش سود شرکت‌های توزیع انرژی، انجام شده‌است. روش به کارگرفته‌شده هم با قیمت بازار و هم با در نظر گرفتن قیمت‌های تولید حاشیه‌ای شین‌ها افزایش سودآوری شرکت‌های توزیع را تضمین می‌نماید.

در [۵]، تعیین ظرفیت بهینه منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در یک ریزش‌بکه با تحلیل سود و زیان انجام شده‌است. دو مدل ریاضی برای مدهای عملکرد جزیره‌ای و اتصال به شبکه ریزش‌بکه در نظر گرفته شده‌است. مسئله به‌عنوان یک مدل برنامه‌ریزی خطی آمیخته با اعداد صحیح پیاده‌سازی شده‌است.

در [۶]، بهینه‌سازی ظرفیت و مکان نصب سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی برای مشارکت در تأمین ذخیره چرخان شبکه‌های توزیع فعال مورد مطالعه قرار گرفته است. روش مورد استفاده با اهداف پشتیبانی ولتاژ، حداقل‌سازی تلفات شبکه و حداقل‌سازی هزینه خرید انرژی شبکه خارجی انجام شده‌است.

در [۷]، یک استراتژی جهت مدیریت انرژی ریزش‌بکه در مدل جزیره‌ای در حضور برنامه پاسخگویی بار با استفاده از سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی پیشنهاد داده شده‌است. استراتژی پیشنهادی با هدف حداقل‌کردن هزینه بهره‌برداری باتری، سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و هزینه‌های مربوط به انرژی تأمین‌نشده و مازاد انرژی می‌باشد.

در [۸]، پخش بار بهینه احتمالی (POPF<sup>1</sup>) با در نظر گرفتن ذخیره‌سازها و قیود بازار برق حل شده‌است. در این فرآیند، ذخیره‌سازها به‌عنوان بخشی از شرکت‌کنندگان در بازار انرژی الکتریکی شرکت نموده و نهایتاً مکان بهینه و استراتژی بهینه آنها برای حداقل‌سازی هزینه

## ۲-۲- مدل‌سازی منابع تولید و سناریوهای عدم قطعیت‌ها

برای تعیین هزینه تولید توان مولدهای سنتی ریزشبکه در هر ساعت از مشخصه خطی واحدها، قیود هزینه راه‌اندازی و ذخیره چرخان واحدها مطابق رابطه (۱) استفاده شده‌است. همچنین فرض بر این است که منابع تولید سنتی ریزشبکه دارای ضریب توان ۰/۸ باشند.

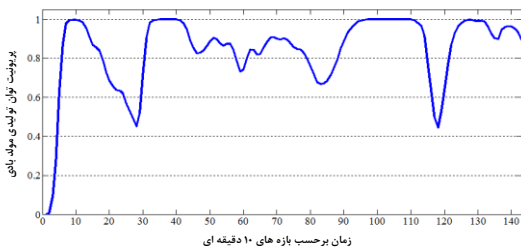
$$F(P_{i,t}^G) = \sum_{i \in N_i} \sum_{t \in N_t} (a_i + b_i P_{i,t}^G + Sc_{i,t}^G + R_{i,t}^G RP_i) \quad (1)$$

لازم به ذکر است که، مجموعه پارامترها و متغیرهای استفاده‌شده در روابط این بخش در قسمت پیوست معرفی شده‌اند.

برای تشکیل سناریوهای عدم قطعیت مولد بادی، از اطلاعات تولید مولد بادی در [۱۲] استفاده شده‌است. با استفاده از سری‌های زمانی  $ARMA^2$ ، سناریوهای عدم قطعیت مربوط به تولید مولد بادی تشکیل شده‌است [۱۳]. معادله کلی سری‌های زمانی  $ARMA(p,q)$  به صورت رابطه (۲) می‌باشد [۱۴].

$$A(p) \cdot y(t) = C(q) \cdot e(t) \quad (2)$$

که در آن  $p$  و  $q$  عملگرهای اعمال تأخیر بوده،  $A(p)$  و  $C(q)$  به ترتیب ضرایب خروجی سیگنال (در اینجا توان تولیدی مولد بادی) و نویز سفید در هر تأخیر زمانی می‌باشند. شکل ۲، پریونیت توان تولیدی واحد بادی را در بازه زمانی مورد مطالعه نشان می‌دهد.



شکل ۲: الگوی تولید مولد بادی در ۲۴ ساعت [۱۲]

با استفاده از سری زمانی  $ARMA(2,1)$ ، ضرایب سری زمانی برای میزان تولید مولد بادی در شکل ۲ به صورت روابط (۳) و (۴) مدل شده‌است.

$$A(p) = 1 - 1.695p^{-1} + 0.6993p^{-2} \quad (3)$$

$$C(q) = 1 - 0.6282q^{-1} \quad (4)$$

برای تشکیل سناریوهای عدم قطعیت دسترسی خط ارتباطی ریزشبکه و شبکه بالادست از شبیه‌سازی مونت کارلو استفاده شده‌است. به این صورت که برای مدل‌سازی این عدم قطعیت از دو شاخص میانگین زمان باقی‌مانده تا بروز عیب ( $MTTF^*$ ) و میانگین زمان تعمیر تجهیز ( $MTTR$ ) در عکس توزیع نمایی مطابق روابط (۵) و (۶) استفاده شده‌است [۱۵].

$$T_{Fail} = -MTTF \cdot Ln(u_1) \quad (5)$$

$$T_{Repair} = -MTTR \cdot Ln(u_2) \quad (6)$$

مشارکت بارهای پاسخگو بر تعیین مکان‌ها و ظرفیت بهینه سیستم ذخیره‌ساز با منظور نمودن هر دو مد عملکرد ریزشبکه به صورت هم‌زمان انجام نشده است.

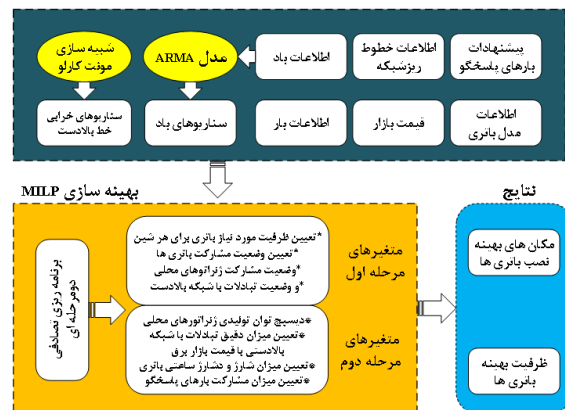
در این پژوهش، تعیین ظرفیت و مکان‌یابی هم‌زمان دو تکنولوژی مختلف از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ این سیستم‌ها در ریزشبکه، به صورت یک مسأله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن عدم قطعیت‌های مرتبط با تولید واحدهای بادی و سلول‌های فتوولتائیک و همچنین با منظور نمودن احتمال خرابی خط بالادست ریزشبکه به صورت یک پدیده تصادفی پیشنهاد شده‌است. همچنین، اثر مشارکت بارهای پاسخگو در انتخاب سیستم ذخیره‌ساز و مکان‌های بهینه جهت نصب، مورد تحلیل و بررسی قرار می‌گیرد.

در ادامه و در بخش ۲ مدل‌سازی و فرمول‌بندی مسئله ارائه شده‌است. بخش ۳ شامل مطالعات موردی و نتایج عددی می‌باشد و نهایتاً در بخش آخر نتایج حاصل از مطالعه انجام‌شده بیان می‌شوند.

## ۲- مدل‌سازی و فرمول‌بندی ریاضی مسأله

### ۲-۱- ساختار کلی مدل پیشنهادی

برای تعیین نوع، ظرفیت و مکان‌های بهینه اقتصادی جهت نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی و مدل‌سازی عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع تجدیدپذیر، از یک ساختار برنامه‌ریزی تصادفی دومرحله‌ای مبتنی بر سناریو مطابق شکل ۱، استفاده شده‌است. با توجه به شکل ۱، در مرحله اول، وضعیت روشن یا خاموش بودن واحدهای تولیدی در هر ساعت، وضعیت خرید یا فروش انرژی به شبکه بالادست در بازار برق، وضعیت شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز در هر ساعت و مقدار ظرفیت نصب‌شده از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در هر شین مشخص می‌گردد. پس از آن، در مرحله دوم با توجه به وقوع سناریوهای عدم قطعیت، مقدار مشارکت هر کدام از منابع تولید انرژی، بارهای پاسخگو، میزان خرید از شبکه بالادست یا فروش به شبکه بالادست و مقدار تغییرات انرژی و توان لحظه‌ای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب‌شده در هر شین، در هر زمان و در هر سناریو مشخص می‌گردد.



