نشریه علمی (فصلنامه) پژوهش‌های اقتصاد صنعتی
سال پنجم، شماره ۱۶، تابستان ۱۴۰۰ ( ۹۴ ـ ۷۵ ) مقاله: پژوهشی

Quarterly Journal of Industrial Economics Researches
Vol. 5, No. 16, Summer 2021

# مدلسازی اقتصادی- زیست محیطی کاربرد ذخیره ساز در صنعت برق ایران با استفاده از الگوریتمOSP چندهدفه

**[۱]محمد صیادی*، [۲]امیرمحمد امیریا ن راد**

۱. استادیار گروه اقتصاد انرژی و منابع،دانشکده اقتصاد، دانشگاه خوارزمی، تهران، ایر ان
۲. کارشناس ارشد مهندسی صنایع،گرایش سیستم های انرژی،دانشگاه آزاد واحد تهران جنوب، تهران، ایر ان.

دریافت: ۱۴۰۰/۲/۳ پذیرش:۱۴۰۰/۷/۹

# Economic-Environmental Modeling of Energy Storage Application in Electricity Industry: Using Multi-Objective PSO Algorithm

**Mohammad Sayadi*, [2] Amirmohammad Amirian Rad [1]**

[1]Assistance Professor,Department of Economics of Energy and Resources, Faculty of Economics, Kharazmi . Uniersity, Tehran, Iran

[2]Ms in Industrial Engineering, Energy systmes, Islamic Azad University South Tehran Branch, Tehran, Iran

Received: 2021/04/23 Accepted: 2021/10/01

## چکیده

استفاده از ذخیره‌سازها موجب بهبود قدرت پاسخگویی به بار، افزایش قابلیت اطمینان شبکه و کاهش نیاز به احداث ظرفیت نیروگاهی جدید در صنعت برق می‌شود. با توجه به منافع اقتصادی- زیست‌محیطی استفاده از ذخیره‌سازها در صنعت برق، هدف اصلی این تحقیق بررسی کاربرد ذخیره‌ساز برق در شبکه برق با اهداف حداقل‌سازی تلفات، آلایندگی زیست‌محیطی و هزینه‌های سوخت سیستم است. در همین راستا سه سناریو تحت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه (MOPSO) طراحی شده است که در سناریو شماره ۱ بار مصرفی شبکه صرفاً توسط دیزل ژنراتورها تأمین می‌شود. در سناریو شماره ۲، منابع تولید توان تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به شبکه اضافه می‌شود و در سناریوی شماره ۳ علاوه بر دیزل ژنراتور و توربین بادی و پنل‌های خورشیدی، ذخیره‌سازهای انرژی به شبکه افزوده شده و با الگوریتم MOPSO جایابی ذخیره‌سازها انجام شده است. نتایج حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که کاراترین نتیجه برای اهداف طراحی شده با حل مدل تحت سناریوی شماره ۳ قابل دستیابی است. بر این اساس، میزان تلفات شبکه، هزینه سوخت و آلایندگی در حرکت از سناریوی اول (حالت پایه) به سناریوی سوم به ترتیب ۴۳۲ کیلووات، ۱۳/۷ هزار دلار و ۷۵ کیلوگرم کاهش نشان می‌دهد. این نتایج و یافته‌ها می‌تواند به استفاده بهینه از ذخیره‌سازهای انرژی به منظور بهبود پایداری و امنیت شبکه، کاهش تلفات و آلایندگی در صنعت برق کشور کمک کند.

