-- Iranian Energy Economics------
Fall 2020, 37(10), 99-128
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.22054/jiee.2022.58199.1817

Original Research
Received: 8/Jan/2022
Accepted: 31/Jan/2022
ISSN: 2423-5954
eISSN: 2476-6437

Prioritization of Tehran's Distribution Power Posts in Using of Battery Storage to Peak Shaving and Load Curve Leveling: A Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach

Mohammad Sayadi * Assistant Professor, Economics of Energy and Resources Dept., Faculty of Economics, Kharazmi University, Tehran, Iran

Siab Mamipour Associate Professor, Economics of Energy and Resources Dept., Faculty of Economics, Kharazmi University, Tehran, Iran

Hoda Talebi Master of Economics of Energy, Kharazmi University, Economics of Energy and Resources Department, Tehran, Iran

Abstract

Due to the increasing use of storage as one of the effective methods for peak demand management and increasing the reliability of the electricity network, prioritizing the use of storage is necessary. The purpose of this study was to conduct a multi-criteria decision making (MCDM) approach to prioritize selected sub-distributive substations of Tehran for peak shaving, curve leveling, and economic criteria using battery storage. Also, the Shannon entropy weighting method and SAW implementation method were implemented. After prioritizing the posts and identifying the priority posts, we determine the appropriate size of the storage and determine the delay time, and the amount of benefit from delaying the development of the post when using the electrical energy storage. In this study, we used real data obtained from Tehran Regional Electricity and the data used for the 63 to 20 kW substations "EKBATAN", "AZADI", "AZARBAIJAN", "ABOUZAR", "SINA", "DEPO", and "YAKHCHI-ABAD". The results show that the maximum installed storage capacity calculated for the priority post (i.e. DEPO) is 119.66 MWh and the maximum storage capacity is 18 MW. The most suitable storage size for installing is 120 MWh. Using the storage at the selected post will delay the development of the post for 7 years and the economic benefit is 40% of the investment cost.

Keywords: Energy pricing, gasoline, sustainable development, Delphi method, Analytical Hierarchy Process

JEL Classification: D7, L52, L94

* Corresponding Author: m.sayadi@khu.ac.ir
How to Cite: Sayadi, M ., Mamipour, S., Talebi, H. (2020). Prioritization of Tehran's Distribution Power Posts in Using of Battery Storage to Peak Shaving and Load Curve Leveling: A Multi-Criteria Decision Making (MCDM) Approach. Iranian Energy Economics, 37 (10), 99-128.

-- پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران ---------
دوره ۱۰، شماره ۳۷، زمستان ۱۳۹۹، ۹۹-۱۲۸
Jiee.atu.ac.ir
DOI: http://dx.doi.org/10.22054/jiee. 2022.58199.1817

مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۰/۱۰/۱۸
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۰/۱۱/۱۱
ISSN: ۲۴۲۳-۵۹۵۴
eISSN: ۲۴۷۶-۶۴۳۷

اولویت‌بندی پُست‌های فوق توزیع تهران در استفاده از ذخیره‌ساز باتری به منظور اوج‌سایی و تسطیح بار شبکه: رویکرد برنامه‌ریزی چندمعیاره[۱]

محمد صیادی * | استادیار اقتصاد، گروه اقتصاد انرژی و منابع، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
سیاب ممی‌پور | دانشیار اقتصاد، گروه اقتصاد انرژی و منابع، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران
هدی طالبی | کارشناسی ارشد اقتصاد انرژی، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایران

چکیده

با توجه به افزایش استفاده از ذخیره‌سازها به عنوان یکی از روش‌های مؤثر مدیریت اوج تقاضا و افزایش قابلیت اطمینان شبکه برق، اولویت‌بندی بهینه استفاده از ذخیره‌سازها ضروری است. هدف اصلی این تحقیق اولویت‌بندی پست‌های فوق توزیع منتخب تهران به منظور اوج‌سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی با استفاده از ذخیره‌ساز باتری است. برای این منظور با استفاده روش تصمیم‌گیری چند معیاره با روش وزن‌دهی آنتروپی شانون و روش پیاده‌سازی ترکیب خطی وزن‌دار، به تعیین اندازه مناسب ذخیره‌ساز و تعیین زمان تعویق و میزان سود ناشی از تعویق توسعه پست در صورت استفاده از ذخیره‌ساز پرداخته شده است. در این تحقیق از داده‌های واقعی مربوط به پُست‌های فوق توزیع ۶۳ به ۲۰ کیلووات اکباتان، آزادی، آذربایجان، ابوذر، سینا، دپو و یاخچی آباد دریافت شده از برق منطقه‌ای تهران استفاده شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، پُست دپو دارای اولویت استفاده از ذخیره‌ساز باتری در معیارهای همزمان سه‌گانه تحقیق (اوج‌سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی) است. همچنین حداکثر ظرفیت نصب و حداکثر توان ذخیره‌ساز برای پُست اولویت اول (پُست دپو)، به ترتیب برابر با ۱۱۹/۶۶ مگاوات ساعت و ۱۸ مگاوات می‌باشد. همچنین استفاده از ذخیره‌ساز در پُست انتخاب شده به نحو کارایی موجب تعویق توسعه پُست به میزان ۷ سال شده و سود حاصل از تعویق توسعه شبکه نیز برابر ۴۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد.

کلیدواژه‌ها: اوج‌سایی، تصمیم‌گیری چندمعیاره، آنتروپی شانون، ذخیره‌ساز، قابلیت اطمینان

طبقه‌بندی JEL: L94 , L52 , D7

---

۱. مقاله حاضر برگرفته از پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته اقتصاد انرژی نویسنده سوم در دانشگاه خوارزمی است.

* نویسنده مسئول: m.sayadi@khu.ac.ir

۱. مقدمه

الکتریسیته به عنوان یک انرژی سازگار با محیط زیست، روند رو به رشدی در جهان دارد. یکی از مسائلی که امروزه در سیستم‌های قدرت مورد توجه برنامه‌ریزان و بهره‌بران سیستم قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواخت بودن منحنی بار در ساعات مختلف شبانه‌روز است. این موضوع باعث شده است تا فقط در ساعات اوج بار از تمامی ظرفیت نصب‌شده تولید کشور استفاده شود و در ساعات کم‌باری و میان‌باری، مقدار زیادی از ظرفیت نصب‌شده خارج از مدار باشد که این مطلب به معنای عدم استفاده صحیح از سرمایه است.

از طرفی، در برخی موارد، در اثر اضافه تولید و کمبود بار مصرفی، بهره‌بردار ناچار به قطع اجباری و خارج کردن منابع تولید از شبکه است. همچنین در برخی از منابع تولیدی، به ویژه باد و خورشید، به دلیل ماهیت رفتار تصادفی، امکان پیش‌بینی توان خروجی تولیدی مشکل بوده و این مسئله سبب وقوع نوسانات شدیدی در توان خروجی و عملکرد سیستم قدرت در ایجاد تعادل بین تولید و مصرف ایجاد می‌کند. از آنجا که هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه‌روز با توجه به شروع به کار بازار برق، تفاوت‌های چشمگیری دارد، ایده ذخیره‌سازی برق در ساعات غیر اوج (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات اوج (برق گران) مطرح شد (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

طی دو دهه اخیر احیای مجدد برنامه‌های مدیریت مصرف، استفاده از ابزارهای قیمتی، گسترش شبکه‌های هوشمند و سیاست‌های مدیریت مصرف به عنوان یک کالای قابل دادوستد در بازارهای برق محلی از جمله تحولات اخیر سیاست‌های مصرف در صنعت برق به شمار می‌رود. مدیریت سمت تقاضا[1] که به پاسخ طرف تقاضا[2] نیز شناخته می‌شود، مجموعه فعالیت‌هایی را شامل می‌شود که برای تأثیرگذاری بر روی تقاضای انرژی الکتریکی طراحی و تعریف شده، به نحوی که باعث افزایش رفاه اجتماعی در قالب ایجاد سود و منفعت توامان برای مشترکین، شرکت‌های تأمین‌کننده برق و جامعه می‌شود (ژانگا، ۲۰۱۷)[3]. معمولاً با هدف تشویق مصرف‌کنندگان به استفاده از انرژی کمتر در طول ساعات اوج یا به استفاده از انرژی را به بار خارج از ساعات اوج مانند شب و تعطیلات آخر هفته می‌باشد (فهریوقلو، ۲۰۱۶).[4]

1. Demand Side Management
2. Demand Side Response
3. Zhanga, et al. (2017)
4. Fahrioglu, (2016)

سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به عنوان یک راهکار مؤثر برای مقابله با چالش فوق از طریق تسهیل در افزایش نفوذ منابع انرژی تجدیدپذیر، تسطیح منحنی بار، کمک به کنترل فرکانس، به تعویض انداختن توسعه خطوط انتقال، کاهش نوسانات ولتاژ، افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان می‌باشند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۵). روش‌های متنوعی در خصوص ذخیره‌سازی انرژی برق وجود دارند که می‌توان انرژی را در ساعات غیر اوج ذخیره نمود. ذخیره‌سازهای انرژی با توجه به ظرفیت و مدت زمان پاسخگویی خود تحت عنوان ذخیره‌سازهای فرکانسی و بهره‌برداری مورد استفاده قرار می‌گیرند (عباسی سنجدری و همکاران، ۱۳۹۵).

با توجه به نقش مهمی که ذخیره‌سازها در افزایش امنیت شبکه و مدیریت بار ایفا می‌کند، در این مطالعه با استفاده از یک مدل برنامه‌ریزی چند معیاره، به اولویت‌بندی پست‌های برق فشار قوی تهران به منظور اوج‌سایی[1] با استفاده از ذخیره‌ساز پرداخته شده است. در این راستا، هفت سناریو در نظر گرفته شده است. در سناریو اول پستهای منتخب، فقط با استفاده از معیار اوج‌سایی رتبه‌بندی می‌شوند. در سناریو دوم، با معیار تسطیح منحنی بار به رتبه‌بندی پرداخته می‌شود و در سناریوی سوم با استفاده از معیار اقتصادی رتبه‌بندی انجام می‌شود و در سناریوهای چهار و پنج و شش، معیارهای مذکور به صورت دو به دو در نظر گرفته می‌شوند ودر نهایت در سناریوی هفتم با در نظر گرفتن هر سه معیار، رتبه‌بندی صورت می‌گیرد.

وزن‌دهی با روش انتروپی شانون صورت می‌گیرد و از روش مجموع وزنی تجمعی ساده[2] برای پیاده‌سازی مدل استفاده می‌شود. پس از انتخاب پست مناسب برای استفاده از ذخیره‌ساز، ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز را مشخص شده و میزان کاهش اوج شبکه و میزان زمان تقریبی به تعویق افتادن توسعه پست مورد نظر محاسبه می‌شود. همچنین سود حاصل از استفاده از ذخیره‌ساز تعیین می‌گردد.