شکل ۱: ساختار کلی مدل پیشنهادی جهت تعیین تکنولوژی، ظرفیت و مکان‌های بهینه سیستم ذخیره‌ساز انرژی

قیود تابع هدف اضافه شود. رابطه (۱۱) نیز یک رابطه کمکی جهت تعیین طول پله‌ها می‌باشد.

$$DR_{r,\omega,t} = q_r^0 u_{r,\omega,t}^0 + \sum_{k \in N_k} \lambda_{r,\omega,t}^k u_{r,\omega,t}^k ; \forall t, \omega, r \quad (9)$$

$$DR_{r,\omega,t}^{cost} = c_r^0 q_r^0 u_{r,\omega,t}^0 + \sum_{k \in N_k} c_r^k \lambda_{r,\omega,t}^k u_{r,\omega,t}^k ; \forall t, \omega, r \quad (10)$$

$$0 \leq \lambda_{r,\omega,t}^k \leq q_r^k - q_r^{k-1} ; \forall t, \omega, r \quad (11)$$

### ۵-۲- پخش بار مبتنی بر افت ولتاژ

این روش در مراجع بسیاری از جمله [۱۸-۲۲] تأیید و به‌کار گرفته شده است. این پخش بار را می‌توان به‌عنوان تقریبی مناسب از پخش بار جریان متناوب در سیستم‌های توزیع با شبکه‌های شعاعی در نظر گرفت. چرا که این پخش بار اطلاعاتی از قبیل توان اکتیو و راکتیو عبوری در خطوط و اندازه ولتاژ شین‌ها را در اختیار قرار می‌دهد. فرض کنید به شین  $b$  دو خط  $L$  و  $L+1$  متصل باشند، با توجه به شعاعی بودن شبکه، میزان توان اکتیو و راکتیو عبوری از خط  $L+1$  وابسته به توان تزریقی از خط  $L$ ، توان خالص تولیدی روی شین  $b$  بوده که در روابط (۱۲) و (۱۳) نشان داده شده‌است. از طرفی ولتاژ هر شین وابسته به ولتاژ شین قبل و افت ولتاژ خطی شده بین خط ارتباطی دو شین  $b$  و  $b+1$  می‌باشد. رابطه (۱۵) بیانگر محدودیت ولتاژ شین‌ها می‌باشد. روابط (۱۶) و (۱۷) نشان‌دهنده محدودیت توان انتقالی خطوط شبکه می‌باشند. از آنجایی که معادله (۱۶) معادله دایره می‌باشد، خطی‌سازی بر اساس روش ارائه‌شده در [۲۳] انجام شده‌است.

روابط پخش بار موردنظر به‌صورت روابط (۱۲) تا (۱۷) می‌باشند:

$$P_{L+1,\omega,t}^{Line} = P_{L,\omega,t}^{Line} + P_{b,\omega,t}^{GEN} - P_{b,\omega,t}^D ; \forall t, \omega, L, b \quad (12)$$

$$Q_{L+1,\omega,t}^{Line} = Q_{L,\omega,t}^{Line} + Q_{b,\omega,t}^{GEN} - Q_{b,\omega,t}^D ; \forall t, \omega, L, b \quad (13)$$

$$V_{b+1,\omega,t}^{Bus} = V_{b,\omega,t}^{Bus} - (r_L P_{L,\omega,t}^{Line} + x_L Q_{L,\omega,t}^{Line}) / V_1^2 ; \forall t, \omega, L, b \quad (14)$$

$$0.95 \leq V_{b,\omega,t}^{Bus} \leq 1.05 ; \forall t, \omega, b \quad (15)$$

$$(S_{L,\omega,t}^{Line})^2 = (P_{L,\omega,t}^{Line})^2 + (Q_{L,\omega,t}^{Line})^2 ; \forall t, \omega, L \quad (16)$$

$$|S_{L,\omega,t}^{Line}| \leq S_{max}^{Line} ; \forall t, \omega, L \quad (17)$$

### ۶-۲- تابع هدف و قیود

به‌منظور تعیین میزان ظرفیت انرژی مورد نیاز از هر کدام از تکنولوژی‌های سیستم‌های ذخیره‌ساز در هر شین، یک مسئله بهینه‌سازی به‌صورت مدل خطی آمیخته با اعداد صحیح معرفی شده است. تابع هدف پیشنهادی نیز به‌صورت رابطه (۱۸) در نظر گرفته شده‌است.

میزان تولید مولد فتوولتاییک از روی داده‌های واقعی و با استفاده از شبکه عصبی پیش‌بینی شده‌است [۷]. پس از پیش‌بینی تولید واحد خورشیدی با شبکه عصبی، برای شبیه‌سازی عدم قطعیت تولید در سلول‌های فتوولتاییک، از معیار خطای  $MAPE^5$  در قیود رزرو ریزش‌بکه استفاده شده‌است [۱۶، ۵].

### ۳-۲- مدل‌سازی سیستم ذخیره‌ساز انرژی

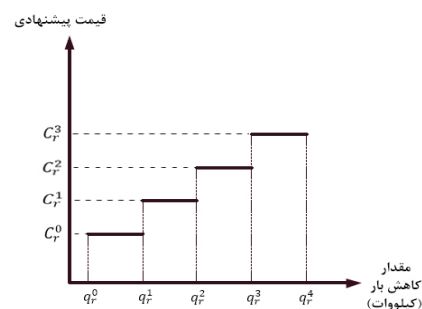
برای مدل‌سازی هزینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در تابع هدف، هزینه کل روزانه سیستم ذخیره‌ساز (TCPD) استفاده شده‌است [۵]. این هزینه دربرگیرنده هزینه سالیانه یک بار سرمایه‌گذاری در خرید و نصب سیستم ذخیره‌ساز (AOTC) در رابطه (۷) و هزینه تعمیر و نگهداری از آن‌ها بوده که در نهایت به‌صورت یک هزینه روزانه برای سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی نصب‌شده در ریزش‌بکه در نظر گرفته شده‌است. این هزینه از رابطه (۸) قابل محاسبه می‌باشد [۵].

$$AOTC = \frac{r(1+r)^I}{(1+r)^I - 1} FC \cdot CE \quad (7)$$

$$TCPD = (AOTC + CE \cdot MC) / 365 \quad (8)$$

### ۴-۲- مدل‌سازی مشارکت بارهای پاسخگو

در این مقاله علاوه بر بارهای ریزش‌بکه، دو نوع بار صنعتی قرار داده شده‌است که امکان شرکت آن‌ها در برنامه‌های انگیزه محور پاسخگویی بار وجود دارد. مشترکین صنعتی اغلب بارهای سنگین می‌باشند. چنین مشترکانی معمولاً دارای چند خط تولید بوده و کاهش میزان تولید در هر خط تولید در هر زمان هزینه‌ای مجزا داشته که به مقدار تولید در همان خط وابسته است. به همین دلیل، مشترکین صنعتی پیشنهادهای خود را به‌صورت پله‌های قیمتی ارائه می‌دهند. شکل ۳، نمونه پله‌های پیشنهادی ارائه‌شده توسط مشترکین صنعتی می‌باشد.