**واژه‌های کلیدی:** الگوریتم PSO چند هدفه، ذخیره‌ساز انرژی، صنعت برق، انرژی تجدیدپذیر، تلفات

**طبقه بندی Jel** L69, C61, Q53

## Abstract

Implementing the energy storage improves power load response, and network reliability, as well as reduces the need to build new power capacity in the electricity Using the energy storage improves responsiveness power into load, increases network reliability, and reduces the need to build new power capacity in the electricity industry. Regarding the economic- environmental benefits of using energy storage in the electricity industry, the main objective of this research is to investigate the application of electrical network's energy storage with the aim of minimizing losses, environmental pollution, and system fuel costs. In this regard, three scenarios have been designed under the multi-objective particle swarm optimization (PSO) algorithm, which in scenario number 1, network consumption load is provided only by diesel generators. In scenario number 2, the renewable energy sources of wind and solar are added to the network, and in scenario number 3 further diesel generator and wind turbine and solar panels, energy storages are added to the network, and the PSO algorithm for optimal placement of the storage devices is performed. The results show that the most efficient result for the designed purposes can be achieved by solving the model under scenario number 3. Accordingly, the amount of network losses, fuel costs, and pollution in motion from the first scenario (base scenario) to the third scenario shows a decrease of 432 kW, 13.7 thousand dollars, and 75 kg, respectively. These results can help to optimum usage of energy storage devices in order to improve sustainability and network security, losses decreasing, and pollution decreasing in the electricity industry.

**Keywords:** PSO Algorithm, Energy Storage, Electricity Industry, Renewable Energy, Losses ses
**JEL Classifications:** L69, C61, Q53

**نویسنده مسئول**: محمد صیادی

*Corresponding Author: Mohammad Sayadi
Email: m.sayadi@khu.ac.ir

## ۱. مقدمه

صنعت برق به عنوان یکی از مهم‌ترین صنایع زیربنایی، نقش اساسی و بنیادینی در ایجاد زیرساخت‌های توسعه در زمینه‌های گوناگون اقتصادی، صنعتی، فرهنگی اجتماعی ایفا می‌کند. از این رو، بهینه‌سازی این صنعت، پاسخگوی به تقاضای روزافزون برق و افزایش قابلیت اطمینان شبکه از جمله مسائل کلیدی برنامه‌ریزان صنعتی در جوامع مختلف است (صیادی و همکاران، ۱۳۹۹). یکی از مسائلی که امروزه مورد توجه برنامه‌ریزان و مدیران صنعت برق قرار دارد، تغییرات زیاد و عدم یکنواخت بودن منحنی بار در ساعات مختلف شبانه‌روز است. این موضوع باعث شده است تا فقط در ساعات پیک‌بار از تمامی ظرفیت نصب‌شده تولید کشور استفاده شود و در ساعات کم باری و میان باری 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. علاوه بر این 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.

ازآنجاکه هزینه تولید برق و قیمت فروش آن در ساعات مختلف شبانه‌روز با توجه به راه افتادن بازار برق، تفاوت‌های چشمگیری دارد، ایده ذخیره‌سازی برق در ساعات غیر پیک (برق ارزان) و استفاده از آن در ساعات پیک (برق گران) مطرح شد. سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به‌عنوان یک‌راه حل برای چالش فوق از طریق تسهیل در افزایش نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر، تسطیح منحنی بار، کمک به کنترل فرکانس، به تعویض انداختن توسعه خطوط انتقال، کاهش نوسانات ولتاژ، افزایش کیفیت توان و قابلیت اطمینان می‌باشند. علاوه بر این، استفاده از ذخیره‌سازها منافع غیرمستقیمی از جمله افزایش رضایتمندی مصرف‌کنندگان برق و کاهش هزینه‌های خاموشی به دنبال افزایش قدرت پاسخگویی به بار در شبکه می‌شود.

روش‌های متنوعی در خصوص ذخیره‌سازی انرژی برق وجود دارند که می‌توان انرژی را در ساعات غیر پیک ذخیره نمود (عشقی و همکاران، ۱۳۹۴). 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). در واقع، سیستم‌های ذخیره‌ساز انرژی به‌عنوان یک راهکار مؤثر برای مقابله با چالش فوق از طریق تسهیل در افزایش نفوذ منابع انرژی تجدید پذیر، 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).

هدف اصلی تحقیق حاضر، حداقل‌کردن هزینه‌های سوخت، انتشار آلایندگی زیست‌محیطی و تلفات شبکه با وارد کردن (جایابی بهینه) ذخیره‌سازهای برق به‌صورت ترکیبی در کنار منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر (پنل‌های خورشیدی و بادی) و دیزلی است. برای این منظور با بکارگیری یک الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه[1]، سه سناریو طراحی شده است که در سناریو شماره (۱) بار مصرفی شبکه صرفاً توسط دیزل ژنراتورها تأمین می‌شود. در سناریو شماره (۲)، منابع تولید توان تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به شبکه اضافه می‌شود و در سناریوی شماره (۳) علاوه بر دیزل ژنراتور و توربین بادی و پنل‌های خورشیدی، ذخیره‌سازهای انرژی به شبکه افزوده شده و بهینه‌یابی مربوطه انجام می‌شود و نتایج حاصل از سناریوها با یکدیگر مقایسه می‌شود.