چارچوب تحقیق بدین صورت است که پس از مقدمه، در بخش دوم، مبانی نظری تحقیق ارائه می‌شود. بخش سوم به مرور ادبیات موضوعی می‌پردازد. بخش چهارم به تبیین روش تحقیق اختصاص دارد. بخش پنجم به تجزیه و تحلیل یافته‌های تجربی تحقیق می‌پردازد و در بخش ششم، جمع‌بندی و نتیجه‌گیری ارائه می‌شود.

---

1. Peak Shaving
2. Simple Additive Weighting (SAW)

۲. مبانی نظری

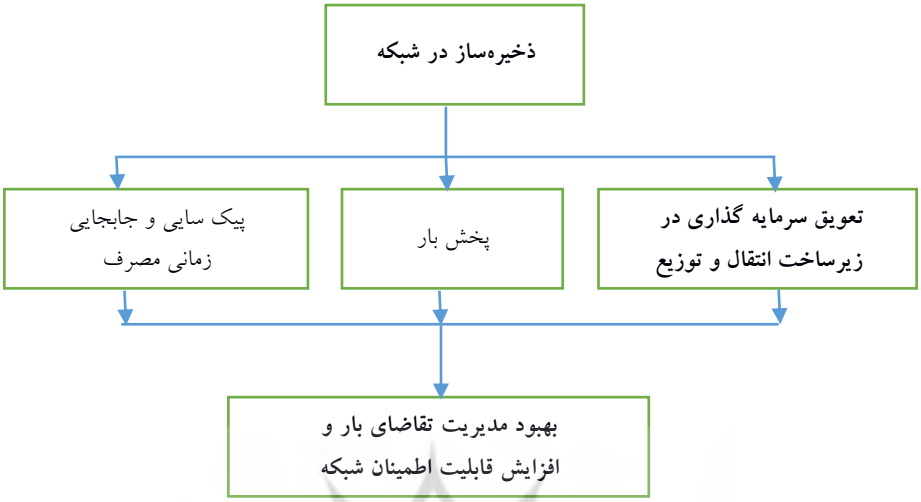
در سیستم‌های قدرت سعی بر این است که عرضه به اندازه‌ای باشد که تأمین‌کننده تقاضا باشد. بهبود قابلیت اطمینان[۱] شبکه به طور معمول، یک مبادله بین افزایش هزینه‌های عرضه برق و کاهش هزینه‌های خاموشی[۲] مصرف‌کننده برق است. به طور کلی مدیریت اوج تقاضا لزوماً کاهش کل مصرف انرژی نیست اما به منظور کاهش نیاز برای سرمایه‌گذاری در شبکه‌ها و یا نیروگاه‌ها برای برطرف کردن نیازهای ساعات اوج مورد استفاده قرار می‌گیرد. به عنوان مثال، استفاده از واحدهای ذخیره‌سازی انرژی برای ذخیره انرژی در ساعات غیر اوج و استفاده از همان انرژی ذخیره‌شده برای مدیریت بار در ساعات اوج را می‌توان نام برد (خرباچ، ۲۰۱۶).[۳] به همین دلایل در کنار این واحدهای تولیدی یک واحد بنام ذخیره‌ساز انرژی[۴] به کار گرفته می‌شود. بدین ترتیب که در زمان تولید انرژی، این انرژی ابتدا تحویل این واحد ذخیره‌ساز می‌گردد و درمواقع نیاز تحویل شبکه موردنظر شده و مورد مصرف قرار می‌گیرد (کردفول و همکاران)[۵]. امروزه این واحدها با توجه به اندازه و ظرفیت، قابلیت ذخیره‌سازی انرژی تا مرز یک ماه را دارا می‌باشند (سو و همکاران،۲۰۱۳).[۶]

همان‌طورکه شکل (۱) نشان می‌دهد، استفاده از ذخیره‌ساز در شبکه از کانال‌های مختلف باعث بهبود مدیریت تقاضای بار و افزایش قابلیت اطمینان می‌شود که تعویق سرمایه‌گذاری در زیرساخت انتقال و توزیع[۷]، پیک (اوج)سایی و جابه‌جایی زمانی مصرف[۸] و پخش بار[۹] از مهم‌ترین آن‌ها است (ژنگ و همکاران، ۲۰۱۳) و افشان و صالحی (۲۰۱۷).[۱۰]

1. Reliability
2. Outage Costs
3. Kharbach, (2016)
4. Energy Storage Systems
5. Kerdphol et al. (2016)
6. Su et al.(2013)
7. deferral T&D infrastructure investment
8. Demand shifting and peak reduction
9. Load following

۱۰. خاطرنشان می‌شود، ذخیره‌سازها کاربردهای دیگری ازجمله امکان ذخیره‌سازی فصلی، تجارت انرژی / آربیتراژ، پشتیبانی ولتاژ و راه‌اندازی مجدد در شبکه را نیز دارند (وزارت نیرو، ۱۳۹۵).

شکل ۱. کانال‌های تأثیر ذخیره‌ساز بر بهبود مدیریت تقاضا و افزایش قابلیت اطمینان شبکه



منبع: ژنگ و همکاران (۲۰۱۳) و افشان و صالحی (۲۰۱۷).

■ تعویق سرمایه‌گذاری در زیرساخت انتقال و توزیع

به تعویق انداختن سرمایه‌گذاری در ارتقای شبکه از جمله مزایای اقتصادی مهم استفاده از ذخیره‌سازها به شمار می‌رود. این ذخیره‌سازها به منظور از بین بردن نقاط تراکم در انتقال و توزیع و یا به تعویق انداختن نیاز به سرمایه‌گذاری بزرگ در زیرساخت‌های شبکه‌های انتقال و توزیع استفاده می‌شود (صبوری و همکاران، ۲۰۱۵).[1] احداث فیدرهای جدید یا توسعه فیدرهای موجود برای شبکه‌های توزیع برق هزینه‌بر است. هچنین مالکیت اراضی، رفع حریم خطوط و سایر مشکلات نیز از مسائلی هستند که شرکت‌های توزیع با آن مواجه هستند. با استفاده از نتایج پیش‌بینی بار می‌توان فیدرهای دارای اضافه بار در آینده را مشخص کرده و با نصب ذخیره‌ساز مناسب بر روی آن‌ها، ضمن تأمین بار به صورت محلی، از اضافه‌بار شدن فیدر در زمان اوج بار جلوگیری کرد (جان‌نثار و همکاران، ۱۳۹۸).

$$DF_n = \frac{CF_{I,n}}{CP_{G,n}} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق، DF_n بیانگر هزینه توسعه شبکه، $CF_{I,n}$ بیانگر هزینه اجرای روش‌های مرسوم شامل احداث خط جدید و دومداره کردن خط (به جز نصب ذخیره‌ساز) جهت افزایش

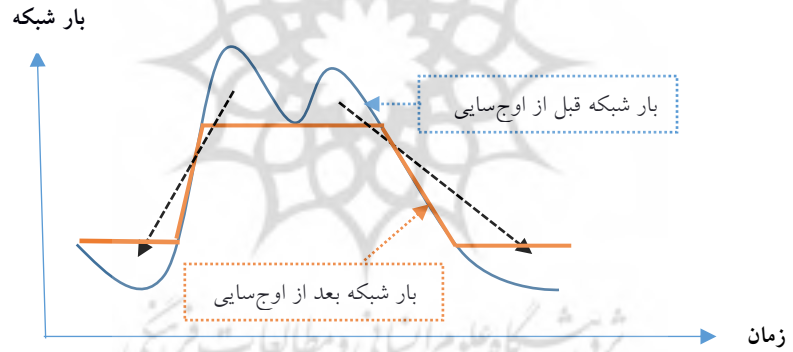
1. Saboori et al. (2015)

ظرفیت شبکه بر حسب ریال به مگاوات ساعت است. $CP_{G,n}$ نیز مقدار هزینه لازم برای ارتقای یک کیلومتر شبکه بر حسب ریال به مگاوات ساعت است. هرچه این نسبت بیشتر باشد (هزینه ارتقای شبکه)، شبکه برای نصب ذخیره‌ساز توجیه بیشتری خواهد داشت.

■ پیک‌سایی و جابه‌جایی زمانی مصرف

یکی از مهمترین معضلات شرکت‌های توزیع برق، وجود اوج بار در ساعات خاصی از شبانه‌روز یا ساعات پربار شبکه است. به‌کارگیری ذخیره‌ساز در شبکه به ایجاد مطابقت تقاضا و عرضه می‌تواند کمک کند. پیک (اوج)سایی به معنای حذف کردن مقدار پیک مصرف می‌باشد که با جابه‌جا کردن زمان مصرف، از زمان اوج بار به زمان‌هایی با مصرف کمتر صورت می‌گیرد (کارمیریس و تنگر[1]، ۲۰۱۳). استفاده از ذخیره‌ساز می‌تواند امکان پیک‌سایی مؤثر در شبکه را فراهم آورد.

نمودار ۱. بار شبکه، قبل و بعد از پیک‌سایی



منبع: کارمیریس و تنگر (۲۰۱۳)

■ تسطیح یا پخش بار

برخلاف اوج‌سایی که معمولاً در یک دوره کوتاه اعمال می‌شود، تسطیح منحنی بار برای مدت زمان طولانی‌تری قابل اجراست. در حالت کلی می‌توان در ساعاتی که مصرف کمتر از مقدار میانگین است، توان را در باتری ذخیره و در ساعاتی که مصرف بیشتر از مقدار میانگین است، توان ذخیره شده را تحویل شبکه داد و با این کار توان را می‌توان از قله‌های منحنی، به

1. Karmiris and Tengner, (2013)

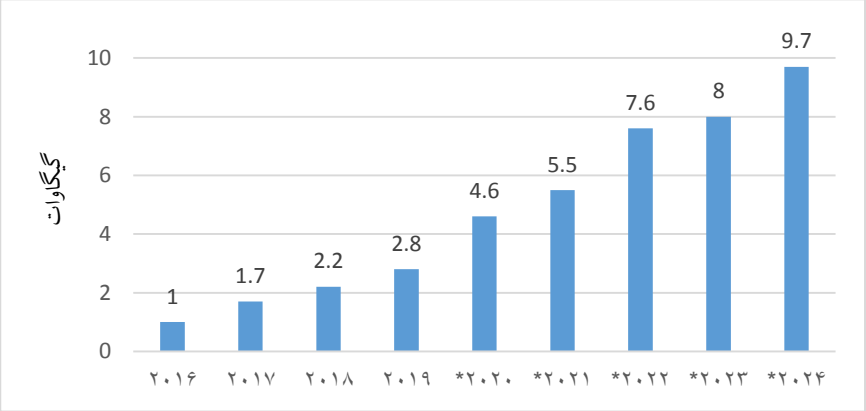
دره‌ها منتقل کرد. از مزایای این کار، تعویق توسعه پست، کسب سود از خرید و فروش انرژی، بارگیری کمتر از ترانس و تلفات کمتر شبکه می‌باشد (لیدبتر و سوان، ۲۰۱۲):[1]