شکل ۳: پله‌های قیمتی پیشنهادی مشترک صنعتی [۱۷]

برای مدل‌سازی رفتار این بارها از روابط (۹)، (۱۰) و (۱۱) استفاده شده است. رابطه (۹) نشان‌دهنده کاهش ظرفیت ارائه‌شده توسط فراهم‌کننده کاهش بار  $r$ ، در هر سناریو و هر زمان بوده که شامل متغیرهای باینری و طول هر پله می‌باشد. رابطه (۱۰) نشان‌دهنده هزینه پرداختی به بار شرکت‌کننده در برنامه کاهش بار بوده که باید به‌عنوان یک قید به

$$P_{\omega,t}^{Upgrid} = P_{\omega,t}^{Buy} - P_{\omega,t}^{Sell} ; \forall t, \omega \quad (24)$$

$$0 \leq P_{\omega,t}^{Buy} \leq P_{\max}^{Line} X_t^{buy} ; \forall t, \omega \quad (25)$$

$$0 \leq P_{\omega,t}^{Sell} \leq P_{\max}^{Line} X_t^{sell} ; \forall t, \omega \quad (26)$$

$$X_t^{buy} + X_t^{sell} \leq X_{\omega,t}^{main} ; \forall t, \omega \quad (27)$$

❖ قیود مرتبط با سیستم ذخیره‌ساز:

روابط (۲۸) و (۲۹) به ترتیب بیانگر نرخ شارژ و دشارژ سیستم‌های ذخیره‌ساز نصب‌شده در هر شین می‌باشند. رابطه (۳۰)، بیانگر وضعیت شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز نصب‌شده در هر شین می‌باشد. برای ایجاد محدودیت در تعیین تعداد شین جهت نصب سیستم ذخیره‌ساز از قید (۳۱) استفاده شده‌است. رابطه (۳۲)، نشان‌دهنده سطح انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز نصب‌شده در هر شین به‌ازای هر زمان و هر سناریو می‌باشد. سطح انرژی سیستم‌های ذخیره‌ساز بایستی بین مقدار حداکثر و حداقل خود باشد که در رابطه (۳۳) مدل شده‌است. همچنین طبق رابطه (۳۴) فرض می‌شود که در ابتدا و انتهای بازه زمانی مورد مطالعه سطح انرژی سیستم ذخیره‌ساز هر شین برابر ظرفیت نصب‌شده در همان شین باشد.

$$0 \leq P_{Es,b,\omega,t}^{CH} \leq P_{Es,b}^{Install} U_{Es,b,t}^{ch} ; \forall t, \omega, b, Es \quad (28)$$

$$0 \leq P_{Es,b,\omega,t}^{DCH} \leq P_{Es,b}^{Install} U_{Es,b,t}^{dch} ; \forall t, \omega, b, Es \quad (29)$$

$$U_{Es,b,t}^{ch} + U_{Es,b,t}^{dch} \leq U_{Es,b}^{Install} ; \forall t, b, Es \quad (30)$$

$$\sum_{b \in N_{Bus}} U_{Es,b}^{Install} \leq N_{Install} ; \forall Es \in N_{ESS} \quad (31)$$

$$SOC_{Es,b,\omega,t+1} = SOC_{Es,b,\omega,t} + \eta_{Es}^{ch} P_{Es,b,\omega,t}^{CH} - P_{Es,b,\omega,t}^{DCH} / \eta_{Es}^{dch} ; \forall t, \omega, b, Es \quad (32)$$

$$E^{MIN} \leq SOC_{Es,b,\omega,t} \leq E^{MAX} ; \forall t, \omega, b, Es \quad (33)$$

$$SOC_{Es,b,\omega,t=0} = SOC_{Es,b,\omega,t=24} ; \forall \omega, b, Es \quad (34)$$

❖ قیود مرتبط با ظرفیت ذخیره ریزشبه:

عدم قطعیت مربوط به نوسانات تولید واحد خورشیدی، تغییر بار و همچنین ازدست‌رفتن بخشی از تولید بزرگترین ژنراتور فعال در ریزشبه، به‌صورت درصد در قیود رزرو واحدهای تولید انرژی ریزشبه در روابط (۳۵) تا (۳۷) لحاظ شده‌اند.

$$\sum_{b \in N_{bus}} \sum_{Es \in N_{ESS}} \eta_{Es}^{dch} [SOC_{Es,b,\omega,t} - E^{MIN}] + \sum_{i \in N_g} R_{i,\omega,t}^G \geq \alpha \cdot SR_{\omega,t} + MAPE \cdot P_{\omega,t}^{Pv} + \kappa \cdot D_t \quad (35)$$

$$SR_{\omega,t} \geq \text{Max} \{ P_{i,\omega,t}^G, i \in N_g \} ; \forall t, \omega \quad (36)$$

$$R_{i,\omega,t}^G \leq P_i^{\max} X_{i,t} - P_{i,\omega,t}^G ; \forall t, \omega, i \quad (37)$$

Minimize Objective Function :

$$\begin{aligned} & \sum_{Es \in N_{ESS}} TCPD_{Es} \\ & + \sum_{\omega \in N_{\Omega}} \pi_{\Omega} \left[ \sum_{t \in N_t} P_{\omega,t}^{Upgrid} Mprice_t \right] \\ & + \sum_{\omega \in N_{\Omega}} \pi_{\Omega} \left[ \sum_{t \in N_t} \sum_{i \in N_g} (a_i + b_i P_{i,\omega,t}^G + Sc_{i,\omega,t}^G + R_{i,\omega,t}^G RP_i) \right] \\ & + \sum_{\omega \in N_{\Omega}} \pi_{\Omega} \left[ \sum_{r \in N_r} \sum_{\omega \in N_{\Omega}} \sum_{t \in N_t} DR_{r,\omega,t}^{COST} \right] \end{aligned} \quad (18)$$

عبارت اول موجود در تابع هدف رابطه (۱۸)، مربوط به هزینه کل روزانه تکنولوژی‌های بکارگرفته‌شده در ریزشبه می‌باشد. لازم‌به‌ذکر است که این عبارت مستقل از تحقق سناریوها می‌باشد. عبارت دوم مربوط به هزینه یا درآمد انتظاری تبادل انرژی با شبکه بالادستی با قیمت بازار برق بوده که مقدار آن تصادفی و وابسته به تحقق سناریوها می‌باشد. عبارت‌های سوم و چهارم نیز به ترتیب بیانگر هزینه انتظاری تولید ژنراتورهای سنتی ریزشبه و هزینه انتظاری کاهش بار داوطلبانه بارهای پاسخگو بوده که با توجه به تحقق هر سناریو مقادیر مختلف به خود می‌گیرند. دسته‌بندی قیود مسئله به‌صورت زیر می‌باشد.

❖ قیود مرتبط با مولدهای سنتی:

روابط (۱۹) و (۲۰) به ترتیب نشان‌دهنده محدوده توان اکتیو و راکتیو مولدهای ریزشبه می‌باشند. رابطه (۲۱)، قید هزینه راه‌اندازی مولدها و روابط (۲۲) و (۲۳) نیز به ترتیب قیود حداقل زمان روشن و خاموش ماندن مولدهای ریزشبه را نشان می‌دهند.

$$P_i^{\min} X_{i,t} \leq P_{i,\omega,t}^G \leq P_i^{\max} X_{i,t} ; \forall t, \omega, i \quad (19)$$

$$Q_i^{\min} X_{i,t} \leq Q_{i,\omega,t}^G \leq Q_i^{\max} X_{i,t} ; \forall t, \omega, i \quad (20)$$

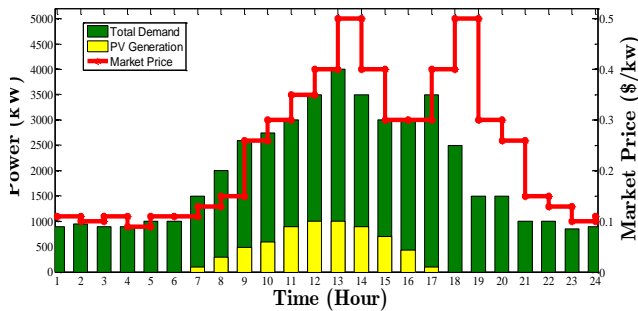
$$Sc_{i,\omega,t}^G \leq \text{Max} \{ StCost_i [X_{i,t} - X_{i,t-1}], 0 \} ; \forall t, \omega, i \quad (21)$$

$$UpTime_i [X_{i,t} - X_{i,t-1}] \leq T_i^{ON} ; \forall t, i \quad (22)$$

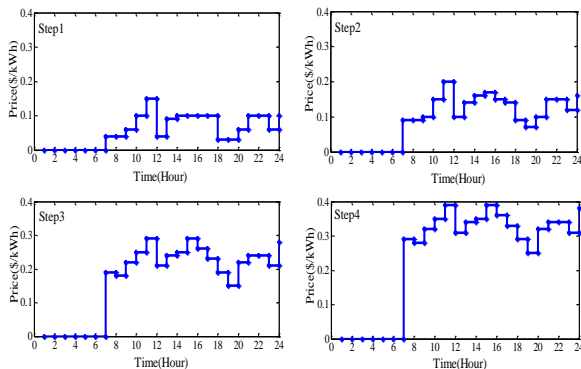
$$DownTime_i [X_{i,t-1} - X_{i,t}] \leq T_i^{OFF} ; \forall t, i \quad (23)$$