در این تحقیق از سه نوع ذخیره‌ساز باتری و ابر خازن و چرخ طیار به همراه ریز شبکه که متشکل از دیزل ژنراتورها و سیستم تولید توان خورشیدی و بادی به‌صورت ترکیبی (هیبرید) استفاده شده است. علاوه بر این، تحقیق حاضر با توجه به جایابی منابع ذخیره‌ساز توسط الگوریتم PSO در سیستم ترکیبی، جنبه جدیدی را در قیاس با سایر مطالعات موجود در ادبیات موضوعی معرفی کرده است.

تحقیق حاضر بدین صورت سازماندهی شده است: پس از تبیین مقدمه تحقیق در بخش اول، بخش دوم به پیشینه تحقیق اختصاص دارد که طی آن به بررسی مهم‌ترین مطالعات موجود در ادبیات موضوعی پرداخته شده است. در بخش سوم به روش‌شناسی تحقیق و ارائه مدل طراحی شده پرداخته شده است. بخش چهارم تحقیق به تجزیه و تحلیل نتایج تحقیق اختصاص دارد و در خاتمه به جمع‌بندی و نتیجه‌گیری بر اساس یافته‌های تحقیق پرداخته شده است.

## ۲. مبانی نظری تحقیق

در شکل کلی می‌توان ساختار شبکه‌های برق را در قالب

1 . Multi-Objective Particle Swarm Optimization

سه‌دسته فعالیت معرفی کرد: ۱) تولید برق: فرایندی است که طی آن از یک منبع انرژی استفاده می‌شود تا انرژی الکتریکی تولید شود. ۲) انتقال: فرآیند جابه‌جایی توان الکتریکی را انتقال انرژی الکتریکی می‌نامند که معمولاً شامل انتقال انرژی الکتریکی از مولد یا تولیدکننده به پست‌ها توزیع نزدیک مراکز مصرف است و ۳) توزیع: مرحله تحویل (توزیع) انرژی الکتریکی به مصرف‌کننده نهایی است (حری و همکاران، ۱۳۹۷). افزایش قابلیت اطمینان شبکه و پاسخگویی به بار در کلیه فرآیندهای سه‌گانه اهمیت دارد، هرچند که بخش تولید مهم‌ترین بخش در مدیریت شبکه برق به شمار می‌رود.

یکی از مسائلی که در مطالعات اخیر مربوط به مدلسازی شبکه برق مورد توجه قرار می‌گیرد، در نظر گرفتن فعالیت‌هایی است که بهبود قابلیت اطمینان[۱] شبکه را با کاهش هزینه‌های خاموشی و نیز کاهش نیاز به افزایش ظرفیت نیروگاهی افزایش می‌دهد. (فهریوقلو، ۲۰۱۶).[۲] استفاده از واحدهای ذخیره‌سازی انرژی برای ذخیره انرژی در ساعات غیراوج و استفاده از همان انرژی ذخیره شده برای مدیریت بار شبکه در ساعات اوج را می‌توان نام برد که قابلیت اطمینان شبکه برق را به میزان قابل توجهی افزایش می‌دهد (خرباچ، ۲۰۱۶).[۳]به همین دلایل در شبکه‌های هوشمند برق در کنار نیروگاه‌های 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 در مواقع نیاز تحویل شبکه موردنظر شده و مورد مصرف قرار می‌گیرد (کردفول و همکاران)[۵]. برای بهبود قابلیت اطمینان شبکه و افزایش پاسخگویی به بار، یافتن پاسخ برای حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه با توجه قیود مدل می‌تواند از اهمیت ویژه‌ای برخوردار باشد.