تعیین اندازه و مکان ذخیره‌ساز در مورد ذخیره انرژی در سیستم‌های قدرت دارای اهمیت فراوانی است (تقی‌زادگان و همکاران، ۱۴۰۰). به طور کلی، مکان ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی در صنعت برق را می‌توان به بخش‌های تولید، انتقال، توزیع و کاربر نهایی دسته‌بندی نمود (شاهین‌زاده و همکاران[2]، ۲۰۱۶). در بخش تولید نیرو، هدف ذخیره‌سازی متمرکز حجم بالایی از انرژی برای خدمات جانبی و مدیریت انرژی است که عمدتاً ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای، برای این منظور مناسب است. در بخش انتقال نیرو عموماً به منظور الحاق انرژی‌های تجدیدپذیر به شبکه از ذخیره‌سازهای هوای فشرده و باتری‌ها با هدف ذخیره‌سازی متمرکز و غیر متمرکز بزرگ برای جابه‌جایی زمانی تولید برق از نیروگاه‌های تجدیدپذیر مورد استفاده قرار می‌گیرد. در بخش توزیع نیرو، ذخیره‌سازی در شبکه انتقال و توزیع با هدف حفظ پایداری شبکه و مدیریت انرژی و با استفاده از ذخیره‌سازهای انواع باتری صورت می‌گیرد. درمورد کاربر نهایی، برای پشتیبانی ولتاژ و تأمین کیفیت توان از باتری‌ها در ذخیره‌سازی انرژی برای مصارف خانگی، تجاری و صنعتی استفاده می‌شود (جینلی و همکاران، ۲۰۰۸).[3]

گسترش فناوری برای ذخیره‌سازی انرژی الکتریکی جهت آماده بودن توان ضروری در صورت نیاز، در سیستم قدرت کنونی جایگاه ویژه‌ای دارد. همچنین از آنجایی که بخش الکتریسیته در حال تغییرات عمده است، ذخیره‌سازی انرژی یک انتخاب بسیار مهم برای تحت پوشش قرار دادن مسائلی از قبیل تجدید ساختار در بازار برق، وارد شدن منابع تجدیدپذیر، کمک‌رسانی به افزایش تولیدات پراکنده، بهبود کیفیت توان و کمک به عملکرد شبکه تحت قوانین مربوط به حفاظت از محیط زیست است (لی ـ یون[4]، ۲۰۱۱). بنابراین استفاده از منابع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی برای ذخیره‌سازی توان و استفاده در صورت نیاز شبکه یکی از راهکارهایی می‌باشد که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته است. نمودار ۲ روند ظرفیت سالیانه افزوده شده به ذخیره انرژی در جهان را نشان می‌دهد که نشان‌دهنده روند افزایشی ظرفیت ذخیره‌سازی انرژی در جهان است.

1. Leadbetter and Swan, (2012)
2. Shahinzadeh et al. (2016)
3. Ginley and et. al (2008)
4. Li-ion

نمودار ۲. ظرفیت سالیانه افزوده شده به ذخیره انرژی در جهان



Source: Statista, 2020

۳. پیشینه تحقیق

والاواکار و همکاران[1] (۲۰۰۷) در مطالعه‌ای به بررسی اقتصادی ذخیره‌سازهای انرژی برق برای آربیتراژ و تنظیم انرژی در نیویورک با دو تکنولوژی ذخیره انرژی الکتریکی شامل باتری‌های گوگرد سدیم و چرخ طیار در بازار برق نیویورک پرداخته‌اند. تجزیه و تحلیل آنها نشان می‌دهد که یک فرصت اقتصادی با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز در منطقه نیویورک برای برنامه‌های کاربردی مانند آربیتراژ انرژی و فرصت‌های قابل توجهی در سراسر ایالت نیویورک برای خدمات تنظیم وجود دارد.

آلبرت. جی لامادرید[2] (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ای تحت عنوان «استفاده بهینه از سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی با منابع انرژی تجدیدپذیر»، یک بهینه‌سازی چند دوره‌ای را برای مطالعه اثرات فنی و اقتصادی قرار دادند و استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر[3] و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی در شبکه انرژی الکتریکی، پیشنهاد می کند.

پراساتساپ و همکاران (۲۰۱۷)[4]، در مطالعه خود به تعیین ظرفیت بهینه سیستم ذخیره‌ساز باتری به منظور اوج‌سایی در تایلند پرداخته‌اند. در این تحقیق دو استراتژی با معیارهای مبتنی بر زمان و توان تقاضلی در نظر گرفته شده است. یافته‌های تحقیق نشان

1. Rahul Walawalkar
2. Alberto J. Lamadrid
3. Renewable Energy Sources
4. Prasatsap et al.

می‌دهد که یک سیستم بهینه ذخیره‌ساز باتری به صورت کارایی می‌تواند اوج بار را کاهش دهد و هزینه‌ها را کاهش دهد.

پیم و همکاران (۲۰۱۸)[1] در مطالعه خود به ارزیابی پتانسیل ذخیره‌ساز برای اوج‌سایی در شبکه‌های توزیع با ولتاژ پایین در مناطق مسکونی پرداخته‌اند. با به‌کارگیری روش مونت کارلو برای تعیین اینکه چه میزان اوج‌سایی با به‌کارگیری ذخیره‌ساز قابل حصول است، پرداخته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد، با یک باتری ذخیره‌ساز ۲ کیلووات ساعت برای هر خانوار، اوج تقاضا می‌تواند تا ۵۰ درصد کاهش یابد.

تکی و همکاران (۲۰۲۰)[2] به مطالعه سیستم مدیریت انرژی خانگی با استفاده از ذخیره‌ساز باتری به منظور اوج‌سایی پرداخته‌اند. در این مطالعه یک سیستم فوتوولتاییک با ذخیره‌ساز باتری برای بار ۵ کیلووات مسکونی به عنوان سیستم عرضه مکمل در نظر گرفته شده است. یافته‌ها نشان می‌دهد، با وارد کردن این سیستم و ذخیره‌ساز می‌توان تا ۴۷/۱۴ درصد از اوج بار را کاهش داد که به معنای اوج‌سایی ۹۰ تا ۹۴ درصدی است.

دانیش و همکاران (۲۰۲۰)[3] یک استراتژی منسجم برای اوج‌سایی را با استفاده از سیستم‌های ذخیره‌ساز باتری پیشنهاد داده‌اند. در این تحقیق یک الگوریتم ابداعی برای ارزیابی ظرفیت بهینه سیستم ذخیره انرژی برای اوج‌سایی ارائه شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، سیستم ذخیره‌ساز باتری به صورت معنی‌داری عملکرد سیستم توزیع را بهبود می‌بخشد. همچنین الگوریتم پیشنهادی در تعیین بهینه مکان و اندازه ذخیره‌ساز باتری کارا عمل می‌کند.

جانکوویاک و همکاران (۲۰۲۰)[4] در مطالعه خود به ارزیابی منافع باتری‌ها در اوج‌سایی در سطح منازل مسکونی پرداخته‌اند. از یک معیار کمی شامل ۵ معیار برای ارزیابی عملکرد تکنیکی اوج‌سایی بار در ایرلند استفاده شده است. یافته‌های تحقیق حاکی از کاهش ۹۸ درصدی اوج مصرف در شبکه است. همچنین کاهش ۱۵ درصدی مصرف سالیانه از دیگر مزایایی استفاده از باتری ذخیره‌ساز است.

چن و همکاران (۲۰۲۲)[5] در مطالعه اخیر خود به ارزیابی منافع اوج‌سایی ناشی از به‌کارگیری ذخیره‌ساز باتری در یکی از شهرهای چین (شهر هاینان) با معیارهای نرخ

1. Pimm and et al.
2. Teki and et al.
3. Danish and et al.
4. Jankowiak and et alr (2020)
5. Chen and et al.

بازگشت داخلی (IRR)[1]، دوره بازگشت سرمایه (PBP)[2] و هزینه همتراز شده انرژی (LCOE)[3] پرداخته‌اند. به‌کارگیری یک باتری لیتومی ۲۷۰ مگاواتی بهترین عملکرد را بر اساس سه معیار فوق داشته است که نرخ بازگشت داخلی برابر با ۱۶/۲۷ درصد، دوره بازگشت سرمایه ۶/۲۷ سال و هزینه همتراز شده انرژی برابر با ۰/۴۶ یوان بر کیلووات ساعت محاسبه شده است.

غدیریان و مغانی (۱۳۹۱) در مطالعه‌ای به بررسی کاربرد سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به منظور اوج‌سایی بار در شبکه توزیع نمونه (مجتمع زاگرس) پرداخته‌اند. نتایج حاصل از شبیه‌سازی تأثیر استفاده از باتری سولفور سدیم در یک شبکه توزیع نمونه (مجتمع ویلایی زاگرس) به منظور اوج‌سایی بار مورد ارزیابی قرار گرفته است.

منظور و رحیمی (۱۳۹۴) در مطالعه‌ای به اولویت‌بندی گزینه‌های مختلف تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه پرداخته‌اند. یافته‌های این تحقیق نشان می‌دهد هزینه تمام‌شده برای هر کیلووات ساعت در رتبه اول، امنیت تأمین منبع ورودی نیروگاه در رتبه دوم و سرمایه‌گذاری اولیه در رتبه سوم قرار دارد و بر این اساس به ترتیب نیروگاه‌های بادی، برق آبی، فتوولتائیک، سیکل ترکیبی، هسته‌ای، گازی و بخاری در اولویت قرار دارند.

زیبنده (۱۳۹۴) در مقاله‌ای تحت عنوان «ذخیره‌سازهای انرژی و نقش آنها در بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی»، ضرورت استفاده از سیستم‌های ذخیره‌کننده انرژی برای یکنواخت کردن بار شبکه و همچنین مکانیزم‌های مختلف تولید سرمایش برای انتقال بار مصرفی شبکه ناشی از عملکرد سیستم‌های سرمایش و تهویه مطبوع که درواقع یکی از تجهیزات عمده مصرف‌کننده انرژی هستند به ساعات غیراوج مصرف را مورد بررسی قرار داده است.

حسینا و بطحایی (۱۳۹۵) در مقاله‌ای با عنوان « جایابی، تعیین اندازه و برنامه‌ریزی بهینه پست‌های فوق توزیع با استفاده از ذخیره‌سازهای باتری جریانی وانادیوم به منظور افزایش بهره‌وری شبکه توزیع برق»، با روشی ابتکاری با استفاده از پیش‌بینی بار، مقدار مصرف اوج روز را محاسبه نمودند. سپس براساس چندین شاخص به اولویت‌بندی مکان نصب ذخیره‌ساز پرداخته‌اند و یک برنامه‌ریزی بهینه برای شارژ و دشارژ ذخیره‌ساز ارائه نموده‌اند.