❖ قیود مرتبط با تبادل انرژی با شبکه بالادستی:

روابط (۲۴) تا (۲۷) بیانگر قیود مرتبط با تبادل انرژی با شبکه بالادستی می‌باشند. خط ارتباطی بین این دو شبکه به‌صورت یک ژنراتور دو جهته (تولید توان مثبت و منفی) مدل شده که هزینه آن به‌ازای هر کیلووات ساعت برابر قیمت انرژی بازار برق شبکه بالادستی در نظر گرفته شده‌است. طبق روابط (۲۵) و (۲۶)، محدوده توان تولیدی این ژنراتور برابر با ظرفیت خط ارتباطی این دو شبکه می‌باشد. برای مشخص شدن وضعیت خرید از شبکه بالادستی و فروش به آن و همچنین وضعیت عملکرد ریزشبه (جزیره‌ای/ متصل به شبکه) در هر سناریو و هر زمان، از قید (۲۷) استفاده شده‌است.



شکل ۵: بار ریزشکه، تولید سلول فتوولتائیک و قیمت بازار [۵]



شکل ۶: پله‌های قیمتی پیشنهادی بارهای پاسخگو

جدول ۲: پله‌های کاهش ظرفیت پیشنهادی بارهای پاسخگو

(بر حسب کیلووات) [۱۷]

پله اول	پله دوم	پله سوم	پله چهارم
۰-۵	۵-۱۰	۱۰-۵۰	۵۰-۷۰
۰-۵	۵-۲۰	۲۰-۳۰	۳۰-۶۰

در این مطالعه، از باتری‌های یون لیتیومی و باتری‌های سدیم سولفور به‌عنوان دو نوع سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده شده‌است. از آنجایی که باتری‌ها به‌صورت ماژول ارائه می‌شوند، فرض شده‌است که هر کدام از ماژول‌ها دارای ظرفیت توان ۱۰۰ کیلوواتی باشند. بنابراین در مدل‌سازی باتری فرض شده‌است که ظرفیت انرژی گروهی آن‌ها مضربی از ۱۰۰ کیلووات ساعت به‌دست‌آید.

اطلاعات سیستم‌های ذخیره‌ساز نیز در جدول ۳ ذکر شده‌اند [۲۴]. همچنین نرخ توان باتری‌ها برابر نصف ظرفیت انرژی آن‌ها فرض شده‌است سناریوهای عدم قطعیت به‌دست‌آمده نیز در جدول ۴ ارائه شده‌است.

جدول ۳: اطلاعات مرتبط با سیستم‌های ذخیره‌ساز [۲۴]

نوع باتری	بازده	هزینه تعمیر و نگهداری (\$/kW)	هزینه سرمایه‌گذاری (\$)
یون لیتیوم	۹۰%	۳	۱۰۰۰
سدیم سولفور	۷۸%	۳	۴۹۱

جدول ۴: سناریوهای عدم قطعیت و احتمال وقوع آن‌ها

سناریو	احتمال	سناریو	احتمال
۱	۰/۰۰۱	۴	۰/۰۰۱۱
۲	۰/۰۰۴۵	۵	۰/۰۰۳۷
۳	۰/۳۲۱۵	۶	۰/۲۶۶۴
		۷	۰/۰۰۱۳
		۸	۰/۰۰۵۵
		۹	۰/۳۹۵۰

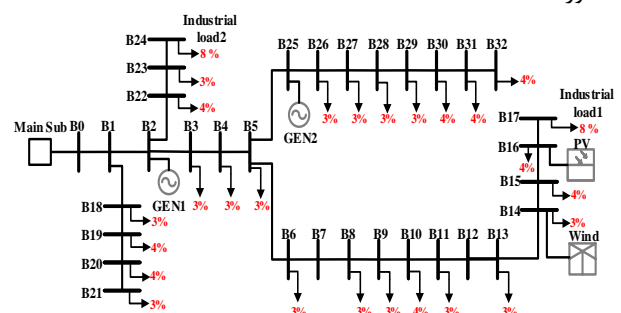
دو نوع ذخیره، از جمله ذخیره شبکه (SR<sub>(t)</sub>) و رزرو ساعتی هر واحد تولید انرژی ریزشکه در قیود مسئله در نظر گرفته شده‌اند. منظور از ذخیره شبکه، در واقع قسمتی از بزرگترین مولد تأمین‌کننده توان در هر ساعت بوده که در صورت از کار افتادن آن واحد، توسط رزرو ساعتی منابع دیگر و انرژی موجود در ذخیره‌سازهای شبکه قابل تأمین باشد. پارامتر  $\alpha$ ، ضریب ذخیره شبکه بوده و مقدار آن بین ۰/۲۵ تا ۰/۸ بوده که در این مطالعه برابر ۰/۸ در نظر گرفته شده‌است. پارامتر  $\kappa$ ، نیز خطای پیش‌بینی بار بوده که برابر ۳ درصد در نظر گرفته شده‌است [۵]. همچنین، خطای پیش‌بینی تولید واحدهای فتوولتائیک به‌صورت MAPE در (۳۵) مدل شده‌اند.

علاوه بر قیود ذکر شده، قیود (۹) تا (۱۷) نیز باید جزو قیود تابع هدف (۱۸) قرار گیرند.

### ۳- مطالعات موردی و نتایج عددی

#### ۳-۱- داده‌های ورودی مسئله

ریزشکه مورد مطالعه برگرفته شده از [۲۱] بوده و ساختار کلی آن به‌صورت شکل ۴ می‌باشد. در شکل ۴ درصد بار مصرفی در هر شین نیز مشخص شده‌است. این شبکه دارای دو مولد سنتی ۲۰۰۰ کیلوواتی و ۱۰۰۰ کیلوواتی بوده که به ترتیب در شین‌های ۲ و ۲۵ نصب شده‌اند. این در حالی است که مولد بادی و سلول فتوولتائیک ۱۰۰۰ کیلوواتی نیز به ترتیب در شین‌های ۱۴ و ۱۶ قرار داده شده‌اند. دو بار صنعتی موجود در شین‌های ۱۷ و ۲۴ نیز در برنامه پاسخگویی بار مشارکت می‌کنند. نمودار پروفیل بار مصرفی، قیمت بازار و تولید مولد فتوولتائیک نیز در شکل ۵ ارائه شده‌اند. اطلاعات منابع تولیدی مسئله در جدول ۱ ذکر شده‌اند. همچنین، پله‌های قیمتی پیشنهادی در هر ساعت و پله‌های کاهش مصرف پیشنهادی بارهای پاسخگو به ترتیب در شکل ۶ و جدول ۲ آورده شده‌است.



