نشریه علمی «علوم و فناوری‌های پدافند نوین»
سال یازدهم، شماره ۴، زمستان ۱۳۹۹؛ ص ۴۲۷-۴۱۵

«علمی- پژوهش»

تبیین نقش بازدارنده ذخیره‌سازهای الکتریکی و برنامه‌ریزی واحدهای تولیدی UC با و بدون حضور ذخیره‌سازها از منظر پدافند غیرعامل

سعید عسکری[۱]، حبیب‌الله سهامی[۲*]، عباس علی‌آبادی[۳]

۱- کارشناس ارشد، ۲- استادیار، دانشگاه صنعتی مالک اشتر ۳- دانشیار دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(دریافت: ۹۸/۱۲/۱۵، پذیرش: ۹۹/۰۵/۲۹)

چکیده

فناوری‌های ذخیره‌ساز الکتریکی سطوح متفاوتی از مراحل اولیه تحقیق و توسعه را دارا می‌باشد و امروزه در سامانه‌های قدرت به‌ویژه شبکه قدرت در ایران بسیار مورد توجه برنامه ریزان و بهره‌برداران قرار دارد. به‌دلیل خصوصیت‌های ذاتی شبکه‌های برق و وجود آسیب‌پذیری‌های فراوان و در راستای حفاظت و مصون‌سازی مراکز حیاتی کشور و حفظ اقتصاد و پایداری شبکه‌های برق به‌خصوص در شرایط پیک بار، لزوم استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز در شبکه‌های برق اجتناب‌ناپذیر است. تحقیق حاضر با هدف توسعه استفاده از ذخیره‌سازهای الکتریکی در شبکه توزیع از منظر پدافند غیرعامل انجام شد که جهت تجزیه و تحلیل داده‌ها روش تحلیل محتوا (کیفی) و آمار توصیفی (کمی) انتخاب و نرم‌افزار GAMS به‌عنوان ابزار پردازش اطلاعات و شبیه‌سازی استفاده شده است. بررسی پیک مصرفی کشور نشان می‌دهد سامانه‌های ذخیره‌ساز نسبت به نیروگاه‌ها در جهت پیک‌سایی کاربری بهتر و بهینه‌تری دارند. پس از بررسی ۷ نوع از بهترین باتری‌های کاربردی بر اساس شاخص‌های توان نامی، بازدهی، چگالی، انرژی، تخلیه خودی روزانه و طول عمر، باتری‌های لیتیوم یونی به‌عنوان مناسب‌ترین باتری جهت استفاده در سامانه‌های ذخیره‌سازی معرفی شده‌اند.

کلیدواژه‌ها: شبکه توزیع برق، پدافند غیرعامل، ذخیره‌سازهای انرژی الکتریکی، باتری، GAMS.

Elaborating Deterrent Role and Developing Electric Storage Devices In Distribution Network, Based on Passive Defense Perspective

S. Askari, H. Sahami*, A. Aliabadi
Malek Ashtar University of Technology, Tehran
(Received: 05/03/2020; Accepted: 10/08/2020)

Abstract

Electric storage technologies have different levels of early stages of R&D, and today power systems, especially power grid in Iran, are highly regarded by planners and operators. Because of inherent characteristics of power networks and the presence of many vulnerabillities, using storage systems in power networks is inevitable in order to protect the critical infrastructures and maintain the economy and sustainability of electricity networks. The present study aims to develop the use of electrical storage devices in the distribution network from the passive defense perspective based on (qualitative) and descriptive statistics (quantitative) analysis with help of GAMS software. The country's peak courier survey shows that storage systems have more efficiency compared to power plants. In this investigation, seven types of best-performing batteries are analyzed, based on nominal power indices, efficiency, density, energy, daily insolubility and life span, and Lithium lion batteries are considered to be the most suitable for use in storage systems are introduced as most affordable.

Keywords: Electrical Distribution Network, Passive Defense, Electric Storage Devices, Battery, GAMS

*Corresponding Author E-mail:Hsahami15@gmail.com

۱. مقدمه

انرژی برق اصلی‌ترین و ضروری‌ترین عامل زیربنایی در ایجاد راهبرد و توسعه صنایع در یک کشور می‌باشد. اهمیت برق در زندگی ما به‌قدری زیاد است که گفته می‌شود، برق، قطار تمدن را به‌پیش می‌راند. صنعت برق یکی از صنایع راهبردی و بسیار پویاست که نقش اساسی و محوری در تحقق برنامه‌های توسعه ملی هر کشور ایفاء می‌کند، از این‌رو حکومت‌ها به‌طور سنتی به صنعت برق به‌عنوان یک صنعت پیشرو نگریسته‌اند، از سوی دیگر به‌دلیل اثرات اجتماعی، محیطی و نیاز به حجم بالای سرمایه‌گذاری در این صنعت دولت‌ها سعی نموده‌اند تا آن را به‌صورت متمرکز کنترل نمایند.

اهمیت برق در تولید و اقتصاد کشور از آنجا ناشی می‌شود که صنعت برق در اقتصاد ملی و تأمین رفاه اقتصادی و اجتماعی کشورها ارزش زیادی دارد و جزء چند صنعت مهم زیربنایی است به‌ویژه در صنایع، برق دارای ارزش و منزلت خاصی است زیرا در بیشتر موارد نیروی برق، ماشین‌آلات کارخانه‌ها را به حرکت وا می‌دارد و تمام عملیات و فعالیت‌های تولیدی را امکان‌پذیر می‌کند و به همین دلیل برخی صاحب‌نظران صنعت برق را مادر صنایع دانسته‌اند، بدیهی است تأمین امنیت انرژی و حفاظت از زیرساخت‌های انرژی از وظایف دولت‌ها بشمار می‌رود و ستون فقرات امنیت ملی و دفاع از حاکمیت ملی را تشکیل می‌دهد.

آمار وزارت نیرو نشان از افزایش روز افزون مصرف برق در کشور (سالیانه حدود ۳۰۰۰ مگاوات) دارد که البته بخش قابل توجهی (حدود ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاوات) از این افزایش مصرف صرفاً در زمان پیک ایجاد می‌شود که هر ساله موجب خاموشی‌های مکرر در اکثریت نقاط کشورمان شده است. ایجاد خاموشی‌های طولانی‌تر در کشور علاوه بر خسارت‌های اقتصادی می‌تواند زمینه‌ساز اعتراضات و حتی اغتشاش‌هایی در سطح کشور به‌منظور جلوگیری از صادرات برق در فصل تابستان شود. اقدامات پدافند غیرعامل باید قبل از چنین رخدادهایی اندیشیده و اجرا شوند تا موجب ایجاد شرایط بحرانی در کشور نشود.

با مرور سوابق رخدادهای انسان‌ساخت، نظیر حمله جنگنده‌های عراقی به نیروگاه نکا (۱۹۸۷)، حمله هکرهای کره شمالی به نیروگاه هسته‌ای کره جنوبی (۲۰۱۳)، نفوذ هکرها به نیروگاه‌های انگلیس و اوکراین (۲۰۱۷)، حمله هکرهای ناشناس به نیروگاه هسته‌ای آمریکا (۲۰۱۷)، هشت سال دفاع مقدس، جنگ ۴۲ روزه متحدین علیه عراق، جنگ یازده‌هفته‌ای ناتو علیه یوگسلاوی، جنگ دوم خلیج‌فارس، جنگ ۱۱ روزه اسرائیل علیه لبنان، جنگ ۲۲ روزه غزه و ...مؤید این نظر است که کشور مهاجم جهت در هم شکستن اراده ملّت و توان اقتصادی و نظامی کشور موردتهاجم، ثقل توجه خود را صرف بمباران و انهدام مراکز حیاتی و حساس نموده و لذا مراکزی که در آن اقدامات دفاع غیرعامل منظور نشده باشد خسارت کلان و قابل‌توجهی را متحمل خواهند شد که این امر تأثیرات اجتناب‌ناپذیری در تزلزل امنیت ملّی و ایجاد بحران‌های شدید سیاسی، اقتصادی و اجتماعی خواهد داشت [۱].

به‌کارگیری پدافند غیرعامل در جهت مقابله با تهدیدات به‌منظور تقلیل خسارت ناشی از حملات هوایی و زمینی کشور مهاجم، موضوعی بنیادی و اساسی است که وسعت و گستره آن تقریباً تمامی مراکز حیاتی و آسیب‌پذیر اقتصادی، سیاسی، نظامی، ارتباطی، علمی، فرهنگی، نیروگاه‌ها، قرارگاه‌های فرماندهی، پل‌های راهبردی و راه‌های تدارکاتی، فرودگاه‌ها، بندرها، پالایشگاه‌ها و مجتمع‌های بزرگ صنعتی کشور و ... را در برگرفته و حفظ امنیت ملی، استقلال سیاسی، اقتصادی و دفاعی به نحو چشمگیری وابسته به برنامه‌ریزی همه‌جانبه در موضوع یادشده می‌باشد. امروزه کشورهایی که طعم خرابی و خسارات ناشی از جنگ را چشیده‌اند، برای حفظ سرمایه‌های ملی و منابع حیاتی خود، توجه ویژه‌ای به دفاع غیرعامل نموده و در استراتژی دفاعی خود جایگاه والایی برای آن قائل شده‌اند. نمونه بارز آن کشور کره شمالی است که با اتخاذ سیاست و استراتژی تمرکززدایی، اقدامات بنیادی و اساسی جالب‌توجهی اتخاذ نمود [۲].