---

1. Internal Rate of Return
2. Payback Period
3. Levelized Cost of Energy

عباسی سنجدری و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با عنوان «مدل‌سازی اقتصادی و فنی به‌کارگیری بهینه از ذخیره‌سازهای انرژی در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی» به بررسی نقش ذخیره‌سازهای تلمبه ذخیره‌ای، هوای فشرده و باتری جهت بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی از یک شبکه تست ۱۱۸ باس استاندارد پرداخته‌اند. نتایج شبیه‌سازی نشان می‌دهد ذخیره‌ساز تلمبه ذخیره‌ای نسبت به دو ذخیره‌ساز دیگر عملکرد بهتری در بهره‌برداری یکپارچه و اقتصادی از سیستم دارد. همچنین ذخیره‌ساز باتری عملکرد بهتری نسبت به سایر ذخیره‌سازها در کاهش هزینه راه‌اندازی و خاموشی واحدها داشته است.

علیزاده و همکاران (۱۳۹۸)، در مطالعه‌ای به مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخگویی بار در چارچوب یک برنامه‌ریزی خطی آمیخته با عدد صحیح، پرداخته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از سیستم‌های اضافی برای تأمین انرژی به طور قابل توجهی موجب کاهش هزینه برق خانه هوشمند خواهد شد.

جان‌نثار و همکاران (۱۳۹۸) در مطالعه‌ای به بررسی تخصیص بهینه باتری ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع با هدف کاهش اوج بار و سودآوری حداکثری پرداخته‌اند. برای این منظور شاخص‌هایی با استفاده از اطلاعات بار ساعتی، هزینه ارتقای فیدر و قیمت فروش برق به تعرفه‌های مختلف، معرفی شده است. در ادامه با استفاده از روش تحلیل سلسله‌مراتبی، شاخص‌ها وزن‌دهی شده و فیدر مناسب برای نصب ذخیره‌ساز مشخص شده است. تابع هدف شامل هزینه‌های نصب و بهره‌برداری ذخیره‌ساز، سود خرید و فروش انرژی، سود به تعویق افتادن توسعه شبکه، سود ناشی از مسائل زیست‌محیطی و سود ناشی از کاهش هزینه‌های دسترسی به شبکه بالادست است. نتایج به‌کارگیری الگوریتم‌های ابتکاری (ژنتیک، دسته ذرات، مورچگان و جستجوی ممنوع)، ضمن تأمین اهداف مد نظر، مناسب‌ترین باتری و روش بهینه‌سازی را از بین باتری‌ها و روش‌های معرفی‌شده ارائه می‌دهد.

با بررسی مطالعات پیشینه تحقیق، می‌توان چنین عنوان نمود که مبتنی بر بررسی‌های صورت‌گرفته، به نظر می‌رسد این تحقیق برای نخستین‌بار برای اولویت‌بندی پست‌های منتخب تهران به منظور اوج‌سایی و تسطیح بار با استفاده از ذخیره‌ساز باتری و بر مبنای تصمیم‌گیری چند معیاره با روش وزن‌دهی انتروپی شانون انجام شده است. در این تحقیق با در نظر گرفتن سه معیار اوج‌سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی، به اولویت‌بندی پست‌های فوق توزیع برق در تهران پرداخته می‌شود.

٤. روش پژوهش

در این بخش ابتدا به معرفی روش تصمیم‌گیری پرداخته می‌شود، سپس در ادامه معیارها و شاخص‌های مورد استفاده در این تحقیق ارائه می‌شود.

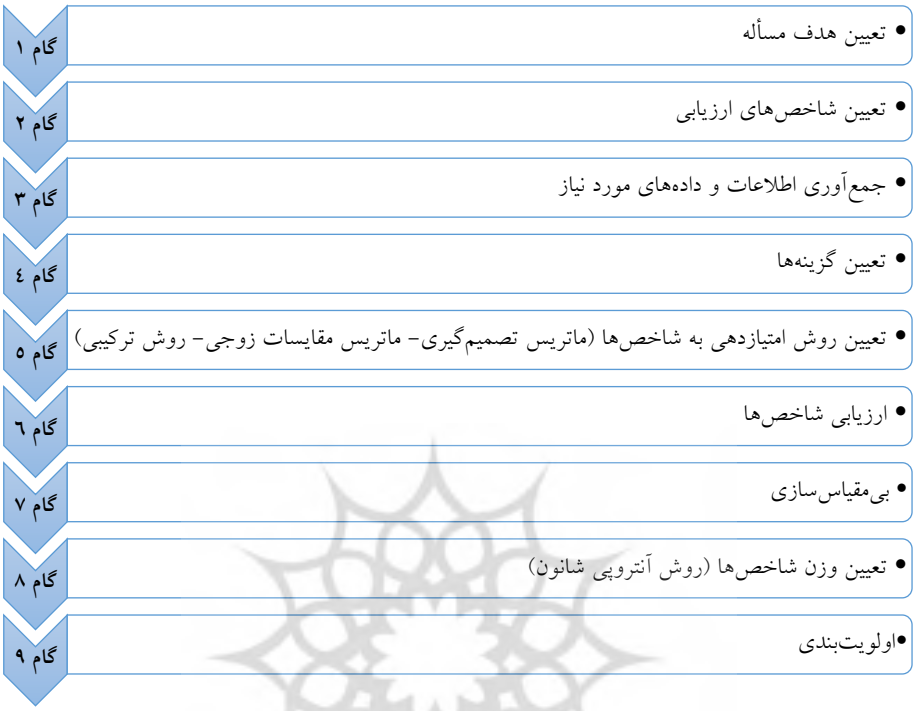
٤-١. روش تصمیم‌گیری چند معیاره

یکی از دسته‌بندی‌های تصمیم‌گیری کمّی، تقسیم آن به تصمیم‌گیری یک معیاره و چند معیاره است. با توسعه و گسترش روش‌های تصمیم‌گیری، روش‌هایی تحت عنوان تصمیم‌گیری چند معیاره[1] توسعه داده شده است. این مدل‌های تصمیم‌گیری به دو دسته عمده تقسیم می‌شوند: مدل‌های چند شاخصه[2] و مدل‌های چندگانه[3]. مدل‌های چندگانه به طور عمده برای طراحی به کار گرفته می‌شوند؛ در حالی که مدل‌های چند شاخصه به منظور انتخاب گزینه برتر استفاده می‌شوند. روش‌های چند شاخصه دارای روش‌های متنوعی در مراحل مختلف تصمیم‌گیری هستند که انتخاب روش مناسب اغلب به تجربه و سلیقه محقق مربوط می‌شود و هرچند دسته‌بندی‌هایی نیز جهت راهنمایی در انتخاب آن‌ها وجود دارد، اما باز هم نمی‌توان به طور قطع گفت که چه روشی برای چه مسئله‌ای مناسب است (اصغرپور، ۱۳۸۳).

به منظور تصمیم‌گیری توسط روش‌های تصمیم‌گیری چندمعیاره، پس از تعیین هدف مسأله، تعیین تعداد شاخص‌ها و معیارهای مسأله می‌باشد. مرحله بعدی جمع‌آوری اطلاعات و داده‌های مورد نیاز است به طوری که این داده‌ها نظرات تصمیم‌گیرنده را منعکس می‌کند. سپس بر اساس آنها، گزینه‌ها و آلترناتیوهای مختلف مشخص خواهد شد. این گزینه‌ها می‌تواند تصمیم‌گیرنده را به اهداف خود برساند. مرحله بعد، انتخاب بهترین روش برای ارزیابی و اولویت‌بندی گزینه‌ها می‌باشد. پس از ارزیابی شاخص‌ها و بی‌مقیاس‌سازی آن‌ها، شاخص‌های وزن‌دهی شده و در نهایت اولویت‌بندی صورت می‌گیرد (امیری و همکاران، ۱۳۹۵). در شکل (۱)، گام‌های مختلف الگوریتم حل مسائل با استفاده از روش تصمیم‌گیری چند شاخصه ارائه شده است.

1. Multiple Criteria Decision Making
2. Multiple Attribute Decision Making
3. Multiple Objective Decision Making

شکل ۲. گام‌های حل مسئله با استفاده از تصمیم‌گیری چند شاخصه



منبع: روش‌شناسی تحقیق جاری

۱-۱-٤. آنتروپی شانون[1]

روش آنتروپی یکی از روش‌های تصمیم‌گیری چند شاخصه برای محاسبه وزن معیارها می‌باشد. این روش که در سال ۱۹۷۴ توسط شانون و ویور[2] ارائه شد، برگرفته شده از تئوری اطلاعات[3] می‌باشد. این روش بیان کننده مقدار عدم اطمینان در یک توزیع احتمال پیوسته بوده و نیازمند ماتریس معیار- گزینه است. ایده اساسی این روش آن است که با افزایش پراکندگی داده‌ها، وزن آن‌ها نیز بیشتر می‌شود. در تئوری اطلاعات معیاری است برای مقدار عدم اطمینان بیان شده توسط یک توزیع احتمال گسسته به طوری که این عدم اطمینان در صورت پخش بودن توزیع، بیشتر از مواردی است که توزیع فراوانی تیزتر باشد (اصغرپور، ۱۳۸۹: ۱۹۶).

1. Shannon Entropy
2. Shannon and Weaver
3. Information Theory

گام‌های روش آنتروپی شانون به صورت زیر است:

گام اول: ابتدا ماتریس تصمیم را تشکیل می‌دهیم. برای تشکیل این ماتریس تصمیم کافیست اگر معیارها کیفی هستند از عبارات کلامی ارزیابی هر گزینه را نسبت به هر معیار بدست آوریم و اگر معیارها کمی هستند عدد واقعی آن ارزیابی را قرار دهیم.

گام دوم: ماتریس بالا را نرمال می‌کنیم و هر درایه نرمال شده را P_{ij} می‌نامیم. نرمال شدن به این صورت می‌باشد که درایه هر ستون را بر مجموع ستون تقسیم می‌کنیم.