شکل ۴: ریزشکه مورد مطالعه [۲۱]

جدول ۱: اطلاعات منابع تولید سنتی ریزشکه [۵]

ژنراتور	نوع	$P_i^{min}$ (kW)	$a$ (\$)	$b$ (\$/kW)
GEN1	میکروتوربین	۱۰۰	۳۰	۰/۱۳
GEN2	میکروتوربین	۱۰۰	۵۰	۰/۳۵
ژنراتور	نوع	$P_i^{max}$ (kW)	هزینه رزرو	هزینه راه‌اندازی
GEN1	میکروتوربین	۲۰۰۰	۰/۰۱	۸۰
GEN2	میکروتوربین	۱۰۰۰	۰/۰۱	۳۰

### ۲-۳- موارد مطالعاتی

در ابتدا فرض شده است که ریزشبه فاقد سیستم ذخیره‌سازی و برنامه پاسخگویی سمت بار باشد. شش مورد مطالعاتی بعدی به مکان‌یابی و تعیین ظرفیت هم‌زمان هر دو نوع باتری با حضور و عدم حضور بارهای پاسخگو و اعمال محدودیت‌های سه‌گانه انتخاب شین برای تعیین مکان نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز اختصاص می‌یابد. به‌طور کلی سه حالت به‌عنوان محدودیت‌هایی برای انتخاب شین جهت نصب باتری در نظر گرفته شده است:

- حالت اول: مدل مجاز به انتخاب تکنولوژی بهینه و تعیین تعداد شین جهت نصب باتری باشد.
- حالت دوم: مدل مجاز به انتخاب تکنولوژی بهینه و نصب باتری‌ها حداکثر در سه شین باشد.
- حالت سوم: مدل لزوماً از هر دو تکنولوژی باتری‌ها، هر کدام در یک شین، به‌عنوان سیستم ذخیره‌ساز ریزشبه بهره‌بردار.

لازم به ذکر است، در تمامی حالات ذکر شده تنها تعداد شین جهت نصب سیستم ذخیره‌ساز به‌عنوان ورودی مسئله بوده و در نهایت پس از حل مسئله بهینه‌سازی، شماره شین‌های انتخاب شده جهت نصب ذخیره سازها، تکنولوژی ذخیره‌سازی انتخاب شده برای هر شین، ظرفیت انرژی و توان لازم برای سیستم ذخیره‌ساز در هر شین به دست می‌آیند.

مدل پیشنهادی در نرم‌افزار GAMS پیاده‌سازی و توسط حل‌کننده CPLEX حل شده است.

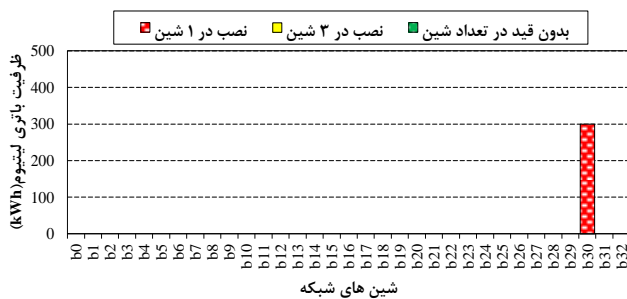
#### ۳-۲-۱- مورد اول: ریزشبه بدون ذخیره‌ساز

باتوجه به جدول ۵، بیشترین هزینه برای ریزشبه، در حالت ریزشبه بدون در نظر گرفتن منابع ذخیره‌ساز انرژی و بارهای پاسخگو بوده و مقدار آن برابر ۵۲۶۹/۰۲ دلار می‌باشد. در این حالت در برخی از سناریوها که خط بالادست در دسترس نبوده است، مقدار تولید واحد بادی از بار ریزشبه فراتر رفته و در مجموع برای تمام سناریوها در این حالت مقدار ۴۷۰/۳۵ کیلووات ساعت انرژی سرریز خواهیم داشت. در جدول ۵ هزینه ۵۲۶۹/۰۲ دلار در این حالت بالاترین هزینه کل ریزشبه می‌باشد و این یعنی در هر صورت قرارداد ظرفیت مناسبی از سیستم ذخیره‌ساز هزینه‌های ریزشبه را کاهش می‌دهد.

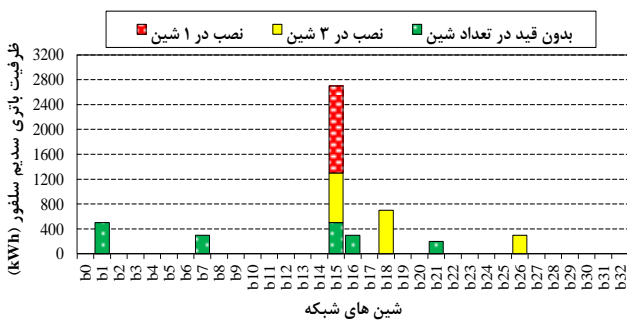
#### ۳-۲-۲- مورد دوم: ریزشبه با حضور ذخیره‌ساز

در این حالت، سیستم‌های ذخیره‌ساز به ریزشبه اضافه شده‌اند. مکان‌یابی و تعیین ظرفیت هر دو نوع باتری به‌صورت هم‌زمان صورت گرفته است. در ابتدا مدل بدون هیچ‌گونه محدودیتی برای تعیین تعداد شین جهت نصب سیستم ذخیره‌ساز حل می‌شود سپس تعداد شین‌ها برای نصب باتری به سه شین کاهش یافته و پس از آن مدل با فرض در نظر گرفتن یک شین برای نصب هر کدام از دو باتری حل می‌گردد. تمامی حالات با حضور و عدم حضور پاسخگویی بار بر روی ظرفیت و

مکان نصب باتری بررسی می‌شوند. نتایج این شش حالت در جدول ۵ و شکل‌های ۷ و ۸ آمده‌اند. با توجه به جدول ۵، در صورت عدم اعمال محدودیت از نظر انتخاب نوع تکنولوژی باتری، مدل پیشنهادی تنها از باتری سدیم سولفور به‌منظور ذخیره‌سازی استفاده می‌کند. تنها در حالت سوم که قید استفاده از هر دو نوع تکنولوژی باتری هر کدام فقط در یک شین فعال می‌باشد، مدل، در صورت عدم حضور بارهای پاسخگو (شکل ۷)، استفاده از یک باتری لیتیومی ۳۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۳۰ و یک باتری سدیم سولفور ۱۴۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۱۵ را با هزینه بهره‌برداری ۳۶۰۸/۸ دلار پیشنهاد می‌دهد. همچنین، با حضور برنامه پاسخگویی بار (شکل ۸)، مدل، استفاده از یک باتری لیتیومی ۲۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۲۶ و یک باتری سدیم سولفور ۱۰۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۱۵ را با هزینه بهره‌برداری ۳۴۳۵ دلار پیشنهاد می‌دهد.

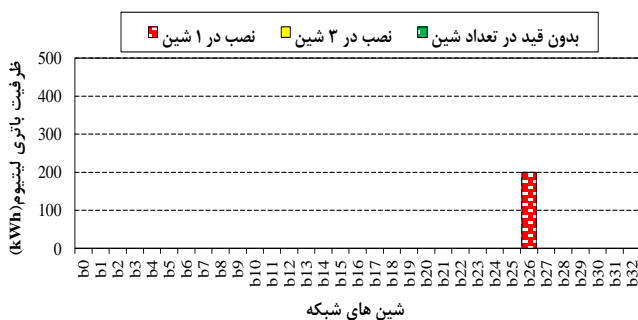


(الف)



(ب)

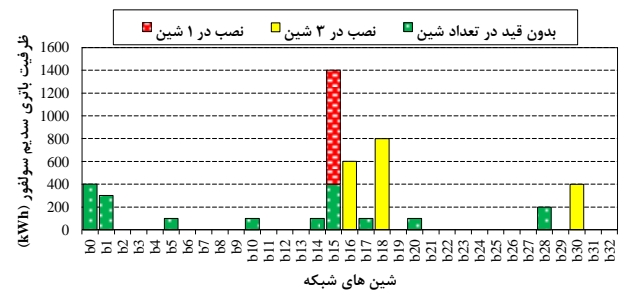
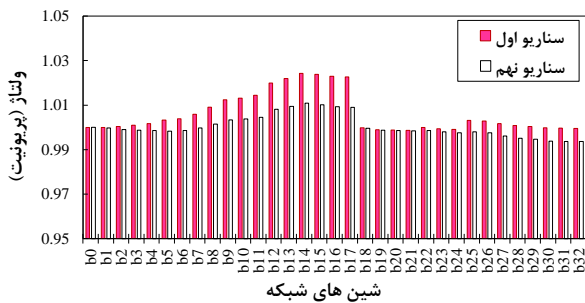
شکل ۷: نتایج حل مسأله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هم‌زمان دو نوع باتری بدون وجود برنامه پاسخگویی بار، (الف) برای باتری لیتیومی (ب) برای باتری سدیم سولفور.