## عوامل مؤثر بر هزینه شبکه

عوامل مهمی در هزینه شبکه برق تأثیرگذار هستند که در یک دسته‌بندی کلی می‌توان آن‌ها را به هزینه‌های مستقیم (هزینه‌های خصوصی) و هزینه‌های غیرمستقیم (هزینه‌های زیست‌محیطی به عنوان هزینه‌های جنبی ناشی از فعالیت نیروگاه‌ها در شبکه) شبکه دسته‌بندی نمود (ژانگا، ۲۰۱۷)[۶]. هزینه‌های سوخت نیروگاه‌ها و هزینه تلفات از جمله مهم‌ترین هزینه‌های مستقیم و هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای از جمله هزینه‌های غیرمستقیم یا هزینه‌های زیست‌محیطی فعالیت نیروگاه‌ها محسوب می‌شوند. چنانچه هزینه‌های غیرمستقیم (هزینه‌های انتشار گازهای گلخانه‌ای) همراه با هزینه‌های مستقیم مرتبط با فعالیت نیروگاه‌ها در مدلسازی تحقیق وارد شود، آنگاه هزینه‌های شبکه از نوع هزینه‌های اجتماعی[۷] خواهد بود.

مطالعات مختلفی در خصوص مدلسازی هزینه‌های شبکه برق صورت گرفته است که در یک دسته‌بندی می‌توان این مطالعات را به مطالعات تک هدفه و مطالعات چندهدفه دسته‌بندی نمود. به عنوان نمونه، مطالعه کومار و همکاران (۲۰۱۲) [۸] به حداقل‌سازی تلفات شبکه، صفدری و همکاران (۲۰۱۵) به حداقل‌سازی هزینه‌های جاری واحدهای تولید برق پرداخته‌اند که در دسته مطالعات تک هدفه می‌توان قرار داد. از سوی دیگر، تمرکز مطالعات اخیر بر بهینه‌سازی چندهدفه بوده است که بطور نمونه می‌توان به مطالعات چن و همکاران (۲۰۱۸)، ربزک و همکاران (۲۰۱۸)[۹] و لارسن و سوما (۲۰۲۱)[۱۰] اشاره کرد که در این مطالعات به حداقل‌سازی هزینه‌های کل شبکه شامل حداقل‌سازی هزینه‌های مستقیم و غیرمستقیم (هزینه‌های زیست‌محیطی) پرداخته شده است. در تحقیق حاضر با یک مسأله بهینه‌یابی مقید مواجه هستیم که ضمن ورود و مدلسازی (جایابی بهینه) ذخیره‌ساز در شبکه، تابع هدف شامل هزینه‌های تلفات شبکه، هزینه سوخت و هزینه‌های انتشار آلایندگی است، حداقل می‌شود.

## تلفات شبکه

اولین مسأله در برنامه‌ریزی و مدلسازی هزینه‌های شبکه برق، در نظر گرفتن رابطه مربوط به اصل بقای انرژی است: مجموع توان تولیدی با مجموع توان مصرف شده در بارها و توان تلف شده در مسیر انتقال برابر است. بنابراین، تلفات برابر با تفاوت بین تولید و مصرف بار در شبکه است (عفت‌نژاد و زارع برگ‌آبادی، ۱۳۹۲). برای این منظور می‌توان شبکه انتقال دارای n واحد تولیدی را در نظر گرفت که نیروگاه‌های آن به وسیله خطوط انتقال به همدیگر و به مصرف‌کننده متصل می‌شوند. این خطوط انتقال دارای تلفات می‌باشند. اگر تلفات حاصل از

1 . Reliability
2 . Fahrioglu, (2016)
3 . Kharbach, (2016)
4 .Energy Storage Systems
5 . Kerdphol, et al, (2016)
6 . Zhanga and et. al, (2017)
7 . Social Cost
8 . Kumar and et., al (2012)
9 . Rizk and et., al (2018)
10 . Larsen, M., & Sauma, E. (2021)