گام سوم: محاسبه آنتروپی هر شاخص؛ آنتروپی E_j به صورت زیر محاسبه می‌گردد و k به عنوان مقدار ثابت مقدار E_j را بین ۰ و ۱ نگه می‌دارد.

$$E_j = - K * \sum_{i=1}^{m} P_{ij} * Ln\ P_{ij} \qquad i= 1, 2\dots m \qquad (۲)$$

گام چهارم: در ادامه مقدار d_j (درجه انحراف) محاسبه می‌شود که بیان می‌کند شاخص مربوطه (d_j) چه میزان اطلاعات مفید برای تصمیم گیری در اختیار تصمیم گیرنده قرار می‌دهد. هر چه مقادیر اندازه‌گیری شده شاخصی به هم نزدیک باشند نشان دهنده آن است که گزینه‌های رقیب از نظر آن شاخص تفاوت چندانی با یکدیگر ندارند.

$$d_j= 1 - E_j \qquad (۳)$$

گام پنجم: سپس مقدار وزن W_j محاسبه می‌گردد.

$$W_j = d_j / \Sigma d_j \qquad (۴)$$

وقتی که داده‌های یک ماتریس تصمیم‌گیری، به طور کامل مشخص باشد، می‌توان از روش آنتروپی برای ارزیابی وزن‌های معیارها استفاده کرد. سهولت استفاده از این شیوه و نیز قابل درک بودن از جمله مزایای دیگر این شیوه وزن‌دهی به شمار می‌رود. در این تحقیق از روش آنتروپی شانون برای محاسبه وزن شاخص‌ها استفاده شده است.

۲-۱-٤. روش وزن‌دهی ترکیب خطی یا تجمعی ساده

روش وزن‌دهی تجمعی ساده یکی از قابل فهم‌ترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره است. این روش با نام روش ترکیب خطی وزن‌دار نیز شناخته می‌شود. این روش توسط هوانگ و یون[1] در سال ۱۹۸۱ ارائه شد. در این روش بعد از بی‌مقیاس‌سازی و وزن‌دار کردن، می‌توان گزینه‌های پژوهش را رتبه‌بندی نمود.

1. Huang and Yun

اگر در یک مسأله تصمیم‌گیری چند معیاره، n معیار و m گزینه وجود داشته باشد؛ به منظور انتخاب بهترین گزینه با استفاده از روش وزن‌دهی ساده[1]، مراحل به شرح زیر می‌باشد:

۱. تشکیل ماتریس تصمیم: ماتریس تصمیم این روش شامل جدول است که ستون‌های آن را معیارها یا زیرمعیارها و سطرهای آن را گزینه‌ها تشکیل می‌دهند.

۲. بی‌مقیاس کردن ماتریس تصمیم: برای این منظور در روش وزن‌دهی ساده بدین طریق عمل می‌کنیم که اگر معیار مثبت باشد، تک تک اعداد آن ستون را بر بزرگترین عدد تقسیم می‌کنیم. اگر معیار منفی باشد، حداقل آن ستون تقسیم بر تک تک اعداد می‌شود.

۳. تشکیل ماتریس وزن‌دار: در این گام با توجه به وزن‌های محاسبه‌شده از روش‌های دیگر، ماتریس وزن‌دار را به دست می‌آوریم.

۴. انتخاب گزینه برتر: با جمع سطری ماتریس وزن‌ها امتیاز هر گزینه محاسبه می‌شود و بر اساس آن گزینه‌ها رتبه‌بندی می‌شوند.

۲-٤. معیارها و شاخص‌های مدل

این بخش از تحقیق به معرفی معیارها و شاخص‌های مدل اختصاص دارد.

۱-۲-٤. شاخص‌های اوج سایی

به تبعیت از مطالعه جانگ، (۲۰۱۶)[2] سه شاخص مدلسازی مسأله اوج‌سایی می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اولین شاخص اوج‌سایی به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$K_{1-PSH} = \left(\frac{H_{up}}{K_{up}}\right) * \left(\frac{std_{up}}{S_{up}}\right) * 100 \qquad (۵)$$

که در آن؛ K_{up}: تعداد ساعاتی که مصرف بیشتر از میانگین؛ H_{up}: اختلاف بین حداکثر مصرف (۱پریونیت) و مقدار میانگین؛ S_{up}: مجموع اختلاف بین منحنی تداوم مصرف و میانگین تا ساعت K_{up} ام و std_{up}: انحراف معیار اختلاف بین منحنی تداوم مصرف و میانگین تا ساعت K_{up} ام است.

1. SAW
2. Jang, (2016)

در رابطه (۵)، ($\frac{H_{up}}{K_{up}}$) بیانگر شیب متوسط کاهش منحنی مصرف می‌باشد و هرچه این شیب بیشتر باشد، یعنی اختلاف بین ساعات اوج و بقیه ساعات مصرف بیشتر بوده و برای اوج‌سایی مناسب‌تر است. رابطه ($\frac{std_{up}}{S_{up}}$) اصلاح‌کننده رابطه ($\frac{H_{up}}{K_{up}}$) می‌باشد.

با توجه به اینکه زمان اوج مصرف بیش از یک ساعت است و تقریباً در حدود ۲ ساعت می‌باشد، بنابراین شاخص دیگری به جهت نشان دادن اختلاف بار در ساعات اوج تعریف می‌گردد. بدین جهت، میانگین ۲ ساعت ابتدایی از منحنی تداوم از ۲ ساعت دوم منحنی کم می‌شود و به صورت یک شاخص برای اوج‌سایی در نظر گرفته می‌شود. این شاخص بیانگر وجود یک اوج قابل توجه نسبت به دیگر ساعات مصرف می‌باشد. هرچه میزان اختلاف میانگین دو ساعت موردنظر بیشتر باشد، برای اوج سایی در اولویت بالاتری قرار می‌گیرد (جانگ، ۲۰۱۶).

$$K_{2-PSH} = \frac{1}{2} * \left(\sum_{n=1}^{2} P(n) - \sum_{n=3}^{4} P(n) \right) \quad (۶)$$

در روابط (۵) و (۶) فقط از اوج همزمان استفاده شده است، در حالی که میزان اوج غیر همزمان هر یک از بارهای مصرفی در تعیین اولویت برای اوج‌سایی مؤثر می‌باشد. بنابراین میزان اوج غیر همزمان هر یک از پست‌های برق را به عنوان متغیر سوم با عنوان K_{3-PSH} در شاخص اوج‌سایی می‌تواند اعمال شود. بنابراین شاخص مربوط به اوج‌سایی مورد استفاده در تحقیق حاضر طبق رابطه (۷) بیان می‌شود:

$$K_{PSH} = (w_1 * K_{1-PSH} + w_2 * K_{2-PSH} + w_3 * K_{3-PSH}) * UF \quad (۷)$$

ضریب استفاده هر پست $UF = \frac{P_{max}}{P_n}$ بیانگر نسبت بیشترین میزان مصرف به مقدار نامی می‌باشد. هرچه میزان مصرف به مقدار نامی نزدیکتر باشد، برای اوج سایی و تسطیح منحنی بار مناسب‌تر است و توسعه آن پست با نصب ذخیره‌ساز به تعویق می‌افتد.

۲-۲-٤. شاخص‌های تسطیح منحنی بار

با توجه به آیین‌نامه اجرایی تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آنها در سال ۱۳۹۶، ساعات اوج بار ۴ ساعت و ساعات کم‌باری ۸ ساعت در نظر گرفته شده است. بنابراین ما نیز دوره‌های پرباری و میان‌باری و کم‌باری را با احتساب قیمت فروش برق در نظر می‌گیریم.

m_1: دوره ۴ ساعت ابتدایی منحنی تداوم مصرف دوره پرباری است و میانگین این بازه ۴ ساعته، m_1 تعریف می‌شود.

m_2: دوره ۱۲ ساعت میانی منحنی تداوم مصرف دوره میان باری است و میانگین این بازه ۱۲ ساعته، m_2 تعریف می‌شود.

m_3: دوره ۸ ساعت پایانی منحنی تداوم مصرف دوره کم باری است و میانگین این بازه ۸ساعته، m_3 تعریف می‌شود.

بدین صورت منحنی تداوم مصرف یک شبانه روز توسط ۳ عدد m_1 تا m_3 بیان می‌شود.

شاخص اول تسطیح منحنی بار توسط رابطه (۸) تصریح می‌شود:

$$K_{1-LL} = \frac{m_1 - m_3}{\sqrt{m_2}} \quad (۸)$$

شاخص دوم تسطیح منحنی بار توسط رابطه (۹) تصریح می‌شود:

$$K_{2-LL} = \frac{1}{3}\sqrt{(m_1 - m_2)^2 + (m_2 - m_3)^2 + (m_1 - m_3)^2} \quad (۹)$$

و شاخص کلی مربوط به تسطیح منحنی بار به صورت رابطه (۱۰) بیان می‌شود.

$$K_{LL} = (w_4 * K_{1-LL} + w_5 * K_{2-LL}) * UF \quad (۱۰)$$

پارامترهای W_4 و W_5، ضریب‌های وزنی می‌باشند. در این تحقیق از شاخص کلی مربوط به تسطیح منحنی بار به دلیل جامعیت بیشتر آن استفاده می‌شود.

۳-۲-٤. معیار اقتصادی

با توجه به بازار برق و متفاوت بودن تعرفه فروش برای مشترکین مختلف، در نظر گرفتن انواع مشترکین هر محدوده بسیار حائز اهمیت می‌باشد. طبق مصوبه تعرفه برق صادر شده توسط وزارت نیرو، تعرفه مشترکین به ۵ نوع تعرفه مصارف خانگی، مصارف عمومی، مصارف تولید (آب و کشاورزی)، مصارف تولید (صنعت و معدن) و سایر مصارف تقسیم‌بندی می‌شوند؛ بنابراین می‌توان معیار اقتصادی هر پست را به صورت رابطه (۱۱) تعریف نمود:

$$K_{eco} = N_h * T_h + N_p * T_p + N_a * T_a + N_i * T_i + N_o * T_o \quad (۱۱)$$

N_h : تعداد مشترکین خانگی هر پست

T_h: تعرفه خانگی مصوب

N_p : تعداد مشترکین مصارف عمومی هر پست

T_p: تعرفه مصارف عمومی مصوب

N_a : تعداد مشترکین آب و کشاورزی هر پست

T_a: تعرفه آب و کشاورزی مصوب

N_i : تعداد مشترکین صنعت و معدن هر پست

T_i: تعرفه صنعت و معدن مصوب

N_o : تعداد مشترکین سایر مصارف هر پست

T_o: تعرفه سایر مصارف مصوب[۱]

جهت به تعویق انداختن توسعه شبکه، با در نظر گرفتن λ به عنوان میزان درصد نرخ رشد سالیانه مصرف بار و α به عنوان میزان درصد کاهش اوج شبکه توسط ذخیره‌ساز، می‌توان مدت زمان تعویق توسعه شبکه را برحسب سال طبق رابطه ۱۱ محاسبه نمود.

$$\Delta t = \frac{\log(1+\alpha)}{\log(1+\lambda)} \qquad (۱۲)$$

در رابطه فوق، Δt نشان‌دهنده تعداد سال‌های تعویق توسعه شبکه است. با استفاده از ذخیره‌سازها می‌توان توسعه شبکه را به تعویق انداخت. با در نظر گرفتن ir به عنوان نرخ تورم و dr به عنوان نرخ سرمایه‌گذاری و C_{inv} به عنوان هزینه مربوط به توسعه شبکه، می‌توان میزان سود حاصل از تعویق توسعه را به صورت زیر محاسبه نمود (لیو[۲]، ۲۰۱۲):

$$Ben = C_{inv} * \left(1- \left(\frac{1+ir}{1+dr}\right)^{\Delta t}\right) \qquad (۱۳)$$

۵. یافته‌های تحقیق

این بخش در دو قسمت رائه شده است. ابتدا به شرح داده‌های تحقیق پرداخته شده سپس یافته‌های تحقیق بر اساس این داده‌ها بیان شده است.