(الف)

جدول ۵: نتایج حاصل از مطالعات موردی (هزینه‌ها بر حسب دلار، ظرفیت باتری بر حسب کیلووات ساعت).

هزینه کاهش بار داوطلبانه (\$)	هزینه ژنراتورهای محلی (\$)	هزینه خرید از بالادست (\$)	هزینه کل باتری ها (\$)	هزینه باتری سدیم سولفور (\$)	هزینه باتری لیتیوم (\$)	ظرفیت باتری سدیم سولفور (kWh)	ظرفیت باتری لیتیوم (kWh)	انرژی سرریز (kWh)	هزینه کل (\$)
---	۵۱۹۷/۵۰	۱۰۲۹/۲	---	---	---	---	---	۴۷۰/۳۵	۵۲۶۹/۰۲
---	۴۲۰۰/۴	۳۵۴/۴	۹۵۴	۹۵۴	---	۱۸۰۰	---	---	۳۴۱۴/۵
---	۴۲۰۸	۳۴۶/۶	۹۵۴	۹۵۴	---	۱۸۰۰	---	---	۳۴۱۶
---	۴۲۲۳/۱	۳۰۷/۳	۱۰۵۷	۷۴۲	۳۱۵	۱۴۰۰	۳۰۰	---	۳۶۰۸/۸
۱۷۴	۴۱۸۸/۳	۳۱۱/۴	۹۵۴	۹۵۴	---	۱۸۰۰	---	---	۳۳۰۰/۹
۱۷۴	۴۱۸۲	۳۱۶/۸	۹۵۴	۹۵۴	---	۱۸۰۰	---	---	۳۳۰۱
۱۷۷	۴۲۲۱	۳۳۵/۴	۷۴۰	۵۳۰	۲۱۰	۱۰۰۰	۲۰۰	---	۳۴۳۵



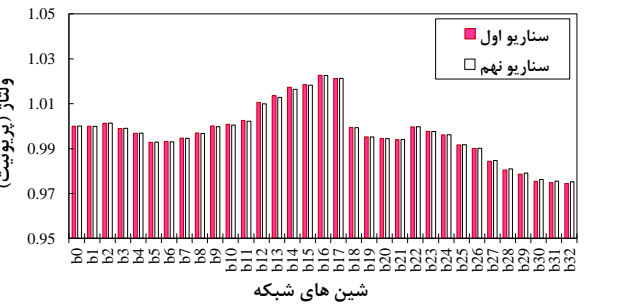
شکل ۱۰: ولتاژ شین‌های شبکه در ساعت ۳ صبح (ساعت کم‌باری) در سناریوهای اول (سناریو با کمترین احتمال وقوع) و نهم (سناریو با بیشترین احتمال وقوع).

شکل ۸: نتایج حل مسأله بهینه‌سازی با در نظر گرفتن هم‌زمان دو نوع باتری با حضور برنامه پاسخگویی بار، الف) برای باتری لیتیومی ب) برای باتری سدیم سولفور.

به‌منظور اطلاع از تأثیر مشارکت باتری‌ها، بارهای پاسخگو، منابع تجدیدپذیر و شبکه بالادست در تأمین بار، شکل ۱۱ در سناریو نهم، (سناریو با بیشترین احتمال وقوع) در حالت استفاده از باتری لیتیومی ۲۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۲۶ و باتری سدیم سولفور ۱۰۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۱۵ و با فرض حضور بارهای پاسخگو در مدار، ترسیم شده‌است.

پروفیل ولتاژ شین‌های شبکه، در شکل‌های ۹ و ۱۰ نشان شده‌است. با توجه به تعداد زیاد شین‌ها، ترسیم ولتاژ برای تمامی زمان‌ها و تمامی سناریوها مقدور نبوده و تنها به دو سناریو با بیشترین و کمترین احتمال برای دو ساعت مربوط به اوج بار و کم‌باری بسنده شده‌است. با توجه به شکل‌های ۹ و ۱۰ می‌توان دریافت که، ولتاژ اغلب شین‌ها در ساعات کم‌باری شبکه، با تقریب خوبی نزدیک به یک پرونیوت می‌باشد. در ساعات اوج بار نیز در بدترین حالت ولتاژ شین‌ها به ۱/۰۲ و ۰/۹۷ پرونیوت رسیده و کماکان در محدوده خود قرار دارد.

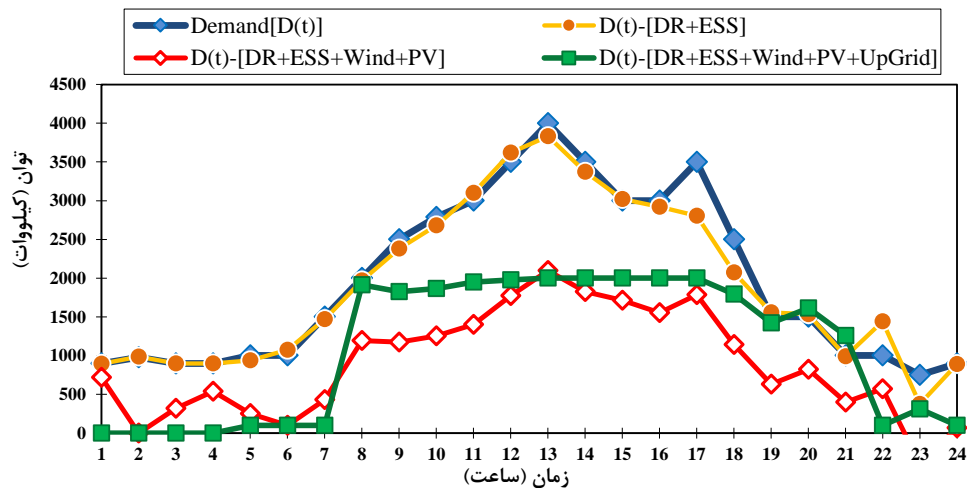
شکل ۱۲ نیز توان تولیدی ژنراتورهای محلی، باتری‌ها، خرید و فروش به شبکه بالادست و وضعیت انرژی باتری‌ها به‌ازای یک شبانه‌روز در سناریو نهم، در حالت استفاده از باتری لیتیومی ۲۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۲۶ و باتری سدیم سولفور ۱۰۰۰ کیلووات ساعتی در شین ۱۵ و با فرض حضور بارهای پاسخگو در مدار را نشان می‌دهد.



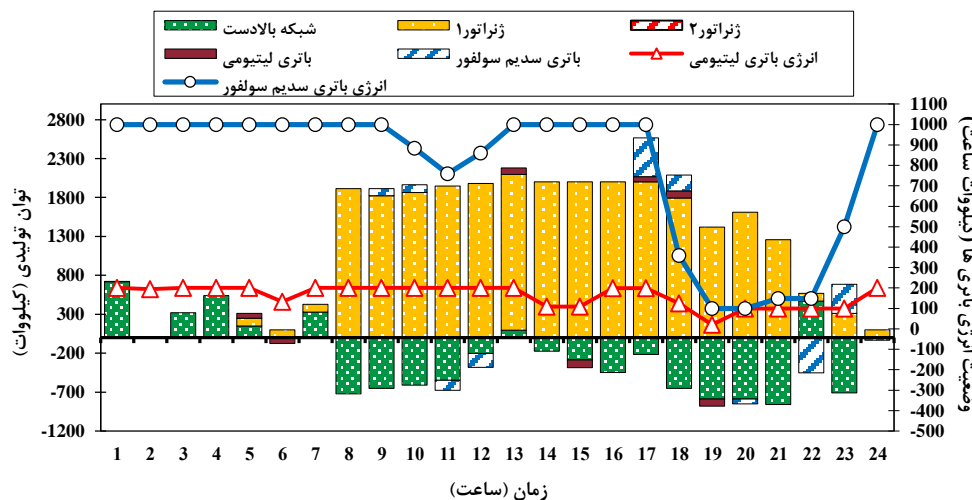
باتوجه شکل ۱۱ و شکل ۱۲ می‌توان اینگونه استنباط کرد که باتری‌ها و بارهای پاسخگو به‌نوعی موجب کاهش پیک بار می‌شوند، این درحالی‌است که با استفاده از مولدهای بادی و سلول‌های فتوولتائیک، پروفیل بار با کاهش نسبی همراه بوده ولی کماکان دارای پستی و بلندی‌های زیادی است. پس از ورود شبکه بالادست مشاهده می‌شود که تقریباً در ساعات ۸ تا ۲۱ این شبکه خود به‌عنوان باری برای ریزشبه محسوب شده و موجب هموارشدن و افزایش پروفیل بار تا محدوده ۲۰۰۰ کیلووات می‌گردد. لازم‌به‌ذکر است که بخش اعظمی از این ۲۰۰۰ کیلووات توسط

شکل ۹: ولتاژ شین‌های شبکه در ساعت ۱۳ (ساعت اوج بار) در سناریوهای اول (سناریو با کمترین احتمال وقوع) و نهم (سناریو با بیشترین احتمال وقوع).