انتقال توان در سیستم در نظر گرفته نشود، حل مسأله پخش بار اقتصادی با مساوی قرار دادن مجموع میزان تولید نیروگاه‌ها با مقدار بار مصرفی شبکه صورت می‌گیرد که این فرض خلاف واقعیت است. بنابراین به منظور در نظر گرفتن شرایط واقعی در سیستم قدرت باید میزان تلفات انتقال توان را نیز در مسأله وارد نمود. در این صورت مجموع توان تولیدی نیروگاه‌ها ($P_i$) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\sum_{i=1}^{n} P_i = P_D + P_L \qquad (۱)$$

در این رابطه $P_D$ توان توزیع یا پخش شده است و مقدار PL (تلفات توان) بصورت زیر به دست می‌آید:

$$PL = \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} P_i . B_{ij} . P_j + \sum_{i=1}^{n} B_{oi} . P_i + B_{oo} \qquad (۲)$$

که در آن، ضرایب $B_{ij}$ و $B_{oo}$ و $B_{oj}$ ضرایب تابع تلفات خطوط انتقال و Po توان مصرفی سیستم و $P_L$ توان تلفاتی خطوط انتقال می‌باشد. در این حالت بهینه‌سازی تغییر می‌نماید که مقادیر $B_{ij}$ و $B_{oo}$ و $B_{oi}$ در محاسبه نقاط بهینه مؤثر می‌شوند.

## سوخت نیروگاه‌ها

به طور معمول، تابع هزینه سوخت برای تولید توان در یک نیروگاه، به صورت یک تابع درجه دوم در نظر گرفته می‌شود (هوشمند و پرستگاری، ۱۳۸۷). برای این منظور، هزینه سوخت مصرفی برای تولید $P_i$ (توان تولیدی) در نیروگاه iام به وسیله $F_i$ مشخص می‌شود. از طرفی نرخ هزینه کل سیستم مساوی مجموع نرخ هزینه‌های واحدهای می‌باشد. در این صورت مطابق چن و همکاران (۲۰۱۸)[1]، مسأله توزیع اقتصادی بار (ED) به صورت زیر تعریف خواهد شد:

$$Fuel_{cost} = F_1 + F_2 + \cdots + F_n \qquad (۳)$$

$$Min\ Fuel_{cost} = \sum_{i=1}^{n} (a_i + b_i . P_i + c_i . P_i^2) \qquad (۴)$$

که در آن $Fuel_{cost}$ هزینه سوخت کل نیروگاه‌ها بوده و ai، bi و ci ضرایب هزینه‌ای واحد نیروگاهی i ام و n تعداد نیروگاه‌های سوخت فسیلی می‌باشد (سانمز، ۲۰۱۳).[2]

## انتشار آلودگی

در روش‌های جدید توزیع بار، برای جلوگیری از آثار مخرب زیست‌محیطی، تولید انرژی انرژی الکتریکی در پخش بار تغییراتی بوجود آمده و مسأله انتشار آلایندگی نیز علاوه بر مسأله پخش بار اقتصادی مطرح شده است. هدف از ورود هزینه انتشار در مدلسازی، کاهش آلودگی منتشر شده حاصل از استفاده از سوخت فسیلی در نیروگاه‌ها است. لازم به ذکر است، سه گاز اصلی آلوده کننده محیط زیست در نیروگاه‌ها، دی‌اکسید کربن ($CO_2$)، اکسید سولفور ($SO_X$) و ترکیبات آن و دی‌اکسید نیتروژن ($NO_X$) و ترکیبات آن می‌باشد که عمده آلودگی نیروگاه‌ها ناشی از $NO_X$ و $SO_X$ می‌باشد. عامل اصلی مؤثر بر میزان گازهای آلاینده خروجی نیروگاه‌ها، توان اکتیو تولیدی نیروگاه‌ها می‌باشد. بررسی رابطه بین آلودگی منتشره و توان اکتیو تولیدی مشاهده می‌شود که این رابطه یک رابطه غیرخطی می‌باشد و یک معادله غیرخطی درجه دوم بر حسب توان اکتیو تولیدی نیروگاه بیشترین تطابق را با تابع میزان آلودگی منتشره بر حسب توان اکتیو تولیدی نیروگاه خواهد داشت.