در دهه اخیر سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی با انگیزه‌های متفاوتی به‌منظور بهبود عملکرد سامانه قدرت، مورد توجه قرارگرفته‌اند این ذخیره‌سازها یا برق شبکه سراسری را به‌وسیله باتری‌ها یا ابرخازن‌ها ذخیره می‌کنند و در زمان لازم آن را به شبکه باز می‌گردانند یا ذخیره‌سازهای الکتریکی می‌توانند به‌صورت مستقل از شبکه برق سراسری کار کنند و توسط مولدهای طبیعی (خورشید، باد، امواج، سوخت فسیلی و ...) انرژی الکتریکی را ذخیره نماید تا در هر زمان به‌صورت مستقل از شبکه برق کشور قابلیت به‌کارگیری را داشته باشند [۳].

ویلهلم کونیگ از نخستین کسانی بود که در مورد باتری‌ها تحقیقاتی انجام داد، طبق تحقیقات ایشان، اولین باتری ۲۲۰۰ سال پیش توسط امپراتوری اشکانیان ساخته و جهت کاربری‌های مختلفی ازجمله تشخیص طلا، نقره و ... استفاده می‌شد.

با اینکه در دهه هفتاد مفهوم ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی به شکل مغناطیسی موردتوجه قرار گرفت، اما اولین برنامه ذخیره‌سازی در سال ۱۹۷۸ با عنوان "باتری برای کاربردهای خاص خورشیدی" نام‌گذاری شد. این برنامه مبتنی بر انرژی تجدیدپذیر شامل توسعه و آزمایش فناوری باتری پیشرفته، تجزیه

و تحلیل سامانه‌ها و تحقیقات در مورد ادغام باتری با سامانه‌های انرژی فتوولتائیک و باد بود.

در اوایل دهه هشتاد در مقالات و پژوهش‌ها استفاده از انرژی‌های نو با آلایندگی بسیار اندک و همچنین تجدیدپذیری بالا به‌عنوان یک راه‌حل اساسی در زمینه اقتصاد زیستی مطرح گردید، یکی از این انرژی‌ها، انرژی خورشیدی بود، که با توجه به ناپایداری و موقتی بودن آن، ضرورت ذخیره‌سازی را با خود به همراه داشت.

در سال ۱۹۹۱ سازمان انرژی آمریکا شروع به یک برنامه تحقیق جامع و یکپارچه در مورد سامانه ذخیره‌سازی باتری کرد، در آن تحقیقات، مدیران پروژه سازمان انرژی آمریکا پروژه‌های ذخیره‌سازی بسیار موفق را به نمایش گذاشتند که منجر به تولید محصولات تجاری متعددی شد که تعدادی از آنها بیش از ۱۰۰ جایزه تحقیق و توسعه را کسب کردند [۴].

در سال ۱۹۹۶، سازمان انرژی آمریکا تحقیقات باتری‌ها را به تحقیقات ذخیره‌سازی فعلی که مسئولیت توسعه طیف گسترده‌ای از تحقیقات فناوری‌های ذخیره‌سازی نوین مانند فلاش و ذخیره انرژی هوای فشرده (CAES) را به عهده دارد، گسترش داد.

از اوایل قرن ۲۱ در گزارش پروژه‌های ESS، مزایای ذخیره‌سازی انرژی انتشار و توسط کارشناسان ذخیره‌سازی در سراسر جهان به‌طور مرتب مطرح شد، به همین دلیل توجه و تمرکز شرکت‌ها و افراد بیشتری به این موضوع جلب شد.

برنامه کارآفرینی ESS در مشارکت‌های نزدیک با صنعت، دانشگاه‌ها و دولت‌ها، مسائل مربوط به انرژی را از طریق ذخیره‌سازی انرژی در سطح جهانی هدایت می‌کند [۴].

در بسیاری از مراجع که اکثریت از ۲۰۱۰ به بعد انجام‌شده‌اند از باتری‌ها برای مهار اثرات سوء ناشی از منابع تجدیدپذیر بادی و خورشیدی استفاده می‌شود. نتایج این مطالعات نشان می‌دهد که می‌توان از باتری‌ها به‌طور موفقیت‌آمیزی برای حل مشکلات شبکه استفاده نمود و منابع غیرقابل دیسپچ را برنامه‌ریزی کرد [۵-۷].

در سال ۲۰۱۲ در مقالات زیادی به کاربرد باتری‌ها در بحث ذخیره‌سازی توجه شده است، ذخیره‌سازهای انرژی با اهداف مختلفی از جمله جلوگیری از نوسانات شبکه، افزایش کیفیت توان، تنظیم ولتاژ، تعقیب بار، پیک‌سایی، رزرو چرخشی، کاهش بار شبکه انتقال و پشتیبانی از منابع تجدیدپذیر کاربردی شناخته شد [۸].

در سال ۲۰۱۳ در کتاب‌ها و مقالات فراوانی، بررسی باتری‌ها جهت استفاده در شبکه توزیع بیشتر به چشم می‌خورد،در برخی مطالعات تأثیر توسعه دینامیکی شبکه توزیع بر برنامه‌ریزی باتری‌ها نشان داده‌شده و از یک الگوریتم اجتماع ذرات بهبودیافته برای بهینه‌سازی سود برده شد [۹]. در میان انواع مختلف ذخیره‌سازها، باتری‌ها به خاطر ویژگی‌های خاص خود، به‌صورت گسترده‌تری در سطح شبکه توزیع موردتوجه قرارگرفته‌اند.

از سال ۲۰۱۴ تا به‌حال در کشور ما فنّاوری ذخیره‌سازی به خصوص جهت برق‌رسانی به روستاها در اولویت صنعت برق کشور قرار دارد ، با توجه به رشد فنّاوری ذخیره‌سازها در دیگر کشورها، لزوم توجه و پیگیری ذخیره‌سازها در کشور ما به‌خصوص توسط وزارت نیرو ضروری است [۱۰].

همان‌طور که روند تحقیقات نشان داده، توجه به علم ذخیره‌سازی در تمام دنیا و همین‌طور در کشور ما روزبه‌روز بیشتر می‌شود، با توجه به تهدیدات نوینی (سایبری) که صنعت برق را هدف قرار داده و مسائل مختلفی که باعث شده کشور ما همواره در معرض تهدید دشمنان قرار داشته باشد، توسعه و پیشرفت در زمینه ذخیره‌سازی انرژی به‌خصوص توسط دانشگاه‌ها امری ضروری است که متأسفانه ضرورت نیاز به این موضوع از دید پدافند غیرعامل تاکنون مورد غفلت واقع شده است.

۲. روش تحقیق

رخدادهای طبیعی و تهدیدات متفاوت و متنوع از یک طرف، آسیب‌پذیری‌های موجود در صنعت برق، از طرف دیگر باعث می‌شوند که قطع شدن برق سراسری را در شرایط بحران و جنگ، امری اجتناب‌ناپذیر بدانیم، بنابراین، سؤال اصلی این است که جهت تداوم خدمت‌رسانی به مردم و حفظ عملکرد زیرساخت‌های کشور در زمان بحران راه حل چیست؟ چه کاری می‌توان انجام داد که خاموشی‌ها در تابستان‌ها و پیک بالای برق کمتر شود؟

با توجه به ماهیت بین‌رشته‌ای بودن طرح‌های پدافند غیرعامل، به‌منظور تعیین روش تحقیق در این پروژه از سه منبع متفاوت از سه‌طبقه دانش عمومی، هنر و علوم انسانی مورد استفاده شد و در نهایت از روش ترکیبی- توصیفی (تحلیل محتوا) استفاده‌شده است. جهت گردآوری اطلاعات موردنیاز علاوه بر استفاده از منابع کتابخانه‌ای از نرم‌افزار گمز[1] جهت انجام شبیه‌سازی لازم در شبکه استفاده شده است.

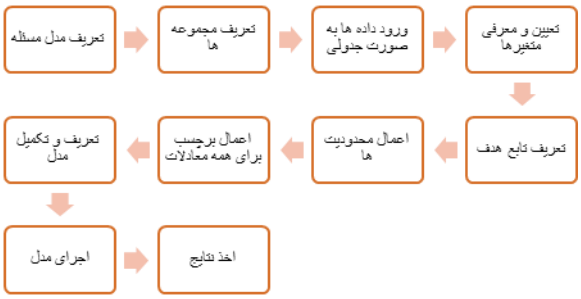
از آنجاکه نرم‌افزار گمز به‌طور خاص برای مدل‌سازی و حل مسائل ریاضی خطی، غیرخطی، مختلط و انواع دیگری از مسائل

[1] GAMS

بهینه‌سازی طراحی‌شده است.، کاربرد ویژه این نرم‌افزار در حل مدل‌های پیچیده و به‌ویژه در مقیاس‌های بزرگ می‌باشد، با وجود اینکه مدل‌هایی که توسط این نرم‌افزار حل می‌شود، دارای حجم

ریاضی استفاده کرده که گمز از ابزارهای بسیار کارآمد حل این نوع مدل‌ها است به همین دلیل جهت شبیه‌سازی‌های مورد نیاز در این پروژه انتخاب شده است.

روش کار نرم‌افزار:



شکل ۱. روش کار نرم‌افزار GAMS

بررسی اقتصادی استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز در شبکه برق با استفاده از این نرم‌افزار مورد تجزیه قرار گرفته و در نهایت نتایج شبیه‌سازی استخراج‌شده تا مورد تحلیل قرار گیرد.