۵-۱. داده‌های تحقیق

در این تحقیق، از داده‌های واقعی دریافت‌شده از برق منطقه‌ای تهران مربوط به پست‌های فوق توزیع ۶۳ به ۲۰ کیلووات اکباتان، آزادی، آذربایجان، ابوذر، سینا، دپو و یاخچی‌آباد استفاده شده است. علاوه بر این برای محاسبه زمان به تعویق افتادن توسعه شبکه، نرخ رشد سالیانه مصرف بار (λ) برابر با ۲ درصد و نیز درصد کاهش اوج شبکه توسط ذخیره‌ساز

---

۱. تعرفه‌های برق و شرایط عمومی آن‌ها از سایت وزارت نیرو، بخش تعرفه و قوانین و مقررات فروش برق (https://tariff.moe.gov.ir/) استخراج شده است.

2. Leou, (2012)

(α) برابر با ۱۵ درصد (۱۵ = ۶۵/۱ / ۰/۲۶) برای پست منتخب در نظر گرفته شده است. همچنین نرخ بهره بانکی برای محاسبه سود ناشی از تعویق توسعه شبکه برابر با ۱۸ درصد در نظر گرفته شده است. در جدول ۱ اطلاعات مربوط به تفکیک هر پست ارائه شده است.

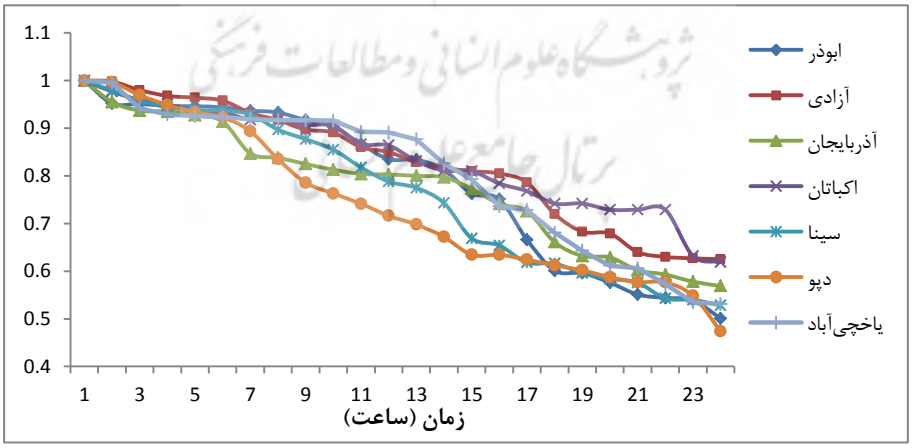
جدول ۱. اطلاعات مربوط به پست‌های فوق توزیع منتخب

شماره پست	نام پست	توان نامی (MVA)	توان حداکثر (MW)	درصد رشد سالیانه بار	ضریب استفاده
۱	ابوذر	٦۰	٤۲/٦	۲	۰/۷۱
۲	آزادی	۹۰	٦٤/٥٤	۲	۰/۷۱
۳	آذربایجان	۹۰	۲۳/٤٤	۱/٥	۰/۲٦
٤	اکباتان	۹۰	٦۱/۹٤	۱/٥	۰/٦۸
٥	سینا	۹۰	٦۸/٤۷	۳	۰/۷٦
٦	دپو	۱۰۰	۷۲/۲٥	۲	۰/۷۲
۷	یاخچی آباد	٦۰	٤۲/٤۸	۱/٥	۰/۷۰

منبع: شرکت برق منطقه‌ای تهران

روش بی‌مقیاس‌سازی در این تحقیق از نوع خطی می‌باشد و میزان مصرف هر ساعت را بر بیشترین میزان مصرف آن روز تقسیم نموده و بدین ترتیب منحنی تداوم مصرف هریک از پست‌ها به دست آمده است. نمودار ۳ منحنی تداوم مصرف پست‌های منتخب را نشان می‌دهد.

نمودار ۳. منحنی‌های تداوم مصرف پست‌های منتخب



منبع: یافته‌های محقق

۲-۵. اولویت‌بندی پُست‌ها با سه معیار اوج سایی، تسطیح منحنی بار و اقتصادی

دراین مرحله به اولویت‌بندی پست‌ها با در نظر گرفتن هر سه معیار اوج سایی و تسطیح منحنی و معیار اقتصادی به اولویت‌بندی پُست‌ها به منظور استفاده از ذخیره‌ساز می‌پردازیم. با در نظر گرفتن W_6 به عنوان وزن معیار اقتصادی[1] و با استفاده از روش آنتروپی شانون مقادیر وزن‌ها در حالت در نظر گرفتن هر سه معیار به شرح زیر به دست آمدند.

جدول ۲. وزن معیارهای اوج سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی با استفاده از روش آنتروپی شانون

ردیف	نام وزن ها	مقادیر بدست آمده
۱	W1	۰/۱۶۷۷۹
۲	W2	۰/۱۶۶۸۷۱
۳	W3	۰/۱۶۶۸۰٤
٤	W4	۰/۱۶۶۲٦٤
٥	W5	۰/۱۶۶۲۲۹
٦	W6	۰/۱۶۶۰٤۲

منبع: یافته‌های محقق

امتیازات حاصل از روش وزن دهی ساده[2] و رتبه‌بندی با در نظر گرفتن هر سه معیار به صورت جدول ۴ می‌باشد. بر این اساس، پست دپو در اولویت اول برای استفاده از ذخیره‌ساز می‌باشد.

جدول ٤. امتیازات و رتبه‌بندی با در نظر گرفتن معیارهای اوج سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی با استفاده از روش وزن دهی ساده[3]

شماره پست	نام پست	امتیاز	رتبه
۱	ابوذر	۰/۷۰۸۰۲	٥
۲	آزادی	۰/۷۰٤۸٥	٦
۳	آذربایجان	۰/۷۱۹۲۷	٤
٤	اکباتان	۰/٦٤٥۹۸	۷
٥	سینا	۰/۸۱۱۳۷	۲
٦	دپو	۰/۹۳۲٥۳	۱
۷	یاخچی آباد	۰/۷٤۸۲٦	۳

منبع: یافته‌های محقق

۱. وزن‌های W1 تا W3 مربوط به شاخص اوج‌سایی (مطابق رابطه (۷))، وزن‌های W4و W5 مربوط به شاخص تسطیح بار (مطابق رابطه (۸)) و W_6 وزن مربوط به شاخص اقتصادی است.

2. SAW
3. SAW

علاوه بر لحاظ سه معیار اوج‌سایی، اقتصادی و تسطیح منحنی بار، در ۶ حالت دیگر نیز به بررسی و اولویت‌بندی پست‌های منتخب جهت استفاده از ذخیره‌ساز پرداخته شده است. با توجه به حجم بالای خروجی‌های این بخش، خلاصه نتایج به دست آمده در جدول ۵ ارائه شده است.[۱] همان‌طور که نتایج ارائه شده در جدول ۵ نشان می‌دهد، به جز در حالت استفاده از معیار منفرد اقتصادی که پست آذربایجان در اولویت قرار گرفته است، در سایر حالت‌ها (معیارهای منفرد و دو به دو مورد استفاده)، پست دپو در اولویت اول استفاده از ذخیره‌ساز قرار می‌گیرد.

جدول ۵. اولویت‌بندی استفاده از ذخیره‌ساز بر اساس معیارهای اوج‌سایی، تسطیح بار و اقتصادی

ردیف	معیارهای تحقیق	پُست‌های منتخب						
		ابوذر	آزادی	آذربایجان	اکباتان	سینا	دپو	یاخچی‌آباد
۱	معیار اوج سایی						*	
۲	معیار اقتصادی			*				
۳	معیار اوج سایی و تسطیح منحنی بار						*	
٤	معیار تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی						*	
٥	معیار اوج سایی و معیار اقتصادی						*	
٦	معیار اوج سایی و معیار اقتصادی و معیار تسطیح منحنی بار						*	

* پُست منتخب

منبع: یافته‌های محقق

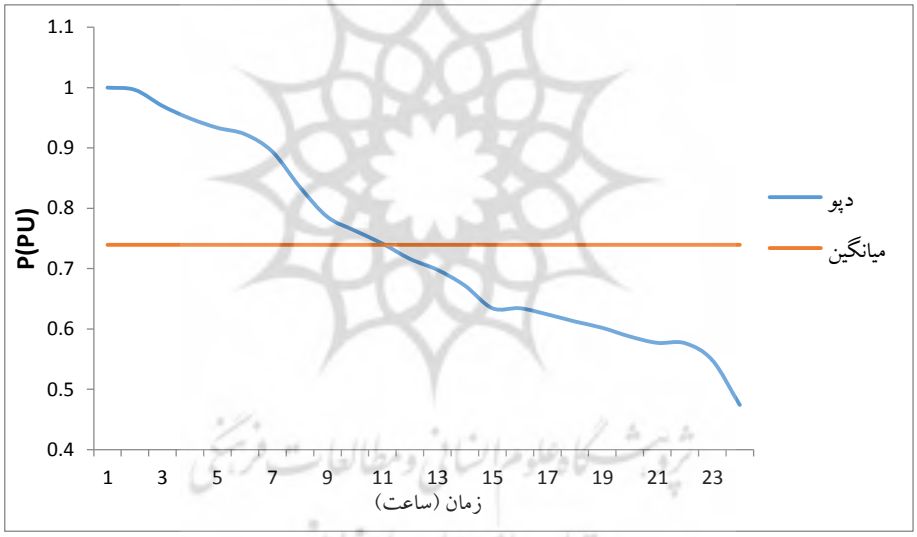
چنانچه راندمان ذخیره‌ساز ۱۰۰ درصد در نظر گرفته شود و با فرض اینکه نصب ذخیره‌ساز سبب افزایش میانگین مصرف نشود، در این صورت اگر ذخیره‌ساز توانایی ذخیره انرژی به اندازه S_{up} را داشته باشد، استفاده از ذخیره‌ساز می‌تواند منحنی را به صورت کامل مسطح نماید. درنتیجه بیشترین ظرفیت نصب ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی بار برابر با مساحت S_{up} می‌باشد (اودالوو[۲]، ۲۰۰۶) .