هدف از مسأله انتشار آلودگی، کاهش میزان آلاینده‌های خروجی نیروگاه‌ها می‌باشد. در این صورت با توجه به رابطه تابع درجه دوم، می‌توان گفت که هدف از انتشار آلایندگی، حداقل نمودن مجموع این تابع درجه دوم است (تاکور و همکاران، ۲۰۰۶)[3]:

$$Min\ E_{cost} = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i + \beta_i . P_i + \gamma_i . P_i^2) \qquad (۵)$$

که در آن $E_{cost}$ میزان آلودگی، $\alpha_i$ ، $\beta_i$ ، $\gamma_i$ ضرایب آلودگی ژنراتورها و n تعداد واحدهای نیروگاهی استفاده کننده از سوخت‌های فسیلی است.

به دلیل شکل‌گیری نقاط زانویی (نقاط مشتق‌ناپذیر) در برخی مطالعات از جمله آبیدو (۲۰۰۳)[4] و چن و همکاران (۲۰۱۸) تابع هزینه انتشار حاصلجمع دو قسمت یعنی یک تابع هزینه درجه دوم و قسمت دوم نیز قدر مطلق یک تابع سینوسی در نظر گرفته می‌شود. این تابع هزینه بصورت زیر ارائه می‌شود:

$$Min\ E_{cost} = \sum_{i=1}^{n} (\alpha_i + \beta_i . P_i + \gamma_i . P_i^2) + |e_i \sin(f_i . (P_{i,min} - P_i))| \qquad (۶)$$

که در آن، ei و fi ضرایب بازگشت نقاط زانویی می‌باشند.

1 . Chen and et., al (2018)
2 . Sönmez, Y. (2013).
3 . Thakur, and et., al (2006)
4 . Abido (2003)

### تابع هزینه کل شبکه

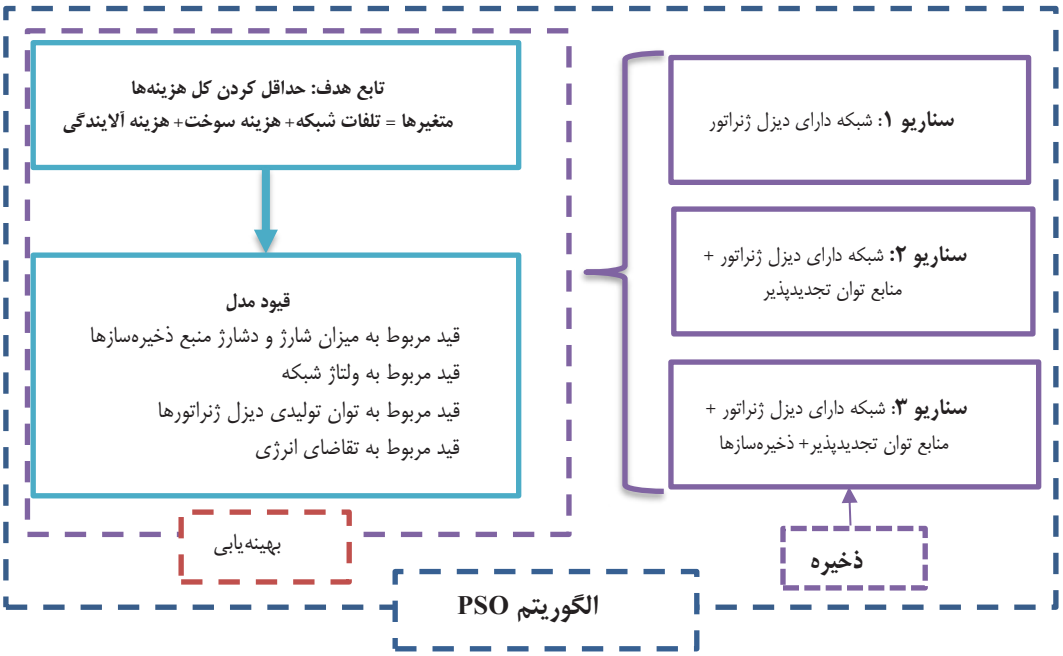
مطابق با مطالعات انجام شده در خصوص مدلسازی هزینه‌های شبکه برق از جمله مطالعات (تاکور و همکاران، ۲۰۰۶)، چن و همکاران (۲۰۱۸)، ریزک و همکاران (۲۰۱۸)[1]، چن و همکاران (۲۰۲۱) و لی و همکاران (۲۰۲۱)[2] می‌توان هزینه‌های کل شبکه برق را برای پیاده‌سازی بهینه‌ساز چند هدفه با لحاظ هزینه‌های زیست‌محیطی به صورت زیر در نظر گرفت:

$$Total\ Cost = E_{cost} + Fuel_{cost} + P_L \quad (۷)$$

که PL تلفات شبکه، $Fuel_{cost}$ هزینه سوخت و $E_{cost}$ هزینه انتشار آلایندگی است که تابع هدف کل تحقیق بدین صورت خواهد بود:

$$\text{تابع هدف} = Min \sum_{i=1}^{N} (fuel\ cost + Ecost + PL) \quad (۸)$$

لازم به ذکر است، هر یک از سه هزینه فوق به صورت متغیر وارد تابع هدف شده و این تابع، با توجه به قیودی که در مدل مفهومی تحقیق (شکل ۱) ذکر شده است، تحت الگوریتم PSO چند هدفه حداقل می‌شود. خاطر نشان می‌شود، با توجه به هدف اصلی تحقیق حاضر، ذخیره‌سازها تحت سناریوی سوم وارد مدل شده و اثرات ورود ذخیره‌سازها بر حداقل‌سازی هزینه‌های شبکه مورد بررسی و مقایسه با سایر سناریوها قرار می‌گیرد.




**نمودار ۱.** مدل مفهومی تحقیق

## ۳. پیشینه تحقیق

### ۳-۱. مطالعات داخلی

عباسی سنجدری و همکاران (۱۳۹۵) در مطالعه‌ای با عنوان "مدل‌سازی اقتصادی و فنی بکارگیری 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.

1 . Rizk and et., al (2018)

2 . Li and at,. al (2021)

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

جان نثار 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. نتایج بکارگیری الگوریتم‌های ابتکاری، ضمن تأمین اهداف مد نظر، مناسب‌ترین باتری و روش بهینه‌سازی را از بین باتری‌ها و روش‌های معرفی‌شده ارائه می‌دهد.

محمدی و همکاران (۱۳۹۸) به ارزیابی اقتصادی تاثیر شاخص نوع بهره برداری از سیستم ذخیره ساز انرژی (کل سال یا بخشی از سال) بر سود حاصل از آربیتراژ (جابجایی) انرژی در بازار برق، توسط یک ذخیره ساز انرژی الکتریکی پرداخته‌اند. برای ارزیابی تاثیر خطای پیش‌بینی قیمت بر درآمد آربیتراژ انرژی از دو نوع قیمت (قیمت واقعی، قیمت پیش‌بینی ۳ ساعت آینده) استفاده شده است. به دلیل هزینه‌های بالای سرمایه گذاری و افزایش طول عمر سیستم ذخیره ساز انرژی، تعداد شارژ و دشارژ انرژی در روز یک بار است که زمان شارژ در پایین ترین قیمت انرژی و زمان دشارژ در بالاترین قیمت انرژی برای افزایش درآمد آربیتراژ انرژی در نظر گرفته شده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، زمانی که سیستم ذخیره‌ساز انرژی در کل سال مورد بهره‌برداری قرار گیرد، هزینه سرمایه‌گذاری ۱۴۲ دلار بر هر کیلووات ساعت است که در مقایسه با هزینه ۱۶۸ دلار بر هر کیلووات ساعت در حالت عدم استفاده از ذخیره‌ساز، اقتصادی بودن استفاده از سیستم ذخیره‌ساز انرژی طی دوره بهره‌برداری را نشان می‌دهد.