۳. مبانی نظری و علمی تحقیق

۳-۱. بررسی مناسب‌ترین منابع پشتیبان برق

منابع پشتیبان برق جهت کاربردهای فراوان و متفاوتی موردتوجه هستند ازجمله برخی منابع ذخیره انرژی مانند تلمبه ذخیره یا هوای فشرده در حجم زیاد، کار ذخیره‌سازی را انجام می‌دهند و قابلیت پاسخ‌گویی در حجم‌های بالا را دارند. این نوع سامانه‌ها در زمان کمبود منابع می‌توانند از ذخیره خود به‌عنوان نیروی محرکه‌ای جهت تولید انرژی الکتریکی استفاده کنند و مناسب‌ترین محل استفاده از این نوع سامانه‌های ذخیره انرژی در بخش تولید (در نقش نیروگاه) است. برای هر بخش از شبکه تولید، انتقال و توزیع نوع خاصی از منابع پشتیبان برق کاربرد دارد و ازجمله خصوصیات و ویژگی‌هایی که بنا به محل استفاده از سامانه‌های ذخیره‌سازی انتظار می‌رود یک یا چندتای آن‌ها را داشته باشند مواردی را در زیر ارائه داده‌ایم:

- پیک‌سایی و جابه‌جایی زمانی مصرف
- بار خارج از شبکه
- یکپارچه‌سازی منابع عرضه متغیر
- تولید هم‌زمان برق و حرارت
- تنظیم فرکانس

داده بالایی می‌باشند، اما زمانی که صرف پردازش آن‌ها می‌گردد بسیار ناچیز است، به‌علاوه هرجا نیاز به تصمیم‌گیری بهینه با محدودیت زمان، هزینه و منابع داشته باشیم باید از مدل‌سازی

- ذخیره‌سازی فصلی
- تجارت انرژی
- پخش بار
- ولتاژ پشتیبانی
- راه‌اندازی مجدد
- تعویق سرمایه‌گذاری در زیرساخت انتقال و توزیع
- چرخان غیر ذخیره

ذخیره‌سازی انرژی می‌تواند در سراسر بخش‌های سامانه انرژی شامل عرضه، انتقال و توزیع و تقاضای مصرف‌کننده نهایی استفاده شوند. بهترین محل برای استقرار فنّاوری ذخیره‌سازی بستگی به قابلیتی که از آن در فرایند سامانه انرژی از عرضه تا مصرف انتظار می‌رود، دارد. علاوه بر این، تحولات شبکه‌های هوشمند و دیگر فنّاوری‌های جدید در تعیین مکان بهینه این ذخیره‌سازها تأثیرگذار خواهد بود. ذخیره‌سازی انرژی در سه بخش مورد بررسی قرار گرفته است که در هر بخش مقدار و نوع خاصی از سامانه‌های ذخیره‌ساز قابلیت به‌کارگیری دارند که به‌صورت مختصر توضیح می‌دهیم:

➢ بخش تولید

عمدتاً ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای و هوای فشرده برای این منظور مناسب می‌باشند. هدف از ذخیره‌سازی در این بخش کفایت تولید، تبعیض قیمت و یکپارچه‌سازی انرژی‌های تجدیدپذیر، ذخیره‌سازی متمرکز حجم بالایی از انرژی برای خدمات جانبی و مدیریت انرژی است که می‌توان گفت ذخیره‌سازی در این بخش در ابعاد بزرگ قابل انجام است که مناسب‌ترین سامانه‌های ذخیره برای این بخش عبارت‌اند از تلمبه ذخیره‌ای، مخازن ذخیره‌سازی حرارتی، هوای فشرده و نمک مذاب.

➢ بخش انتقال

هدف از ذخیره‌سازی در این بخش را می‌توان خدمات فرهی و کنترل ولتاژ و فرکانس دانست که در این بخش ذخیره‌ساز نقشی واسط بین تولید و توزیع دارد از طرفی در بخش انتقال نیرو عموماً به‌منظور الحاق انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه از ذخیره‌سازهای هوای فشرده و باتری‌ها با هدف ذخیره‌سازی متمرکز و غیرمتمرکز بزرگ برای جابه‌جایی زمانی تولید برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر و به‌طورکلی بهترین نوع سامانه ذخیره‌ساز قابل‌استفاده در این بخش عبارت است از: باتری‌ها، هوای فشرده و

چرخ طیار می‌باشند که نوع باتری مناسب را بر اساس شرایط انتخاب می‌کنند.

- **بخش توزیع**

هدف از ذخیره‌سازی در این بخش مدیریت بار، کنترل ولتاژ، قابلیت اطمینان، جابه‌جایی زمانی (مصرف)، کیفیت انرژی و تأخیر انداختن در سرمایه‌گذاری در ایجاد نیروگاه‌های جدید است که بنا به میزان افزایش سالانه مصرف و مصرف پیک کشور می‌توان مقیاس ذخیره‌سازی در این بخش را متغیر دانست به این صورت که اگر در بخش مصرف مشترکین استفاده کنیم، علاوه بر باتری‌ها، فنّاوری‌های ذخیره‌سازی انرژی حرارتی زیرزمینی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. در صورت استفاده از باتری‌ها، در مقیاس کوچک (حدود ۲ تا ۳ کیلووات ساعت) استفاده می‌شود. درصورتی‌که تصمیم به استفاده از ذخیره‌سازی در مجاورت پست‌ها باشد صرفاً از باتری‌ها و در مقیاس‌های بزرگ استفاده می‌کنیم، در بخش توزیع مناسب‌ترین سامانه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی باتری‌ها هستند که بعد از بررسی‌های فنی – اقتصادی باتری لیتیوم یون به‌عنوان مناسب‌ترین نوع تعیین شده است.

۳-۲. ضروری‌ترین بخش‌ها جهت وجود ذخیره‌سازهای الکتریکی

۳-۲-۱. مراکز حیاتی و حساس

قطع برق حتی به مدت کوتاه در مراکز حیاتی به‌خصوص در زمان بحران غیرقابل‌تحمل می‌باشد و خود می‌تواند باعث افزایش فشار به مردم و عدم خدمت‌رسانی نهادهای مختلف شود، به همین دلیل پیش‌بینی منبع پشتیبان بدون وقفه، برای مراکز حیاتی و حساس، امری ضروری است تا در صورت قطعی برق بتوانند مدت‌زمانی را خدمات‌دهی کنند تا مشکل رفع شود، در صورت قطعی چندثانیه‌ای یک مرکز حساس مانند صداوسیما، مراکز کنترل و فرماندهی، پایگاه نظامی، بیمارستان و ... ممکن است آسیب‌های جبران‌ناپذیری به ساختار کشور وارد شود.

۳-۲-۲. مراکز راهبردی در عمق زمین

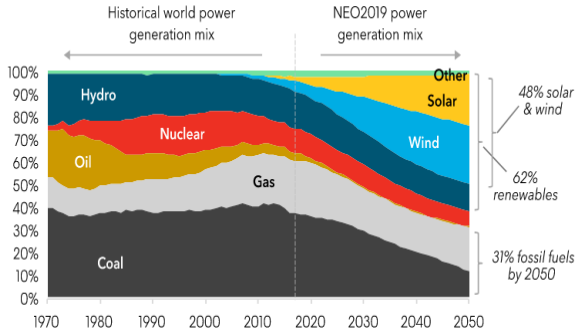
برخی از مراکز دارای اهمیت ویژه‌ای در جهت حفظ امنیت ملی کشور به‌خصوص در زمان جنگ و بحران هستند که آن‌ها را به زیر سطح زمین برده‌اند تا حفاظت از آن‌ها در برابر عوامل دشمن بهتر انجام شود. ایجاد فضای مناسب در عمق زمین برای برخی مراکز، محافظت آن‌ها را در برابر شناسایی دشمن، زلزله، حملات تروریستی و ... کامل‌تر کرده و عملکرد آن‌ها را در شرایط بحرانی ممکن می‌سازد. با این وجود یکی از تهدیدات اصلی برای شبکه برق بمب‌های EMP هستند که مقابله با آن در سطح کل شبکه توزیع (به‌دلیل وسیع و گسترده بودن) غیرممکن است و حتی تأسیسات برقی سازه‌های زیرزمینی در برابر این نوع بمب‌ها کاملاً بدون دفاع هستند. بمب‌های الکترومغناطیس بهترین گزینه برای حمله به مراکز زیرزمینی هستند زیرا چنین سنگرهایی به‌وسیله موشک‌ها و بمب‌های معمولی، قابل‌انهدام نیستند. یک پالس الکترومغناطیسی رهاشده از بمب الکترومغناطیسی می‌تواند از لایه‌های زمین عبور کرده و موجب قطع برق مراکز زیرزمینی شود حال تنها راه محافظت مراکز زیرزمینی در برابر بمب‌های EMP عایق کردن کامل تأسیسات، تجهیزات و کابل‌ها در مراکز زیرزمینی در برابر الکترومغناطیس با استفاده از روش‌های شناخته‌شده تابه‌حال مانند، قفس فارادی است؛ که در این روش‌ها عبور سیم‌های برق و اتصال تأسیسات داخلی به شبکه‌های سراسری بزرگ‌ترین نقطه‌ضعف آن‌هاست زیرا که پالس‌های الکترومغناطیس در کمتر از یک میکرون ثانیه تمامی سیم‌ها و تأسیسات متصل را از کار انداخته و سبب عدم کارکرد آن‌ها می‌شود. حال در صورت استفاده از ذخیره‌سازهای الکتریکی در مراکز زیرزمینی، در شرایط جنگی بعد از شارژ شدن باتری‌ها می‌توانیم آن‌ها را نسبت به برق سراسری مجزا کرده و در آن شرایط بدون اتصال به شبکه سراسری از عملکرد آن استفاده ببریم. به‌این‌ترتیب که بخش حیاتی مرکز (مثل مراکز داده‌ها) به همراه سامانه ذخیره‌ساز را با روش قفس فارادی در برابر پالس‌های الکترومغناطیس محافظت نمود، کلیه کابل‌ها و سیم‌کشی‌ها را با عایق‌های ساخته‌شده پوشش داده تا در صورت هرگونه اتفاق، مرکز زیرزمینی کاملاً سالم مانده و عملکردش به‌طور کامل محافظت شود. از آنجا که مراکز حیاتی زیرزمینی اکثراً سامانه‌های کم‌مصرف در زمینه برق هستند این امکان را می‌سازد که با یک ذخیره‌ساز باتری برای چندین ساعت کارکرد مناسب داشته باشند، بنابراین، در شرایط عادی این سامانه به‌طور کامل شارژ شده و در زمان ایجاد خطر از شبکه سراسری جداشده و مرکز مورد نظر به آن وصل خواهد شد و از الکتریسیته آن استفاده می‌کند.