۱. نتایج تفصیلی به‌کارگیری معیارهای منفرد و دوبه‌دو در بخش ضمیمه تحقیق ارائه شده است.

2. Oudalov

حداکثر ظرفیت نصب ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی بار در پُست دپو برابر ۱/۶۵ (بر حسب پریونیت) می‌باشد که با توجه به حداکثر توان مصرف در پُست دپو برابر با ۷۲/۲۵ مگاوات، حداکثر ظرفیت نصب ذخیره‌ساز برحسب مگاوات برابر ۱۱۹/۶۶ مگاوات ساعت (تقریباً ۱۲۰ مگاوات ساعت) خواهد بود. همچنین مقدار «حداکثر توان ذخیره‌ساز» برابر با حداکثر اختلاف بین منحنی مصرف و مقدار میانگین است. با توجه به اینکه بیشترین اختلاف منحنی مصرف با میانگین مصرف در پُست دپو در ساعت ۱۲ و برابر ۰/۲۶ می‌باشد، بنابراین حداکثر توان ذخیره‌ساز برحسب مگاوات برابر با ۱۸ خواهد بود. لازم به ذکر است، اندازه مناسب ذخیره‌ساز، برابر با حداکثر توان ذخیره‌ساز تقسیم بر حداکثر ظرفیت نصب ذخیره‌ساز برای تسطیح منحنی بار می‌باشد (اودالوو، ۲۰۰۶).

نمودار ٤. منحنی تداوم مصرف پست دپو



منبع: یافته‌های محقق

با توجه به نرخ رشد سالیانه مصرف بار برابر با ۲ درصد در پُست منتخب دپو و همچنین با در نظر گرفتن کاهش اوج بار ۱۵ درصد،[1] زمان به تعویق افتادن توسعه شبکه مطابق رابطه شماره (۱۱) برابر با ۷ سال خواهد بود. علاوه بر این، طبق رابطه شماره (۱۲) با در نظر گرفتن مدت زمان تعویق توسعه شبکه (برابر با ۷ سال) و با فرض نرخ بهره بانکی

۱. میزان کاهش اوج بار از طریق (۱/۶۵ ÷ ۰/۲۶ = ۱۵) محاسبه شده است.

برابر با ۱۸ درصد، میزان کاهش هزینه‌های شبکه با به‌کارگیری ذخیره‌ساز معادل C_{inv} ۰/۴ (یا ۴۰ درصد هزینه توسعه شبکه) محاسبه می‌شود. با توجه به منافع اقتصادی قابل توجهی که به‌کارگیری ذخیره‌ساز می‌تواند در شبکه ایجاد کند و نیز نظر به محدودیت‌های مالی که برای توسعه ظرفیت جدید نیروگاهی درکشورمان وجود دارد، یافته‌های تحقیق حاضر می‌تواند در جهت برنامه‌ریزی برای کاهش هزینه‌های شبکه و نیز استفاده از منافع اقتصادی ناشی از تعویق توسعه شبکه مورد توجه قرار گیرد.

٦. بحث و نتیجه‌گیری

روند فزاینده مصرف برق در کشور، ضرورت پاسخگویی متناسب به تقاضای برق در کشور را آشکار ساخته است. خاموشی‌های گسترده برق طی سال‌های اخیر نشان از عدم امکان سرمایه‌گذاری کافی برای توسعه نیروگاه‌های تولید برق متناسب با افزایش ایجاد شده در مصرف برق دارد. نظر به محدویت‌های مالیی که در توسعه شبکه نیروگاهی کشور وجود دارد، استفاده از ذخیره‌سازها از جمله راهکارهای عملی برای مواجهه با وضعیت موجود است.

علاوه بر این لازم به ذکر است که برای تأمین نیروی برق مورد نیاز در ساعات اوج بار نیاز به سرمایه‌گذاری کلان برای احداث نیروگاه‌هایی است که تنها چند ساعت در شبانه‌روز به تولید برق می‌پردازند. بنابراین برق تولید شده توسط این نیروگاه‌ها بسیار گران تمام می‌شود. بنابراین یکی از دلایل اصلی استفاده از ذخیره‌ساز در شبکه‌های توزیع، به تعویق انداختن توسعه شبکه از طریق کاهش اوج بار است. با توجه به اینکه پست‌های فوق توزیع برق مکان نصب ذخیره‌سازها در این تحقیق می‌باشند، طبق معیارهای آژانس بین‌المللی انرژی برای در نظر گرفتن فناوری‌های مناسب برای ذخیره‌سازی انرژی، باتری‌ها به عنوان ذخیره‌ساز در این مطالعه در نظر گرفته شد. با اولویت‌بندی پست‌های بین‌المللی منتخب دارای اضافه‌بار و با نصب ذخیره‌ساز بر روی آن‌ها، ضمن تأمین بار به صورت محلی، می‌توان نیاز شبکه در زمان اوج بار را تأمین نمود. بر این اساس، هدف اصلی این تحقیق اولویت‌بندی پستهای فوق توزیع ۶۳/۲۰ کیلووات منتخب شهر تهران با استفاده از داده‌های واقعی دریافت شده از برق منطقه‌ای تهران به منظور اوج‌سایی وتسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی با استفاده از ذخیره‌ساز باتری است.

در این تحقیق از روش تصمیم‌گیری چندمعیاره و روش وزن‌دهی آنتروپی شانون استفاده شد و بر اساس سه معیار اوج‌سایی، تسطیح منحنی بار و معیار اقتصادی به اولویت‌بندی پُست‌ها پرداخته شد که نتایج نشان می‌دهد، پُست دپو در اولویت استفاده از ذخیره‌ساز قرار دارد. پس از تعیین اولویت‌ها برای نصب ذخیره‌ساز، حداکثر ظرفیت ذخیره‌ساز مناسب برای پست دپو برابر با ۱۱۹/۶۶ مگاوات ساعت و حداکثر توان ذخیره‌ساز برابر با ۱۸ مگاوات محاسبه شد. بر اساس یافته‌های تحقیق حاضر، استفاده از ذخیره‌ساز در پست انتخاب شده موجب تعویق توسعه پست به میزان ۷ سال و سود حاصل از به تعویق افتادن توسعه شبکه، برابر ۴۰ درصد هزینه سرمایه‌گذاری می‌باشد. خاطرنشان می‌شود، استفاده از ذخیره‌سازها علاوه بر منافع اقتصادی و سود ناشی از تعویق توسعه پُست، تأثیرات زیست‌محیطی ناشی از کمتر مصرف شدن سوخت مانند کاهش گازهای گلخانه‌ای را نیز به همراه دارد که بررسی این موضوع، هدف تحقیق حاضر نبوده است.

با توجه به محدودیت‌های مالی طرح‌های توسعه ظرفیت نیروگاه و نیز روند افزایشی مصرف برق در ایران، استفاده از ذخیره‌سازها، می‌تواند هزینه‌های شبکه برای پاسخگویی به تقاضای برق را به میزان قابل توجهی کاهش دهد. بنابراین با توجه به منافع اقتصادی ذخیره‌سازها در شبکه و نقش آن‌ها در جهت افزایش اطمینان و کیفیت توان شبکه، پاسخگویی به نیاز ساعات اوج بار شبکه و کاهش نیاز به احداث واحدهای نیروگاهی، استفاده از ذخیره‌سازها در شبکه‌های داخلی به سیاست‌گذاران برق کشور توصیه می‌شود. یافته‌های این تحقیق یک مبنای علمی برای ارزیابی منافع اقتصادی حاصل از کاربرد ذخیره‌ساز در شبکه برق کشور فراهم می‌سازد.

خاطرنشان می‌شود، در این تحقیق از ذخیره‌ساز باتری استفاده شد که به عنوان پیشنهاد تکمیلی می‌توان استفاده از ذخیره‌سازهایی همچون ابررسانا و تلمبه‌ای ذخیره هوای فشرده در صنایع و استفاده از ذخیره‌سازها در شبکه‌های برق جهت از بین بردن نوسان ولتاژ را مدلسازی و نتایج حاصل را با نتایج این تحقیق مقایسه نمود. به عنوان پیشنهاد برای تحقیقات آتی، بررسی و مقایسه نتایج تحقیق حاضر با انواع الگوریتم‌های جستجوکننده مانند الگوریتم ژنتیک و ازدحام ذرات نیز می‌تواند به تقویت نتایج حاصل کمک نماید.

۷. تعارض منافع

تعارض منافع وجود ندارد.

ORCID

Mohammad Sayadi https://orcid.org/0000-0003-2731-9233
Siab Mamipour https://orcid.org/0000-0001-5406-4913
Hoda Talebi https://orcid.org/0000-0001-8917-854X

۸. منابع

اصغرپور، محمد جواد. (۱۳۸۳). *تصمیم‌گیری‌های چند معیاره*، نشر دانشگاه تهران، چاپ سوم.

امیری، مقصود و دارستانی فراهانی، احمد و محبوب قدسی، مهسا (۱۳۹۵). *تصمیم‌گیری چند معیاره*. انتشارات دانشگاهی کیان، چاپ اول.

تقی‌زادگان کلانتری، نوید و فنونی، یوسف و آهنگری حساس، مرتضی (۱۴۰۰). جایابی بهینه سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی با در نظرگیری عدم قطعیت‌های تولید منابع تجدیدپذیر. *مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، دوره ۳، شماره ۱۹، صفحات ۲۰۶-۱۹۹.

جان‌نثار، محمدرسول و کلانتر، محسن و صدیقی انارکی، علیرضا (۱۳۹۸). تخصیص بهینه باتری ذخیره‌ساز انرژی در شبکه توزیع انرژی الکتریکی با هدف سودآوری حداکثری. *نشریه مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران*، سال ۴، شماره ۱۷، صفحات۲۹۵-۲۸۷.

حسینی، محمد و عزیزی، حسن و جوانبخت، حسین (۱۳۹۵). سند راهبردی و نقشه راه طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی ذخیره‌سازهای انرژی در صنعت برق. تهران: *پژوهشگاه نیرو*.

زیبنده، هادی (۱۳۹۴). ذخیره‌سازهای انرژی و نقش آنها در بهینه‌سازی و کاهش مصرف انرژی. اولین کنفرانس بین‌المللی یافته‌های نوین علوم و تکنولوژی.

عباسی سنجدری، محمدحسین و عفت‌نژاد، رضا و رضاپور، کامبیز (۱۳۹۵). مدل‌سازی اقتصادی و فنی به‌کارگیری بهینه از ذخیره‌سازهای انرژی در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی. *فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*، سال ۲، شماره ۴، صفحات ۳۲-۷.

علیزاده، محمد و جعفری نوکندی، میثم و سلطان مرادی، یامین(۱۳۹۸). مدلسازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره‌ساز انرژی، سلول خورشیدی، خودروی برقی و پاسخ‌گویی بار، *مدل‌سازی در مهندسی*، سال ۱۷، شماره ۵۷، صفحات ۲۲۶-۲۱۵.