شکل ۱۱: اثر مشارکت باتری‌ها و بارهای پاسخگو، منابع تجدیدپذیر و شبکه بالادست در تأمین بار در سناریوی با بیشترین احتمال وقوع (سناریو نهم).



شکل ۱۲: توان تولیدی ژنراتورهای محلی، باتری‌ها، خرید و فروش به شبکه بالادست و وضعیت انرژی باتری‌ها در یک شبانه‌روز در سناریوی با بیشترین احتمال وقوع (سناریو نهم).

علی‌رغم بازدهی کمتر نسبت به باتری‌های لیتیومی، به دلیل هزینه سرمایه‌گذاری کمتر، دارای مزیت اقتصادی بیشتری می‌باشند. به همین دلیل مدل در شرایط بدون قید در انتخاب نوع باتری برای ریزشبکه، از باتری‌های با تکنولوژی سدیم سولفور استفاده می‌کند.

نتایج حاصل از مطالعات موردی نشان می‌دهند که در حالت کلی:

- مشارکت بارها در برنامه‌های انگیزشی پاسخگویی تا حدی موجب جابجایی محل پیشنهادی محل پیشنهادی برای نصب باتری‌ها و کاهش هزینه‌های بهره‌برداری شده است. هم‌چنین با منظور نمودن بارهای پاسخگو در برنامه‌ریزی سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی، ریزشبکه به سیستم‌های ذخیره‌ساز با ظرفیت انرژی کمتری نیاز دارد.
- نتایج نشان می‌دهند که تأثیر بارهای پاسخگو بیشتر بر ظرفیت بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز بوده است. این در حالی است که در صورت عدم تعیین قید برای تعداد شین جهت نصب

ژنراتور یک تأمین می‌گردد ولی در هر صورت در این سناریو، ژنراتور دوم به دلیل هزینه زیاد و وجود باتری‌ها و بارهای پاسخگو وارد مدار نمی‌شود.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در این مقاله، مدلی خطی جهت تعیین ظرفیت و مکان‌یابی بهینه هم‌زمان دو تکنولوژی مختلف از سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی با منظور نمودن عدم قطعیت‌های مرتبط با منابع تجدیدپذیر و خرابی خط ارتباطی بین ریزشبکه و شبکه بالادست ارائه شده است. این در حالی است که اثر مشارکت بارهای پاسخگو در تعیین ظرفیت و مکان‌های بهینه جهت نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز بررسی شده است.

نتایج نشان می‌دهند که در نظر گرفتن ظرفیت مناسبی از باتری منجر به کاهش هزینه‌های کلی ریزشبکه نسبت به حالت ریزشبکه بدون سیستم ذخیره‌ساز می‌شود. با توجه به هزینه باتری‌های سدیم سولفور و باتری‌های لیتیومی نتایج نشان می‌دهند که باتری‌های سدیم سولفور

$P_{\omega,t}^{Buy}, P_{\omega,t}^{sell}$	توان خریداری/فروخته شده از/ به شبکه بالادستی
$P_{\omega,t}^{Upgrid}$	توان تبادلی ریزشبهک و شبکه بالادستی
$P_{Es,b,\omega,t}^{CH}, P_{Es,b,\omega,t}^{DCH}$	ظرفیت توان شارژ/دشارژ ذخیره‌ساز هر شین
$SOC_{Es,b,\omega,t}$	سطح ظرفیت انرژی سیستم ذخیره‌ساز هر شین
$P_{Es,b}^{Install}$	توان نصب‌شده سیستم ذخیره‌ساز هر شین
$P_{b,\omega,t}^{GEN}, Q_{b,\omega,t}^{GEN}$	توان اکتیو/راکتیو تولیدی هر شین
$P_{L,\omega,t}^{Line}, Q_{L,\omega,t}^{Line}$	توان اکتیو عبوری از خطوط
$P_{b,\omega,t}^D, Q_{b,\omega,t}^D$	بار اکتیو/راکتیو هر شین
$V_{b,\omega,t}^{Bus}$	ولتاژ شین‌ها
$S_{L,\omega,t}^{Line}$	توان ظاهری عبوری از خطوط
$DR_{r,\omega,t}, DR_{r,\omega,t}^{COST}$	ظرفیت و هزینه کاهش بار فراهم‌شده توسط بارهای پاسخگو
$S_{max}^{Line}$	حداکثر توان ظاهری عبوری از خطوط ریزشبهک
$P_i^{max}, P_i^{min}$	حداکثر/حداقل توان تولیدی ژنراتورها
$T_{i,min}^{on}, T_{i,min}^{off}$	حداقل زمان روشن/خاموش ماندن واحد
$a_i, b_i$	ضرایب توابع هزینه ژنراتورها
$X_{i,t}$	متغیر باینری روشن یا خاموش بود واحد
$X_t^{buy}, X_t^{sell}$	متغیر باینری خرید/فروش از شبکه بالادست
$X_{\omega,t}^{main}$	متغیر باینری وضعیت خط ارتباطی ریزشبهک و شبکه بالادست
$U_{Es,b,t}^{ch}, U_{Es,b,t}^{dch}$	متغیر باینری شارژ/دشارژ سیستم ذخیره‌ساز
$U_{Es,b}^{Install}$	متغیر باینری مربوط به نصب ذخیره‌ساز در هر شین
$u_{r,\omega,t}^k$	متغیر باینری مربوط به پله‌های پیشنهادی قیمت
$E^{MAX}, E^{MIN}$	حداکثر/حداقل انرژی سیستم ذخیره‌ساز
$y(t)$	خروجی سری زمانی
$e(t)$	تابع خطا(نویز سفید)
$\pi_{\Omega}$	احتمال وقوع سناریوها
$\eta_{Es}^{ch}, \eta_{Es}^{dch}$	بازده شارژ/دشارژ سیستم ذخیره‌ساز
$\alpha, \kappa$	ضرایب خطای پیش‌بینی بار و رزرو شبکه
$r_L, X_L$	مقاومت و راکتانس خطوط
$N_{Install}, N_{ESS}$	تعداد شین/تکنولوژی جهت نصب سیستم ذخیره‌ساز
$N_t, N_g, N_{\Omega}, N_r$	تعداد دوره‌ی زمانی، ژنراتورها، سناریوها و بارهای پاسخگو

### مراجع

- [1] A. A. Akhil, G. Huff, A. B. Currier, B. C. Kaun, D. M. Rastler, S. B. Chen, A.L.Cotter, D.T.Bradshaw, and W.D. Gauntlett, *DOE/EPRI 2013 electricity storage handbook in collaboration with NRECA: Sandia National Laboratories Albuquerque, NM, USA, 2013.*

باتری، با در نظر گرفتن پاسخگویی سمت تقاضا مدل پیشنهادی تعداد شین بیشتری را جهت نصب سیستم‌های ذخیره‌ساز پیشنهاد می‌دهد.

- با تعیین محدودیت برای تعداد شین جهت نصب باتری‌ها، هزینه بهره‌برداری از ریزشبهک افزایش یافته ولی در صورتی که هزینه‌های سرمایه‌گذاری از جمله هزینه خرید مکان جهت نصب باتری‌ها لحاظ شود، ممکن است نصب ذخیره‌سازها در شین‌های کمتر مقرون به صرفه باشد.
- در صورتی که از ریزشبهک بدون حضور سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی استفاده شود و در همین حین هم ارتباط با شبکه بالادست قطع گردد، بخشی از انرژی‌های تجدیدپذیر سرریز شده و از تمام پتانسیل سیستم‌های تجدیدپذیر موجود در ریزشبهک نمی‌توان استفاده نمود.
- در مطالعه انجام‌شده نقش مثبت سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی در آریترتاز انرژی و پوشش برخی از عدم قطعیت‌های ریزشبهک مشخص است.