۳-۲-۳. همراه با مولدهای انرژی تجدیدپذیر (نو)

با توجه به کاهش روزافزون هزینه‌های تولید برق تجدیدپذیر، باید به دنبال روشی برای دائمی و پایدار بودن آن باشیم، حدود ۶۸ ٪ انرژی الکتریکی تولیدی در دنیا با استفاده از سوخت‌های فسیلی می‌باشد که از این مقدار، سهم هر یک از سوخت‌ها به ترتیب زغال‌سنگ ۴۲ ٪ ، گاز طبیعی ۲۱ ٪ ، نفت ۵ ٪ و ۳۲ ٪ باقیمانده مربوط به هسته‌ای ۲۱ ٪ ، هیدرو ۱۵ ٪ و ۳ ٪ باقیمانده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشد [۱۱]. این در حالی

است که از ۲۸۰ تراوات ساعت برق تولیدی در کشور حدود ۹۰ ٪ از طریق انرژی حرارتی می‌باشد. درصورتی‌که متوسط دی‌اکسید کربن تولیدی به ازای هر کیلووات ساعت برق ۷۰۰ گرم می‌باشد، می‌توان گفت که انتشار ۱۷۶ میلیون تن دی‌اکسید کربن از طریق تولید انرژی و در نیروگاه‌های کشور می‌باشد [۱۲].

انتظار می‌رود تا سال ۲۰۵۰ و با پیشرفت روزافزون انرژی‌های تجدیدپذیر به مرور زمان پروژه‌های خورشیدی و بادی در برخی کشورها مانند هند و آمریکا، برقی به ارزانی برق تولیدی ارزان‌ترین نیروگاه‌های زغال‌سنگی تولید کنند.(شکل ۲)



شکل ۲. مقایسه بهای استفاده از انواع انرژی

روشی که شرکت تسلا در شهر آدلاید استرالیا امتحان کرده، به نتایج خوبی رسیده است. با نصب یک شبکه از باتری‌های لیتیوم-یونی در این شهر، در زمان ارزان بودن برق، آن‌ها را شارژ کرده و در زمان اوج مصرف، برق موجود را به شبکه برمی‌گرداند.

سامانه ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی با توان مشخص قادر است انرژی الکتریکی را به مدت تعیین‌شده ذخیره نماید و این سامانه‌ها می‌توانند با مولدهای انرژی متنوعی همچون توربین‌های بادی، پانل‌های فتوولتائیک و ... به‌صورت هیبرید یا مجزا کار کنند.

۳-۲-۴. مراکز صنعتی

تعداد مشترکین صنعتی حدود ۲۳۶ هزار و مقدار مصرف آن‌ها حدود ۸۴ میلیون مگاوات ساعت است که با تقسیم مصرف بر تعداد مشترک به‌طور میانگین مصرف هر یک واحد صنعتی حدود ۳۵۶ مگاوات ساعت به‌دست می‌آید، بااینکه برخی صنایع میزان مصرف بالاتر از این عدد دارند (مانند مجتمع فولاد اصفهان میانگین ۶۰۰ مگاوات ساعت مصرف برق دارد) ولی عدد میانگین مصرف صنایع ۳۵۶ مگاوات‌ساعت می‌باشد با این وجود، این عدد برای صنعت برق کشور عدد بزرگی است و باید در زمان پیک این مصرف تا حد ممکن کاهش یابد، این عدد نشان‌دهنده تأثیر مصرف برق صنایع بر کل مصرف برق کشور و تنظیم پیک بار می‌باشد. درحالی‌که کمتر از یک درصد از مشترکین صنعت برق را صنایع تشکیل می‌دهند، برق صنعتی مصرفی در کشور ما، بین ۳۱ تا ۳۵ درصد کل مصرف برق می‌باشد بنابراین، رعایت مصرف بهینه توسط صنایع می‌تواند کمک شایانی به پایین آمدن پیک بار به‌خصوص در فصل تابستان داشته باشد. همان‌طور که منابع مختلف نشان می‌دهند از سال ۷۶ تا ۹۷ هر چه جلوتر می‌آییم تعداد کارخانه‌ها و صنایع بیشتری وارد چرخه تولید و کار شده‌اند و به‌تبع آن، حداکثر مصرف پیک را افزایش می‌دهند که جهت آمادگی برای رفع نیاز برق در اوج پیک نیاز است که مولدها و نیروگاه‌های بیشتر و با توان بالاتری همیشه آماده تولید باشند که تنها در زمان‌های پیک بار با راندمان مناسب کار می‌کنند و در باقی زمان یا غیرفعال می‌شوند یا با راندمان پایین کار می‌کنند، در این شرایط نیروگاه‌ها بازدهی کمی دارند و فشار اقتصادی زیادی به کشور وارد می‌کنند، درصورتی‌که این کارخانه‌ها و صنایع در زمان کم باری فعالیت کمتری دارند و در طول روز که پیک بار بالایی داریم فعالیت و کارکرد بالاتری دارند؛ بنابراین، اگر برق مصرفی این کارخانه‌ها و صنایع در زمانی که کم باری (پیک پایین) داریم ذخیره شوند و در روزها و زمان‌های پیک بار استفاده شوند این فشار پیک کاهش می‌یابد و حداکثر بار مصرفی در روز حداکثر نیاز مصرف کاهش خواهد یافت، این کار ازیک‌طرف باعث می‌شود، کارخانه‌دار بابت برق مصرفی در زمان پیک بار هزینه کمتری بپردازند چون از برق ذخیره‌شده در زمان ارزانی، استفاده می‌کند، دوم اینکه تعادل بیشتری در پیک و غیر پیک ایجاد می‌شود و نوسان حداکثر پیک نسبت به زمان‌های دیگر کاهش می‌یابد که این امر باعث می‌شود که نیروگاه‌ها و مولدهای تولید انرژی کمتری در حالت آماده‌باش قرار داشته باشند.

۳-۲-۵. بخش مصارف خانگی

میزان مصرف برق یک خانواده در یک منطقه با شرایط آب‌وهوایی میانگین متوسط، در یک شبانه‌روز، در فصل نوسانات، محاسبه‌شده است؛ که بر اساس بررسی‌های انجام‌شده در شرایط عادی خانواده‌ها به‌طور میانگین حدود ۵۲ کیلووات در روز انرژی مصرف دارند که بخش زیادی از این مصرف در پیک مصرفی قرار دارد و برای مردم هزینه بالایی را رقم میزند. بر اساس آخرین مصوبه وزارت نیرو در سال ۱۳۹۵ میزان بهای برق را در حوزه مصرف عمومی در جدول (۱) آورده‌ایم.

جدول ۱. بهای برق مصارف عمومی [۱۳]

تعرفه	قدرت بیش از ۳۰کیلووات			قدرت ۳۰ کیلووات و کمتر		
	بهای انرژی(ریال /kwh)			بهای انرژی(ریال /kwh)		
	کم‌باری	میان‌باری	اوج‌بار	کم‌باری	میان‌باری	اوج‌بار
مسکونی	۲۷,۵	۵۵۷	۱۱۱۴	۴۹۰	۷۲۱	۱۴۴۲

در جدول بالا به‌خوبی تفاوت بین بهای برق در ساعات کم باری، میان‌باری و اوج بار مشخص است. در ابتدا با عدم استفاده از وسایل پرمصرف در زمان پیک که تا حدودی قابل‌اجراست مثلاً می‌توان از ماشین لباس‌شویی یا اتو در زمان غیر پیک استفاده کرد اما نیاز مداوم به برخی وسایل، این امکان را به ما نمی‌دهد و درهرصورت لازم است که در زمان پیک برق که مصرف در کل کشور در آن زمان بالاست و برق، قیمت بالایی هم دارد به کار گرفته شوند مثل کولرگازی که یک وسیله با مصرف برق بالا است که نمی‌توان زمان پیک بار آن را خاموش کرد، بنابراین، برای این‌گونه دستگاه‌ها و کمک به مصرف بهینه و اقتصاد خانواده‌ها و کشور بهترین راه ذخیره‌سازی برق در زمان غیر پیک و استفاده از آن در زمان پیک بار است.

۳-۲-۶. در مجاورت پست برق

در زمان و شرایط عادی بهترین محل برای قرار دادن سامانه‌های ذخیره‌ساز در مجاورت پست برق است زیرا که استفاده از سامانه‌های ذخیره انرژی در شبکه توزیع در بخش مصرف‌کننده‌ها زمانی صرفه اقتصادی خواهد داشت که شبکه هوشمند باشد و سامانه بتواند با شبکه سراسری به‌راحتی مبادله انرژی و خریدوفروش انرژی را داشته باشد.

بنابراین، یکی از مناطقی که لازم است از ذخیره‌سازهای الکتریکی استفاده شود در محدوده پست‌های حیاتی کشور می‌باشد. درصورتی‌که شبکه به ذخیره‌ساز الکتریکی مجهز باشد به‌محض بالا رفتن پیک بار (در حدی که پیک از محدوده مجازی که تعریف می‌شود عبور کند) و یا ازکارافتادن پست و یا ژنراتور، ذخیره‌ساز که در زمان عادی و پیک پایین انرژی لازم را ذخیره کرده، بدون وقفه وارد مدار می‌شود و برق شبکه را برای مدت‌زمان لازم تأمین می‌کند.