غدیریان، داود و مغانی، شکرالله (۱۳۹۱). کاربرد سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی به منظوراوج‌زدایی بار در شبکه توزیع نمونه (مجتمع زاگرس). دومین کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.

منظور، داود و رحیمی، علیرضا. (۱۳۹۴). اولویت‌بندی نیروگاه‌های تولید برق در ایران با استفاده از مدل‌های تصمیم‌گیری چندشاخصه. *پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران*، دوره ۴، شماره ۱۴، صفحات ۲۱۵-۱۹۱.

وزارت نیرو، شرکت توانیر. سایت آمار صنعت برق

References

Afshan, R. and Salehi, J. (2017). Optimal operation of distribution networks with presence of distributed generations and battery energy storage systems considering uncertainties and risk analysis. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, Vol. 9(1), 014102.

Arango, H. and Abreu, J. P. and Bonatto, B. D. and Kagan, N. and Tahan, C. M. V. and Gouvea, M. R. (2008, May). A model for electricity markets: The impact of regulation on value. In 2008 5th International Conference on the European Electricity Market, (pp. 1-6), IEEE.

Chen, X. and Huang, L. and Liu, J. and Song, D. and Yang, S. (2022). Peak shaving benefit assessment considering the joint operation of nuclear and battery energy storage power stations: Hainan case study. *Energy*, Vol.239, 121897.

Choi, Won-Bin and Hwachang Song (2016). Mixed Integer Linear Programming-Based Peak Shaving Algorithm Considering Multiple Energy Storage Systems. *International Journal of Applied Engineering Research*, Vol.11, no. 13, pp. 7986-7988, ISSN 0973-4562.

Danish, S. M. S. and Ahmadi, M. and Danish, M. S. S. and Mandal, P. Yona, A. and Senjyu, T. (2020). A coherent strategy for peak load shaving using energy storage systems. *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 101823.

Dunn, Bruce and Haresh, Kamath and Tarascon, Jean-Marie (2011). Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, Vol. 334, pp. 928-935.

Fahrioglu Murat (2016), "Effect of Demand Management on Regulated and Deregulated Electricity ", *Energy Policy journal*, Vol. 90, PP. 115–120.

Ginley, D., Green, M. A., & Collins, R. (2008). Solar energy conversion toward 1 terawatt. *MRS bulletin*, 33(4), 355-364.

Huisman, R. and Kilic, M. (2013). A history of European electricity day-ahead prices. *Applied Economics*, Vol. 45(18), pp. 2683-2693.

Jang, D. and Eom, J. and Park, M. J. and Rho, J. J. (2016). Variability of electricity load patterns and its effect on demand response: A critical peak pricing experiment on Korean commercial and industrial customers. *Energy Policy*, Vol. 88, pp.11-26.

Jankowiak, C. and Zacharopoulos, A. and Brandoni, C. and Keatley, P. and MacArtain, P. and Hewitt, N. (2020). Assessing the benefits of

decentralised residential batteries for load peak shaving. *Journal of Energy Storage*, Vol. 32, 101779.

Kerdphol, T. and Qudaih, Y. and Mitani, Y. (2016). Optimum battery energy storage system using PSO considering dynamic demand response for microgrids. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. (83), pp. 58-66.

Kharbach, M. (2016). Diversification criteria for power systems. *Energy Policy*, Vol. 90, pp. 183-186.

Lamadrid, Alberto (2015). Optimal use of energy storage systems with renewable energy". *Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 71, pp. 101–111.

Leadbetter, J. and Swan, L. (2012). Battery storage system for residential electricity peak demand shaving. *Energy and buildings*, Vol. 55, pp. 685-692.

Leou, R. C. (2012). An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, Vol. 34(1), pp. 132-137.

Oudalov, A. Chartouni, D. Ohler, C. & Linhofer, G. (2006, October). Value analysis of battery energy storage applications in power systems. In 2006 *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition* (pp. 2206-2211). IEEE.

Panajotovic, B. and Jankovic, M. and Odadzic, B. (2011, October). ICT and smart grid. *In 2011 10th International Conference on* Telecommunication in Modern Satellite Cable and Broadcasting Services (TELSIKS), *IEEE*, Vol. 1, pp. 118-121.

Pimm, A. J. and Cockerill, T. T. and Taylor, P. G. (2018). The potential for peak shaving on low voltage distribution networks using electricity storage. *Journal of Energy Storage*, Vol. 16, pp. 231-242.

Prasatsap, U. and Kiravittaya, S. and Polprasert, J. (2017). Determination of optimal energy storage system for peak shaving to reduce electricity cost in a university. *Energy Procedia*, Vol. 138, pp. 967-972.

Saboori, H. and Hemmati, R. and Abbasi, V. (2015). Multistage distribution network expansion planning considering the emerging energy storage systems. *Energy conversion and management*, Vol. 105, pp. 938-945.

Shahinzadeh, H. and Gheiratmand, A. and Fathi, S. H. and Moradi, J. (2016, April). Optimal design and management of isolated hybrid renewable energy system (WT/PV/ORES). In 2016 21st Conference on Electrical Power Distribution Networks Conference (EPDC), *IEEE*, pp. 208-215.

Teki, V. K. and Maharana, M. K. and Panigrahi, C. K. (2021). Study on home energy management system with battery storage for peak load shaving. *Materials Today: Proceedings*, Vol. 39, pp. 1945-1949.

Walawalkar, R. and Apt, J. and Mancini, R. (2007). Economics of electric energy storage for energy arbitrage and regulation in New York. *Energy Policy*, Vol. 35(4), pp. 2558-2568.

Zheng, Y. and Dong, Z. Y. and Luo, F. J. and Meng, K. and Qiu, J. and Wong, K. P. (2013). Optimal allocation of energy storage system for risk mitigation of DISCOs with high renewable penetrations. *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 29(1), 212-220.

ضمیمه

نتایج اولویت‌بندی پُست‌ها با معیارهای منفرد و دو به دو

جدول ٦. امتیاز و رتبه پُست‌های برق با معیار منفرد اوج‌سایی

نام پُست	K_{1-PSH}	K_{2-PSH}	K_{3-PSH}	امتیاز	رتبه
ابوذر	۰/۰٤۷	۰/۰۲۷	۰/۰٤٥	۰/٤٦۱۸٥٤	۷
آزادی	۰/۰٥۹	۰/۰۲٥	۰/۰٦٤	۰/٥۸۳۰۹۲	٤
آذربایجان	۰/۰۸٦	۰/۰٤۱	۰/۰۳	۰/٥٦۷۸۹۲	٦
اکباتان	۰/۰٥	۰/۰۳٤	۰/۰٦۱	۰/٥۷۷۸۸۷	٥
سینا	۰/۰۷٤	۰/۰۳۸	.۰/۰٦۷	۰/٦۸٥۸۸٥	۲
دپو	۰/۱۳٤	۰/۰۳۸	۰/۰۷٥	۰/۸۷۱۱۸۷	۱
یاخچی‌آباد	۰/۰٥۲	۰/۰۳۲	۰/۰٦٦	۰/٦۲٥۰۱۲	۳

جدول ۷. امتیاز و رتبه پُست‌های برق با معیار منفرد تسطیح بار

نام پُست	K_{1-LL}	K_{2-LL}	امتیاز	رتبه
ابوذر	۰/٤۱۸	۰/۱٦٦	۰/۹٥٤۳٤۳	۳
آزادی	۰/۳۳۳	۰/۱۲۹	۰/۷٥۰٥۰۸	٦
آذربایجان	۰/۳٦٦	۰/۱۳٦	۰/۸۰۷٤٦۳	٥
اکباتان	۰/۲۷۸	۰/۱۰۷	۰/٦۲٤٤٦۱	۷
سینا	۰/٤۳٥	۰/۱٦۳	۰/۹٦۳۷۸۸	۲
دپو	۰/٤٦۰	۰/۱٦٤	۰/۹۹۳۹۷۷	۱
یاخچی‌آباد	۰/۳۷٦	۰/۱٤۹	۰/۸٥۷٤۸۷	٤

جدول ۸. امتیاز و رتبه پُست‌های برق با معیار منفرد اقتصادی

نام پست	امتیاز	رتبه
ابوذر	۰/۱٤٤۹۸۹	٤
آزادی	۰/۱٤۸٤٥۳	۳
آذربایجان	۰/۱٥۱۳۰۳	۱
اکباتان	۰/۱۳٥۳۸	٦
سینا	۰/۱۳۳۹۳	۷
دپو	۰/۱٥۰٥۱۷	۲
یاخچی‌آباد	۰/۱۳٥٤۲۷	٥

جدول ۹. اولویت‌بندی پُست‌های برق با معیارهای دو به دو

معیار تسطیح بار و اقتصادی			معیار اوج سایی و اقتصادی			معیار اوج‌سایی و تسطیح بار		
نام پست	امتیاز	رتبه	نام پست	امتیاز	رتبه	نام پست	امتیاز	رتبه
ابوذر	۰/۹٥٥٦٥	۲	ابوذر	۰/٥۸٥۳۳۷	۷	ابوذر	۰/٦٥۸۲۰	٥
آزادی	۰/۸۲۷۳۲	٦	آزادی	۰/٦۸۲۱۱۱	٤	آزادی	۰/٦٤۹۸۳	٦
آذربایجان	۰/۸۷۱٥۹	٤	آذربایجان	۰/٦۷٥۳٤۹	٥	آذربایجان	۰/٦٦۳۳۸	٤
اکباتان	۰/۷۱٤٤۸	۷	اکباتان	۰/٦٥٦۷۰۱	٦	اکباتان	۰/٥۹٦٤٥	۷
سینا	۰/۹۳۷٦۰	۳	سینا	۰/۷۳٥٤٤۹	۲	سینا	۰/۷۹٦٦۸	۲
دپو	۰/۹۹٤۲٥	۱	دپو	۰/۹۰۱۹۳٦	۱	دپو	۰/۹۲۰۱٤	۱
یاخچی‌آباد	۰/۸۷۰۰۰	٥	یاخچی‌آباد	۰/۷۲٤۰۳	۳	یاخچی‌آباد	۰/۷۱۹۰۳	۳

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

استناد به این مقاله: صیادی، محمد، ممی‌پور، سیاب، طالبی، هدی. (۱۳۹۹). اولویت‌بندی پُست‌های فوق توزیع تهران در استفاده از ذخیره‌ساز باتری به منظور اوج‌سایی و تسطیح بار شبکه: رویکرد برنامه‌ریزی چندمعیاره، پژوهشنامه اقتصاد انرژی ایران، ۳۷ (۱۰)، ۹۹-۱۲۸.

Iranian Energy Economics is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License.