### سپاس‌گزاری

نویسندگان مقاله مراتب قدردانی خود را از حمایت دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل از طریق اعتبار پژوهشی شماره BNUT/۳۷۰۴۴۵/۹۷ اعلام می‌دارند.

### پیوست‌ها

#### اندیس‌ها

$i$  اندیس ژنراتورهای ریزشبهک  
اندیس زمان، شین، سناریو، خط، نوع سیستم ذخیره‌ساز

#### پارامترها

$r$  نرخ بهره  
 $MTTF, MTTR$  میانگین زمان باقی‌مانده تا خرابی/تعمیر تجهیز  
 $MAPE$  درصد خطای پیش‌بینی  
 $FC, MC$  هزینه خرید/تعمیر و نگهداری سیستم ذخیره‌ساز  
 $T_{Fail}, T_{Repair}$  زمان باقی‌مانده تا خرابی، زمان موردنیاز تعمیر تجهیز  
 $TCPD_{Es}$  هزینه به‌روزرشده سالیانه سیستم ذخیره‌ساز  
 $CE$  ظرفیت انرژی سیستم ذخیره‌ساز  
 $D_t, Mprice_t$  بار شبکه/قیمت بازار در هر زمان  
 $P_{i,\omega,t}^G, Q_{i,\omega,t}^G$  توان اکتیو/راکتیو تولیدی ژنراتورها  
 $SC_{i,\omega,t}^G$  هزینه راه‌اندازی ژنراتورها  
 $R_{i,\omega,t}^G, RP_i$  ظرفیت و هزینه تأمین رزرو ساعتی ژنراتورها  
 $P_{\omega,t}^{Wind}, P_{\omega,t}^{Pv}$  توان تولیدی مولد بادی/فتوولتاییک  
 $SR_{\omega,t}$  ذخیره ریزشبهک

- [13] Conejo, Antonio J., Miguel Carrión, and Juan M. Morales, "Decision making under uncertainty in electricity markets", vol.1, Springer, 2010.
- [14] Estimate parameters of ARMAX model using time-domain data, 2017, <https://www.mathworks.com/help/ident/ref/armax.html>.
- [15] Billinton, Roy, and Ronald Norman Allan, "Reliability Evaluation of Engineering Systems", Plenum press, 1992.
- [16] A. Iga and Y. Ishihara, "Characteristics and Embodiment of the Practical use Method of Monthly Temperature Coefficient of the Photovoltaic Generation System," IEEJ Transaction on Power Energy, vol. 126, no. 8, pp. 767-775, 2006.
- [17] A. Zakariazadeh, S. Jadid, P. Siano, "Smart Microgrid Energy and Reserve Scheduling with Demand Response using Stochastic Optimization," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 63, pp. 523-533, Dec. 2014.
- [18] H. G. Yeh, D. F. Gayme and S. H. Low, "Adaptive VAR Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 27, no. 3, pp. 1656-1663, Aug. 2012.
- [19] Zhaoyu Wang, Bokan Chen, Jianhui Wang, M. Begovic and Chen Chen, "Coordinated Energy Management of Networked Microgrids in Distribution Systems," IEEE Power & Energy Society General Meeting, Denver, CO, pp. 1 -1, 2015.
- [20] M. Baran and F. F. Wu, "Optimal Sizing of Capacitors Placed on a Radial Distribution System," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 1, pp. 735-743, Jan 1989.
- [21] M. E. Baran and F. F. Wu, "Network Reconfiguration in Distribution Systems for Loss Reduction and Load Balancing," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 4, no. 2, pp.1401-407, Apr 1989.
- [22] Z. Wang, H. Chen, J. Wang and M. Begovic, "Inverter-Less Hybrid Voltage/Var Control for Distribution Circuits With Photovoltaic Generators," IEEE Transactions on Smart Grid, vol.5, no. 6, pp. 2718-2728, Nov. 2014.
- [23] T. Akbari, M. Tavakoli Bina, "Linear Approximated Formulation of AC Optimal Power Flow Using Binary Discretisation," IET Generation, Transmission & Distribution, 10.5, pp.1117-1123, 2016.
- [24] Pacific Northwest National Laboratory, "National assessment of energy storage for grid balancing and arbitrage", (the U.S. Department of Energy, 2013).
- [25] Y. Yang, H. Li, A. Aichhorn, J. Zheng and M. Greenleaf, "Sizing Strategy of Distributed Battery Storage System With High Penetration of Photovoltaic for Voltage Regulation and Peak Load Shaving," in IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 5, no. 2, pp. 982-991, March 2014.
- [26] H. Alharbi, "Optimal Planning and Scheduling of Battery Energy Storage Systems for Isolated Microgrids," Ph.D. dissertation, Dept. Electrical and Computer Engineering. Univ.Uwspace, 2015.
- [۲] یوسف پورجمال، علی عجمی، «یک روش جدید برای جابجایی منابع تولید پراکنده در سیستم‌های توزیع با هدف کاهش تلفات و افزایش قابلیت اطمینان»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۴۲، شماره ۲، ۱۳۹۰.
- [3] A. Khodaei, S. Bahramirad and M. Shahidehpour, "Microgrid Planning Under Uncertainty," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no. 5, pp. 2417-2425, Sept. 2015.
- [4] Y. Zheng, Z. Y. Dong, F. J. Luo, K. Meng, J. Qiu and K. P. Wong, "Optimal Allocation of Energy Storage System for Risk Mitigation of DISCOs With High Renewable Penetrations," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 29, no. 1, pp. 212-220, Jan. 2014.
- [5] S. X. Chen, H. B. Gooi and M. Q. Wang, "Sizing of Energy Storage for Microgrids," IEEE Transactions on Smart Grid, vol. 3, no. 1, pp. 142-151, March 2012.
- [6] M. Nick, R. Cherkaoui, and M. Paolone, "Optimal Siting and Sizing of Distributed Energy Storage Systems via Alternating Direction Method of Multipliers," International Journal of Electrical Power & Energy Systems, vol. 72, pp. 33-39, 2015.
- [۷] علی مهدی‌زاده، نوید تقی‌زادگان، «برنامه‌ریزی تصادفی ریزشبکه جزیره‌ای در حضور سیستم ذخیره‌ساز هیدروژنی و برنامه پاسخگویی بار»، مجله مهندسی برق دانشگاه تبریز، جلد ۷۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۶.
- [8] M. Ghofrani, A. Arabali, M. Etezadi-Amoli and M. S. Fadali, "A Framework for Optimal Placement of Energy Storage Units Within a Power System With High Wind Penetration," IEEE Transactions on Sustainable Energy, vol. 4, no. 2, pp. 434-442, April 2013.
- [9] Y. M. Atwa and E. F. El-Saadany, "Optimal Allocation of ESS in Distribution Systems With a High Penetration of Wind Energy," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 25, no. 4, pp. 1815-1822, Nov. 2010.
- [10] M. Sedghi, A. Ahmadian and M. Aliakbar-Golkar, "Optimal Storage Planning in Active Distribution Network Considering Uncertainty of Wind Power Distributed Generation," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 31, no. 1, pp. 304-316, Jan 2016.
- [11] S. Wogrin and D. F. Gayme, "Optimizing Storage Siting, Sizing, and Technology Portfolios in Transmission-Constrained Networks," IEEE Transactions on Power Systems, vol. 30, no.6, pp. 3304-3313, Nov. 2015.
- [12] 'NREL: Western Wind Resources Dataset', 2016, <https://www.nrel.gov/wind/>.

## زیر نویس‌ها

- 1 Probabilistic Optimal Power Flow
- 2 Auto Regressive Moving Average
- 3 Mean Time to Failure
- 4 Mean Time to Repair
- 5 Mean Absolute Percentage Error
- 6 Total Cost Per Day.