مقدار بهینه سامانه ذخیره انرژی الکتریکی (BESS) در شبکه، از ۵۰۰ تا ۱۵۰۰ مگاوات تعیین شده است، از منظر پدافند غیرعامل یکی از راهکارهای محافظت از زیرساخت‌ها پراکنده‌سازی آنها است از طرفی جهت پوشش دادن تعداد مناطق بیشتر در شرایط بحرانی این ظرفیت را در تعدادی از مهم‌ترین و حیاتی‌ترین پست‌های برق کشور تقسیم می‌کنیم.

۳-۳. نحوه قرارگیری ذخیره‌سازها در شبکه برق

با توجه به مطالب ارائه‌شده در بخش‌های قبل، جهت قرارگیری سامانه‌های BESS در شبکه، بخش توزیع نسبت به بخش تولید و انتقال دارای اولویت و بازدهی بالاتری می‌باشد. BESS در شبکه توزیع جهت عملکردهای مختلفی به‌کار گرفته می‌شود ازجمله:

۱- مراکز حیاتی و حساس کشور
۲- مراکز راهبردی و زیرزمینی
۳- در مناطقی که انرژی تجدیدپذیر استفاده می‌کنند.
۴- صنعت
۵- مصارف خانگی
۶- ایستگاه‌های برق

همان‌طور که بیان شده، موارد ۱ تا ۵ ازجمله مناطقی هستند که وجود سامانه‌های BESS در حدی که قطع برق باعث بروز بحران در آنها نشود، ضرورت دارد.

به‌طورکلی، ایستگاه‌های برق به‌عنوان مناسب‌ترین بخش جهت قرارگیری سامانه‌های BESS تعیین‌شده‌اند، با محاسبات انجام‌شده، مقدار ذخیره‌ساز موردنیاز در شبکه توزیع جهت پیک‌سایی، حدود ۵۰۰ تا۱۵۰۰ مگاوات است.

ایستگاه‌های برق کشور با توجه به اهمیت، نقش و عملکردی که در شبکه دارند از اولویت بالاتری جهت قرارگیری سامانه‌های ذخیره‌ساز برخوردارند از این‌رو ظرفیت BESS مورد نیاز شبکه را بین حیاتی‌ترین ایستگاه‌های برق به ترتیب اولویت و اهمیت تقسیم می‌کنیم (به‌دلیل طبقه‌بندی داشتن اطلاعات مربوط به اولویت‌بندی ایستگاه‌های برق نام ایستگاه‌ها قابل‌ارائه نیست).

با لحاظ نمودن شاخص‌هایی ازجمله وضعیت تأمین بودجه، توانایی شرکت‌های تولیدکننده در ساخت و تحویل، منابع در اختیار، ضرورت و میزان نیاز به سامانه‌های ذخیره‌ساز و ...، درصدی از ظرفیت که در توان کشور ما باشد را هر سال به شبکه تزریق کرده که با مطالعات انجام‌شده حداکثر ۲۰ درصد از مصرف پیک بار شبکه، قابل تأمین می‌باشد که به این صورت بعد از چند سال کل ظرفیت موردنیاز جهت پیک‌سایی را در شبکه تأمین کرده‌ایم.

پراکنده‌سازی ازجمله الزامات پدافند غیرعامل جهت مراقبت و مصون‌سازی زیرساخت‌ها و مراکز می‌باشد از این‌رو ظرفیت BESS موردنیاز در شبکه را به ترتیب اولویت بین ایستگاه‌های برق حیاتی کشور تقسیم کرده و متناسب با ارزش و اهمیت هر یک از ایستگاه‌ها بخشی از ظرفیت را در مجاورت آن قرار خواهیم داد.

۳-۳-۱. بهترین نوع باتری قابل‌استفاده

با توجه به موارد مربوط به فنّاوری باتری‌ها که در فصل دوم به‌طور کامل شرح داده‌شده است، مشخصات اصلی ۷ نوع از باتری‌ها به شکل بسیار مختصر استخراج‌شده و در جدول زیر

آورده‌ایم که متناسب با کارکرد مورد نیاز از باتری‌ها، نوع مناسب باتری‌ها را انتخاب می‌کنیم.

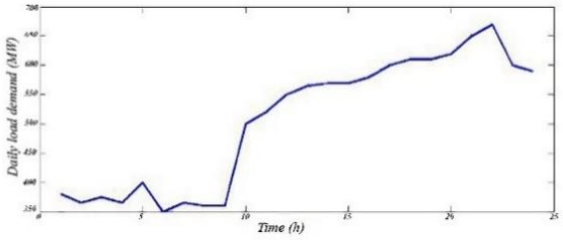
جدول ۲. مشخصات فنی باتری‌ها [۱۵،۱۴]

نوع باتری	توان نامی (MW)	بازدهی(%)	چگالی انرژی (Wh/kg)	تخلیه خودی روزانه (%)	طول عمر (سال)	قیمت ($/kwh)
Na-S	۰٫۰۰۵-۸	۷۵-۹۰	۱۵۰-۲۵۰	۲۰	۱۰-۱۵	۳۰۰-۵۰۰
Ni-Cd	≤۴۰	۶۰-۷۳	۱۵-۳۰۰	۰٫۲-۰٫۶	۱۰-۲۰	۸۰۰-۱۵۰۰
Li-ion	۱-۱۰۰	۸۵-۹۵	۱۵۰-۳۵۰	۰٫۱-۰٫۳	۵-۱۵	۶۰۰
VRFB	۰٫۰۳-۳	۶۵-۸۵	۱۰-۳۵	ناچیز	۵-۱۰	۶۰۰
Zn-Br	۰٫۵-۲	۶۰-۷۰	۳۰-۸۵	ناچیز	۵-۱۰	۵۰۰
ZEBRA	۵۰	۸۶-۸۸	۱۰۰-۱۴۰	۱۵	۱۵	۱۵۰۰
Lead-acid	≤۲۰	۷۰-۹۰	۳۰-۵۰	۰٫۱-۰٫۲	۵-۱۵	۳۳۰

با توجه به ویژگی‌ها و قابلیت‌های دارای اهمیت برای باتری‌ها که در بخش‌های قبل آورده‌ایم و مشخصات انواع باتری‌ها که در جدول (۲) مشخص‌شده، باتری لیتیوم یون با بازدهی ۹۵-۸۵ درصد و چگالی انرژی ۳۵۰-۱۵۰ وات‌ساعت بر کیلوگرم، (به کمک نرم‌افزار گمز) بهینه‌ترین نوع باتری جهت ذخیره‌سازی برق انتخاب شد.

۴. تجزیه و تحلیل و ارائه مدل

جهت نشان دادن کارایی ذخیره‌سازهای انرژی در این پروژه، علاوه بر آنالیز قابلیت اطمینان (میزان قطعی بار)، کارایی ذخیره‌سازهای انرژی در پیک‌سایی و کاهش هزینه‌های شبکه (بررسی اقتصادی) مورد بررسی قرار گرفت، با توجه به نمودار بار روزانه تغییرات تقاضای مصرف در طول یک شبانه‌روز از حدود ۳۵۰ تا ۷۰۰ مگاوات در شبکه انتخاب شده، متغیر است و پیک بار نسبت به میانگین تقاضا فاصله زیادی دارد (شکل ۳).



شکل ۳. نمودار بار روزانه (مگاوات/ ساعت)

۶ ژنراتور حرارتی به همراه یک مولد بادی برای تأمین بار مورد نیاز شبکه استفاده می‌شود، حال در چنین شبکه‌ای بررسی فنی، اقتصادی حضور و عدم حضور ذخیره‌سازهای الکتریکی مورد ارزیابی قرار گرفت.

مشخصات واحدهای حرارتی شبکه در جدول زیر مشاهده می‌شود، در ادامه تعریف مختصری از پارامترهای موجود در جدول آورده‌ایم.

جدول ۳. اطلاعات ۶ واحد حرارتی [۱۶]

واحد	A	B	C	Pmin	Pmax	SU	SD	MUT	MDT
۱	۰٫۰۶۹	۲۶٫۲۴	۳۱٫۶۷	۵	۳۰	۴۰	۰	۱	۱
۲	۰٫۰۶۹	۲۶٫۲۴	۳۱٫۶۷	۵	۳۰	۴۰	۰	۱	۱
۳	۰٫۰۶۹	۲۶٫۲۴	۳۱٫۶۷	۵	۳۰	۴۰	۰	۱	۱
۴	۰٫۰۱۹	۱۲٫۸۸	۶٫۷۸	۱۵۰	۳۰۰	۴۴۰	۰	۱۰	۱۰
۵	۰٫۰۱۹	۱۲٫۸۸	۶٫۷۸	۱۵۰	۳۰۰	۱۱۰	۰	۱۰	۱۰
۶	۰٫۰۶۹	۲۶٫۲۴	۳۱٫۶۷	۱۰	۳۰	۱۵	۰	۱	۱

a_i ،b_i ،c_i: ضرایب هزینه واحدهای حرارتی / SU: هزینه روشن ماندن واحد حرارتی / SD: هزینه خاموش ماندن واحد حرارتی / MUT: حداقل زمان روشن ماندن واحد / MDT: حداقل زمان خاموش ماندن واحد. قابل‌ذکر است که در این تحقیق عدم قطعیت توان تولیدی واحد بادی لحاظ نشده است و تنها با اتکا بر داده‌های تاریخی بر اساس مرجع [۱۶] توان خروجی واحد بادی لحاظ می‌گردد که در جدول (۴) قابل مشاهده است.

جدول ۴. توان تولیدی واحد بادی (مگاوات)

ساعت	توان	ساعت	توان
۱	۵۱/۳۹۵	۱۳	۱۰۲/۵
۲	۴۰/۸۸۴	۱۴	۱۰۲/۵
۳	۵۴/۱۳۷	۱۵	۱۰۲/۵
۴	۵۷/۸۴۷	۱۶	۱۰۲/۵
۵	۸۰/۳۹۶	۱۷	۱۰۲/۵
۶	۲۲/۶۰۴	۱۸	۱۰۲/۵
۷	۴۲/۷۶۴	۱۹	۱۰۲/۵
۸	۳۰/۱۸۱	۲۰	۸۳/۳۳۶
۹	۱۰۲/۵	۲۱	۴۹/۰۰۶
۱۰	۱۰۲/۵	۲۲	۷/۲۶۷
۱۱	۱۰۲/۵	۲۳	۸/۳۴
۱۲	۱۰۲/۵	۲۴	۹/۵۱۴

۴-۱. بررسی اقتصادی حضور و عدم حضور ذخیره‌سازهای الکتریکی در شبکه توزیع برق

گام اول: تعریف تابع هدف

تابع هدف که با کمی تغییر بر اساس مرجع [۱۶] در نظر گرفته‌شده، جهت حداقل کردن هزینه بهره‌برداری و هزینه روشن و خاموش ماندن واحدهای حرارتی است:

$$\text{Min} = \sum_t \left(\sum_i \left[c_i + b_i P_i(t) + a_i P_i^2(t) + SU_i + SD_i\right] + \sum_{j=1} P_{c,j}(t)\lambda(t)\right) \quad (۱)$$

- در رابطه بالا $P_i(t)$ توان تولیدی واحد i ام در زمان t ام است.
- ضرایب c_i، b_i و a_i، ضرایب هزینه واحد حرارتی i ام هستند.
- جملات دوم و سوم در تابع هدف، هزینه روشن و خاموش ماندن واحد حرارتی را نشان می‌دهند.
- جمله آخر تابع هدف مربوط به هزینه انرژی خریداری‌شده توسط ذخیره‌ساز است.
- $P_{c,j}$ میزان توان خریداری‌شده جهت شارژ است.
- $\lambda(t)$ قیمت خرید و فروش برق در لحظه t ام.
- هزینه بهره‌برداری از توربین بادی برابر صفر در نظر گرفته شده است.

گام دوم: معرفی قیود مسئله

- قید تعادل: در هرلحظه از شبانه‌روز باید توان تولیدی از واحدهای موجود با توان مورد تقاضای مشترکین برابر باشد.

$$\sum_i P_i(t) + P_{wind}(t) \pm P_{storage}(t) = \sum_l P_{Load_l}(t) \qquad \forall\, t=1,....24 \quad (۲)$$

در رابطه بالا $P_{wind}(t)$ توان توربین بادی، $P_{storage}(t)$ توان ذخیره‌ساز که در حالت دشارژ با علامت مثبت و در حالت شارژ با علامت منفی است و P_{Load_l} بار مصرفی است.

- قیود بهره‌برداری از واحدهای حرارتی شامل حداقل و حداکثر توان تولیدی، حداقل زمان روشن و خاموش ماندن: (واحدهای حرارتی را نمی‌توان سریع از مدار خارج کرد و همچنین نمی‌توان آن‌ها را روشن کرد. فرضاً وقتی حداقل زمان خاموش ماندن یک واحد ۲ ساعت است، یعنی برای روشن کردن مجدد آن باید از آخرین زمانی که خاموش شده است ۲ ساعت گذشته باشد).

$$P_i^{\min}(t) \le P_i(t) \le P_i^{\max}(t) \quad (۳)$$

$$MUT_i \;\; (u_i(t) - u_i(t-1)) \le T_i^{on} \quad (۴)$$

$$MDT_i \;\; (u_i(t-1) - u_i(t)) \le T_i^{off} \quad (۵)$$

در رابطه‌های "۴ و ۵"، $u_i(t)$ و $u_i(t-1)$ متغیر باینری در زمان t و t-۱ هستند که در صورت یک بودن به معنی روشن بودن واحد حرارتی و در صورت صفر بودن به معنای خاموش بودن آن است. T_i^{on} و T_i^{off} مدت‌زمان روشن و خاموش ماندن واحد i ام است

- قیود مربوط به ذخیره‌ساز انرژی: شامل حداقل و حداکثر توان شارژ و دشارژ شده، حالت شارژ (SoC) و تفکیک کردن حالت‌های شارژ و دشارژ از همدیگر (ذخیره‌ساز نمی‌تواند هم‌زمان هم شارژ کند و هم دشارژ شود لذا باید این دو حالت کاری از همدیگر تفکیک شوند که به کمک دو پارامتر باینری این دو حالت کاری از همدیگر تفکیک شده است).

$$SOC^{\min} \le SOC(t) \le SOC^{\max} \quad (۶)$$

$$P_{\text{dis.storage}}^{\min} x_d \le P_{storage} \le P_{\text{dis.storage}}^{\max} x_d \quad (۷)$$

$$P_{\text{char.storage}}^{\min} x_c \le -P_{storage} \le P_{\text{charstoraget}}^{\max} x_c \quad (۸)$$

$$x_d + x_c = 1 \quad (۹)$$

در رابطه (۷-۹)، x_d و x_c همان پارامترهای باینری هستند که برای جداسازی حالت شارژ و دشارژ به کار می‌روند. هرکدام که یک باشند متناسب با آن قید مربوطه حداکثر و حداقل توان شارژ و دشارژ رعایت می‌شود. به‌طور مثال اگر در حالت شارژ باشیم ($x_c = 1$) قید (۸) فعال‌شده و قید (۷) در نظر گرفته نمی‌شود.

- به‌منظور جلوگیری از تأثیر برنامه‌ریزی یک روز بر روی روزهای دیگر، لازم است که SOC باتری در ابتدا و انتهای دوره برنامه‌ریزی برابر باشد که این قید نیز به‌صورت رابطه (۷) مدل‌سازی می‌شود.

$$SOC(end) = SOC_0 \quad (۱۰)$$

گام سوم: بررسی نتایج

برای بررسی نتایج دو حالت را در نظر می‌گیریم که در زیر آمده است. در حالت اول فرض بر این است که ذخیره‌ساز انرژی حضور ندارد و برنامه‌ریزی را برای این حالت انجام می‌دهیم

- در حالت دوم برنامه‌ریزی در حضور ذخیره‌سازهای الکتریکی انجام‌شده و برآورد هزینه و سود حاصل محاسبه شد.

بعد از قرار دادن ذخیره‌ساز در شبکه برق، در ساعاتی تأمین برق شبکه علاوه بر مولد بادی و مولدهای حرارتی توسط ذخیره‌ساز نیز انجام می‌شود از این‌رو، توان‌های تولیدی مولدهای حرارتی نسبت به حالت قبل تغییر خواهند کرد.

۵. نتایج و بحث

برای حالت اول که ذخیره‌ساز انرژی موجود نیست، توان تولیدی واحدهای حرارتی جهت پاسخ‌گوی بار شبکه با رعایت تمامی قیود اعمال شده، مطابق جدول (۵) به‌دست آمد.

جدول ۵. توان تولید ۶ واحد حرارتی بدون در نظر گرفتن ذخیره‌ساز

	واحد ۱	واحد ۲	واحد ۳	واحد ۴	واحد ۵	واحد ۶
۱	۱۱/۱۱۵	۰	۱۱/۱۱۵	۱۵۰	۱۵۰	۱۱/۱۱۵
۲	۵	۰	۵	۱۵۹/۱۱۳	۱۵۹/۱۱۳	۱۰
۳	۰	۰	۰	۱۶۲/۷۱	۱۶۲/۷۱	۰
۴	۰	۰	۰	۱۶۳/۳۳	۱۶۳/۳۳	۰
۵	۰	۰	۰	۱۵۷/۳۹	۱۵۷/۳۹	۰
۶	۰	۰	۰	۱۷۴/۶۱۳	۱۷۴/۶۱۳	۰
۷	۰	۰	۰	۱۵۶/۴۸	۱۵۶/۴۸	۰
۸	۰	۰	۰	۱۶۸/۸۶۵	۱۶۸/۸۶۵	۰
۹	۰	۰	۰	۱۹۸/۳۴	۱۹۸/۳۴	۰
۱۰	۰	۰	۰	۲۰۲/۰۰۵	۲۰۲/۰۰۵	۰
۱۱	۰	۰	۰	۲۱۰/۰۳۵	۲۱۰/۰۳۵	۰
۱۲	۰	۰	۰	۲۱۶/۶	۲۱۶/۶	۰
۱۳	۰	۰	۰	۲۲۲/۵۷	۲۲۲/۵۷	۰
۱۴	۰	۰	۰	۱۷۵/۰۹۲	۱۷۵/۰۹۲	۰
۱۵	۰	۰	۰	۲۲۳/۹۴	۲۲۳/۹۴	۰
۱۶	۰	۰	۰	۲۲۹/۳۸۵	۲۲۹/۳۸۵	۰
۱۷	۰	۰	۰	۲۳۶/۲۱۵	۲۳۶/۲۱۵	۰
۱۸	۰	۰	۰	۲۴۱/۹۷۵	۲۴۱/۹۷۵	۰
۱۹	۰	۰	۰	۲۵۶/۶۷۵	۲۵۶/۶۷۵	۰
۲۰	۰	۰	۰	۲۸۳/۲۸۲	۲۸۳/۲۸۲	۰
۲۱	۰	۸/۳۹۳	۰	۲۹۹/۲۰۶	۲۹۹/۲۰۶	۱۰
۲۲	۰	۲۳/۳۹۳	۱۵	۳۰۰	۳۰۰	۲۵
۲۳	۰	۱۰/۳۲۷	۱۰/۳۲۷	۳۰۰	۳۰۰	۱۰،۳۲۷
۲۴	۰	۰	۵	۲۹۷/۹۲۸	۲۹۷/۹۲۸	۰

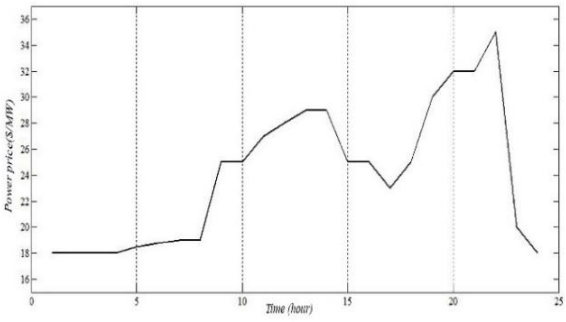
از جدول (۲) (پارامترهای هزینه واحدهای حرارتی)، می‌توان دریافت که ژنراتورهای ۱،۲،۳ و ۶ ژنراتورهای گران‌قیمتی هستند. لذا در صورت روشن ماندن هزینه زیادی را به شبکه تحمیل خواهند کرد. در این حالت که سامانه فاقد ذخیره‌ساز الکتریکی است، هزینه کل شبکه بر اساس تابع تعریف‌شده و با رعایت تمامی قیود (قید تعادل، قیود بهره‌برداری از واحدهای حرارتی شامل حداقل و حداکثر توان تولیدی و حداقل زمان روشن و خاموش ماندن) برابر ۱۶۵۹۷۹،۵ دلار محاسبه شده است.

در حالت دوم برنامه‌ریزی در حضور ذخیره‌ساز انرژی صورت می‌گیرد. در جدول (۶) مشخصات ذخیره‌سازی که در شبکه به کار گرفته شد، مشاهده می‌شود.

جدول ۶. ویژگی‌های ذخیره‌ساز موردنظر

راندمان λ(٪)	SOC^{min}/SOC^{max} (%)	ظرفیت (MW)	حداقل و حداکثر توان شارژ یا دشارژ (MW)	حداقل زمان شارژ و دشارژ (hr)
۹۰	۹۰-۲۰	۱۰۰	۵۰	۲

همان‌طور که بیان شد، هدف اصلی ذخیره‌ساز، ذخیره کردن انرژی در ساعت‌های کم باری و تحویل آن در ساعت پیک بار است. قیمت برق متناسب با تغییرات بار مصرفی کم و زیاد می‌شود، در شکل (۴) این موضوع به‌خوبی قابل مشاهده است.



شکل ۴. منحنی قیمت روزانه خرید و فروش برق (مگاوات/ دلار)

جهت پاسخگویی به رشد بار بعد از قرارگیری ذخیره‌ساز با رعایت تمامی قیود و لحاظ نمودن قیمت خرید و فروش برق در شبکه مطابق نمودار ۴-۲، نتایج به‌دست‌آمده برای توان تولیدی واحدهای حرارتی و میزان توان شارژ و دشارژ شده ذخیره‌ساز به شکل جدول (۷) تغییر کرد.

- هزینه بهره‌برداری از واحدهای حرارتی شبکه در این حالت برابر ۱۶۲۴۸۳٫۶ دلار است. هزینه خرید برق توسط ذخیره‌ساز نیز برابر ۱۹۹۱٫۳۹ دلار است. لذا هزینه کلی در حالت حضور ذخیره‌ساز برابر ۱۶۴۴۷۵ دلار است؛ یعنی بیش از ۱۵۰۰ دلار هزینه کمتر در طول یک شبانه‌روز (۵۵۰ هزار دلار در هر سال) انجام‌شده که این فقط بخشی از سود حاصل از پیک‌سایی توسط ذخیره‌سازها است.

علاوه بر صرفه اقتصادی ناشی از پیک سایی، در صورت استفاده از ذخیره‌ساز در شبکه نیازی به وجود نیروگاه‌های ۳۰ مگاواتی شماره ۲ و ۳ و ۶ که نیروگاه‌های پرهزینه‌ای نیز بوده‌اند، نداریم.

جدول ۷. توان تولید واحدها در حضور ذخیره‌ساز انرژی

شارژ	دشارژ	واحد ۶	واحد ۵	واحد ۴	واحد ۳	واحد ۲	واحد ۱	
۰	۳۳/۳۴۶	۰	۱۵۰	۱۵۰	۰	۰	۰	۱
۰	۵	۰	۱۶۹/۱۱۳	۱۶۹/۱۱۳	۰	۰	۰	۲
۳۲/۹۳۵	۰	۰	۱۶۲/۷۱۱	۱۶۲/۷۱۱	۰	۰	۰	۳
۳۱/۰۹۲	۰	۰	۱۶۳/۱۳	۱۶۳/۱۳	۰	۰	۰	۴
۰	۰	۰	۱۵۷/۳۹	۱۵۷/۳۹	۰	۰	۰	۵
۰	۰	۰	۱۷۴/۶۱۳	۱۷۴/۶۱۳	۰	۰	۰	۶
۰	۰	۰	۱۶۵/۴۸	۱۶۵/۴۸	۰	۰	۰	۷
۰	۰	۰	۱۶۸/۸۶۵	۱۶۸/۸۶۵	۰	۰	۰	۸
۰	۰	۰	۱۹۸/۳۴	۱۹۸/۳۴	۰	۰	۰	۹
۰	۰	۰	۲۰۲/۰۰۵	۲۰۲/۰۰۵	۰	۰	۰	۱۰
۰	۰	۰	۲۱۰/۰۳۵	۲۱۰/۰۳۵	۰	۰	۰	۱۱
۰	۰	۰	۲۱۶/۶	۲۱۶/۶	۰	۰	۰	۱۲
۰	۰	۰	۲۲۲/۵۷	۲۲۲/۵۷	۰	۰	۰	۱۳
۰	۰	۰	۱۷۵/۰۹۲	۱۷۵/۰۹۲	۰	۰	۰	۱۴
۰	۰	۰	۲۲۳/۹۴	۲۲۳/۹۴	۰	۰	۰	۱۵
۰	۰	۰	۲۲۹/۳۸۵	۲۲۹/۳۸۵	۰	۰	۰	۱۶
۰	۰	۰	۲۳۶/۲۱۵	۲۳۶/۲۱۵	۰	۰	۰	۱۷
۰	۰	۰	۲۴۱/۹۷۵	۲۴۱/۹۷۵	۰	۰	۰	۱۸
۰	۰	۰	۲۵۶/۶۷۵	۲۵۶/۶۷۵	۰	۰	۰	۱۹
۰	۰	۰	۲۸۳/۲۸۲	۲۸۳/۲۸۲	۰	۰	۰	۲۰
۰	۵	۰	۳۰۰	۳۰۰	۰	۰	۱۱/۸۰۴	۲۱
۰	۴۷	۰	۳۰۰	۳۰۰	۰	۰	۱۶/۴۳۶	۲۲
۰	۱۴/۵	۰	۳۰۰	۳۰۰	۰	۰	۱۶/۴۳۶	۲۳
۴۶/۶۰۶	۰	۰	۲۷۹/۹۲۸	۲۷۹/۹۲۸	۰	۰	۵	۲۴

۵-۱. محاسبه هزینه تمام‌شده (LCOE[1]) برای ذخیره‌ساز (BESS) به‌کار رفته در شبکه

یکی از مطالعات مهم در حوزه اقتصاد انرژی، محاسبه قیمت تمام‌شده برای هر یک از حامل‌های اولیه و یا ثانویه انرژی (به‌طور خاص، انرژی الکتریکی) است. وجود یک روش و الگوی جامع که بتواند قیمت واقعی انرژی را همراه با جزئیات آن محاسبه و تحلیل نماید، این‌روش از مهم‌ترین ابزارهای تحلیلی در اقتصاد انرژی است که به‌ویژه در صنعت برق یکی از مهم‌ترین چالش‌ها و نیازهای این صنعت می‌باشد، در این بخش هزینه هم‌تراز یا LCOE برای ذخیره‌ساز به‌کاررفته مورد بررسی قرار گرفت. رابطه (۱۱) بر اساس مرجع [۱۶] به‌عنوان معادله اصلی جهت محاسبه هزینه هم‌تراز شده در نظر گرفته شد.

$$LCOE = \frac{ALCC}{yearly\ operating\ hours} = \frac{C_{LCC,a}}{n \times h}(€/kWh) \qquad (۱۱)$$

LCOE: هزینه یکنواخت یا هم‌تراز شده برحسب سنت بر کیلووات ساعت

ALCC[2]: هزینه چرخه کارکرد

[1] Levelized cost of electricity
[2] Annualized life cycle costs

CLCC,a: هزینه سرمایه‌گذاری کلی

n: عمر ذخیره‌ساز برحسب سال

h: ساعت

در گام اول مشخصات باتری مورد استفاده در جدول (۸) ارائه‌شده است.

جدول ۸. مشخصات باتری استفاده‌شده

پارامتر	مقدار
طول عمر	۷ سال
هزینه سرمایه اولیه	۷۰۰ $/kWh
هزینه تعمیر و نگهداری	۲ درصد هزینه سرمایه‌گذاری برای هر سال
نرخ بهره	۲۰ درصد
راندمان باتری	۹۰ درصد

روابط مربوط به محاسبه LCOE برای ذخیره‌سازها در مطالعاتی که به بررسی تطبیقی هزینه چرخه عمر سامانه‌های ذخیره ساز انرژی الکتریکی پرداخته اند به‌طور کامل ارائه‌شده است[۱۷]. بر اساس توضیحات ارائه‌شده در این منابع، ابتدا لازم است هزینه کلی سرمایه‌گذاری با در نظر گرفتن نرخ بهره به‌صورت سالیانه محاسبه شود برای این کار ابتدا ضریب بازگشت سرمایه (CRF) به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$CRF = \frac{i(1+i)^T}{(1+i)^T - 1} \quad (۱۲)$$

در این رابطه i نرخ بهره بوده و T طول عمر ذخیره‌ساز می‌باشد. با در نظر گرفتن نرخ بهره ۲۰ درصد و طول عمر ۷ سال برای باتری، مقدار CRF به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$CRF = \frac{0.2(1+0.2)^7}{(1+0.2)^7 - 1} = 0.2774$$

هزینه سرمایه‌گذاری بر اساس داده‌های جدول (۷) می‌باشد.

$$TCC = 700 \times 1000 = 700{,}000 \ \$/MWh$$

با استفاده از CRF، سرمایه‌گذاری سالیانه به‌صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$C_{cap,a} = TCC \times CRF\left(\frac{€}{kW} - yr\right) \quad (۱۳)$$

$$C_{cap,a} = 700 \times 10^3 \times 0.2774 = 194200 \ \$$$

نتایج بالا نشان می‌دهد که سرمایه‌گذاری اولیه (TCC) به مبلغ ۷۰۰ هزار دلار، معادل ۱۹۴۲۰۰ دلار بر مگاوات ساعت سرمایه‌گذاری سالیانه می‌باشد.

همان‌طور که اشاره شد، هزینه تعمیرات دو درصد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه در نظر گرفته‌شده است. با در نظر گرفتن هزینه سالیانه تعمیر و نگهداری سامانه ($C_{o\&M,a}$)، هزینه سرمایه‌گذاری کلی ($C_{LCC,a}$) به‌صورت زیر به‌دست می‌آید:

$$C_{LCC,a} = C_{cap,a} + C_{O\&M,a}\left(\frac{€}{kW} - yr\right) \quad (۱۴)$$

$$C_{LCC,a} = 194200 + 0.02 \times 700{,}000 = 208200 \ (\$/MWh)$$

درنهایت LCOE برای ذخیره‌ساز با در نظر گرفتن اینکه ذخیره‌ساز در هر شبانه‌روز ۸ ساعت مورد بهره‌برداری قرار گرفت، به‌صورت رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$LCOE = \frac{208200}{365 \times 8} = 71.3014 \quad (\$/MWh)$$

بر اساس این توضیحات و داده‌های ارائه‌شده در جدول۸، مشخص است که مقدار LOCE برای ذخیره‌ساز استفاده‌شده در این کار برابر ۷۱/۳۰۱۴ دلار بر مگاوات ساعت، معادل ۷/۱۳ سنت بر کیلووات ساعت به‌دست می‌آید.

در این بخش با کم کردن هزینه انرژی جهت ذخیره‌سازی در باتری (شارژ باتری) از LCOE در نهایت LCOS حاصل می‌شود.

$$\text{LCOS} = \text{LCOE} - \frac{\text{Price of charging power}}{\text{overall efficiency}} \ (€/\text{kwh}) \quad (۱۵)$$

از آنجا که برق در کم باری (قیمت پایین) مورد ذخیره‌سازی قرار می‌گیرد، بنابراین، مطابق نمودار قیمت بار و زمان‌های شارژ باتری در شبکه مدل شده، دو قیمت برای انرژی موجود است، ۱۸ دلار و ۲۲ دلار به ازای هر مگاوات

قیمت شارژ به ازای هر مگاوات: (به‌طور متوسط) ۲۰ دلار و قیمت شارژ به ازای هر مگاوات ساعت: ۰/۵۵ دلار

راندمان باتری استفاده شده: ۹۰ درصد

LCOE : ۷۱/۳۰۱۴ دلار بر مگاوات ساعت

$$\text{LCOS} = 71.3014 - \frac{0.55}{0.9} = ۷۰.۶۹ \ (\$/\text{MWh}) = 7.069 \ (\text{ct/kwh})$$

این‌روش علاوه بر الگوریتم محاسبات دقیق، قابلیت مقایسه نتایج حاصل را برای فناوری‌های مختلف در اختیار قرار می‌دهد. ازاین‌رو نتیجه حاصل‌شده برای ذخیره‌ساز با نتایج حاصل برای سایر فناوری‌ها از مطالعات مختلف که به بررسی تطبیقی هزینه چرخه عمر سامانه‌های ذخیره ساز انرژی الکتریکی پرداخته اند،

مقایسه شده است.

هزینه تمام‌شده انرژی (هم‌تراز) در فناوری سیکل ترکیبی (۷٫۳ ct/kWh)، فنّاوری زغال‌سنگ (۶/۸ ct/kWh تا ۸/۷)، فنّاوری هسته‌ای (۸/۳ ct/kWh تا ۱۰/۵)، فنّاوری بادی (۸/۳۸ ct/kWh تا ۱۲/۱۵) تعیین شده [۱۷] و بر اساس محاسبات انجام‌شده در این پروژه، هزینه هم‌تراز فنّاوری باتری در شبکه به‌کار رفته ct/kWh ۷/۰۶ به‌دست‌آمده است، لذا به‌وضوح مشخص است که هزینه هم‌تراز برای باتری‌ها نسبت به سایر فناوری‌ها جهت کاربرد مورد نظر مقرون به‌صرفه‌تر و پایین‌تر است.

۶. نتیجه‌گیری

به‌دلیل خصوصیت‌های ذاتی شبکه‌های برق و وجود آسیب‌پذیری‌های فراوان در آنها، انواع رویدادهای انسان‌ساخت و طبیعی همواره آن را تهدید می‌کنند، به همین دلیل در جهت مصون‌سازی مراکز حیاتی، حساس و راهبردی و مراکز نظامی و زیرزمینی کشور برای شرایط بحرانی و جهت حفظ اقتصاد و پایداری شبکه‌های برق در تمامی زمان‌ها به‌خصوص در شرایط پیک بار، استفاده از سامانه‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی در شبکه‌های برق ضروری است.

از ابتدایی‌ترین الزامات پدافند غیرعامل رعایت اصل پراکنده‌سازی است، بنابراین، بخشی از ظرفیت تعیین‌شده برای ذخیره‌سازها در کنار مولدهای خورشیدی و باقی ظرفیت در کنار پست‌های با اهمیت بالای کشور به‌صورت پراکنده قرار می‌گیرد.

۷. مرجع‌ها

[1] Mashhadi, H. “Providing Model for Infrastructure Vulnerability Assessment in the Country”; M.Sc. Thesis, Malek Ashtar University of Technology, 2012 (In Persian).

[2] Senjyu, T.; Shimabukuro, K.; Uezato, K; Funabashi, T. “A Technique for Thermal and Energy Storage System Unit Commitment”; IEEE Power & Energy Society General Meeting 2005, 1, 601-606.

[3] Deptt. Of Energy.“ Energy Storage Systems ”; sandia.gov, 2017 [Online]. Available: https://www.sandia.gov/ess-ssl/energy-storage-systems-history/.

[4] Marra, F.; Yang, G.; Traeholt, C.; Ostergaard, J.; Larsen, E. “A Decentralized Storage Strategy for Residential Feeders with Photovoltaics”; IEEE Trans. Smart Grid 2014, 5(2), 974-981.

[5] Tant, J. “Multi objective Battery Storage to Improve PV Integration in Residential Distribution Grids”; IEEE Power & Energy Society General Meeting 2013, 4, 182–191.

[6] Ahmadian, A.; Golkar, M.; Sedghi, M. “Optimal Storage Planning in Active Distribution Network Considering Uncertainty of Wind Power Distributed Generation”; IEEE Trans. Power System. 2016, 31, 304–316.

[7] Diaz-Gonzalez, F. “A Review of Energy Storage Technologies for Wind Power Applications”; Renew. Sust. Energ. Rev. 2012, 16, 21-54.

[8] Golkar, M.; Sedghi, M. “Distribution Network Expansion Considering Distributed Generation and Storage Units Using Modified PSO Algorithm”; Int. J. Elec. Power 2013, 52, 221–230.

[9] Ministry of Energy. “New Approaches to the Ministry of Energy”; Ministry of Energy Public Relations and Information Center 2016 (In Persian).

[10] Ministry of Energy. “Detailed Statistics of the Iranian Power Industry for Strategic Management”; Tavanir Motherhood Corporation 2018 (In Persian).

[11] Jun, L; Yang, A. “Electrochemical Energy Storage for Green Grid”; Chem. Rev. 2011, 111(5), 3577–3613.

[12] David, G.; Reuben, C.; Martin, G. “Solar Energy Conversion Toward 1 Terawatt”; Harnessing Materials for Energy MRS Bulletin 2008, 33(4) 355-364.

[13] Ministry of Energy. “General Terms and Conditions for General Purposes”; Approved by the Ministry of Energy 2017 (In Persian).

[14] Dooner, M.; Clarke, J.; Xing, L. “Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation”; Appl. Energy 2015, 137, 511-536.

[15] Anindita, R.; Shireesh, B. K.; Santanu B. “Optimum Sizing of Wind-Battery Systems Incorporating Resource Uncertainty”, Appl. Energy 2010, 87(8), 2712-2727.

[16] Abbaspour, M.; Satkin, M.; Mohammadi-Ivatloo, F.; Hoseinzadeh L.; Noorollahi, Y. “Optimal Operation Scheduling of Wind Power Integrated with Compressed Air”; Renew. Energ. 2013, 51, 53-59

[17] Zakeri, B.; Syri, S. “Electrical Energy Storage Systems a Comparative Life Cycle Cost Analysis”; Renew. Sust. Energ. Rev. 2015, 42, 569-596.