## ۲-۳. مطالعات خارجی

کومار و همکاران (۲۰۱۲) [1] در مطالعه تحت عنوان "برنامه‌ریزی برای قدرت اقتصادی اشتراک در یک میکرو گرید مبتنی بر CHP به بررسی در طراحی میکرو شبکه‌های مبتنی بر ترکیب گرما و قدرت (CHP)، ظرفیت منابع انرژی توزیع شده (DER) باید به نحوی انتخاب شود که آن را از لحاظ اقتصادی خودکفا کند تا تمام بارهای سیستم را تأمین کند. مکان‌ها و اندازه‌های بهینه که مستقل از انواع DER های مبتنی بر CHP هستند، به ترتیب با شاخص حساسیت اتلاف (LSI) و با به حداقل رساندن تلفات با استفاده از روش بهینه‌سازی ذرات انتخاب می‌شوند. تمرکز اصلی این پژوهش بر این است که مجموعه‌های خروجی بهینه مطلوب DER-mix که در محدوده ظرفیت مربوطه خود عمل می‌کنند، بر اساس بهینه‌سازی چند هدفه و توازن بین مصرف سوخت و انتشار در یک میکرو شبکه شعاعی ۱۴ باس ۴-DER چگونه تعیین می‌شوند. بهینه‌سازی با استفاده از روش تفاضل (DE) تحت محدودیت برابری تقاضای واقعی، محدودیت نابرابری تعادل حرارتی و محدودیت ظرفیت DER انجام می‌شود و نتایج DE با نتایج PSO مقایسه شده است.

عفت نژاد و همکاران (۲۰۱۴)،[2] در مطالعه تحت عنوان" حل مسئله تعهد واحد در میکروشبکه‌ها با کمک الگوریتم جستجوی هارمونی در مقایسه با الگوریتم ژنتیک و ژنتیک بهبود یافته" این مقاله الگوریتم جستجوی هماهنگی را برای حل مسئله تعهد واحد (UC) ارائه می‌دهد. با توجه به این ترکیب از منابع متعارف و تجدید پذیر، تعهد واحد در مدیریت یک شبکه کوچک بسیار مهم و پیچیده‌تر می‌شود. در این مقاله یک روش مبتنی بر الگوریتم هماهنگی برای تعهد واحد در یک شبکه کوچک ارائه شده است. هدف این است که هزینه‌های عملیاتی شبکه کوچک را زمانی که جدا شده است حداقل کرده و بازده آن را هنگام اتصال به شبکه به حداکثر برساند پرداخته است.

کومار و همکاران (۲۰۱۵)، در مطالعه تحت عنوان "حل مسئله ارسال اقتصادی چند منظوره با کمک الگوریتم مرتب‌سازی ژنتیک نامغلوب" برنامه‌ریزی تولید یک سیستم قدرت چند واحدی برای ارسال اقتصادی بار از منظر زیست‌محیطی در این مقاله مورد بررسی قرار گرفته است. حداقل هزینه عملیاتی حداقل شرایط گسترش را تضمین نمی‌کند؛ بنابراین، آن را به عنوان یک مسئله چند هدفه، با قیدهای توازن توان و محدودیت توان ژنراتور در نظر می‌گیرند. این مشکل با استفاده از الگوریتم مرتب‌سازی غیرمنتظره ژنتیک به‌طور مؤثری حل شده است. یک راه حل بهینه پارتو بین دو هدف هزینه و گسترش تجهیزات نیروگاه به دست آمده است.

صفدری و همکاران (۲۰۱۵)، در مطالعه‌ای تحت عنوان "ارائه روشی نوین در بهره‌برداری بهینه ریز شبکه، با استفاده از بارهای پاسخگو و منابع ذخیره انرژی، با نفوذ زیاد منابع تجدیدپذیر" به

1 . Kumar and et., al (2012)

2 . Effatnejad and et., al (2014)

بررسی بهره‌برداری بهینه و اقتصادی یک ریزشبکه هوشمند، شامل تعدادی توربین بادی، مولد خورشیدی، میکروتوربین و منابع ذخیره‌ساز انرژی با در نظر گرفتن عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر و با مشارکت بارهای پاسخگو در حوزه مدیریت کوتاه‌مدت، در حالت متصل به شبکه مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده بیانگر عملکرد مناسب سیستم مدیریت انرژی درپوشش عدم قطعیت منابع تجدیدپذیر بوده و امکان نفوذ حداکثری این منابع را فراهم ساخته و ضمن تأمین توان مورد نیاز ریزشبکه و کاهش هزینه‌های جاری آن، سود قابل‌توجهی نصیب شرکت‌کنندگان در برنامه پاسخگویی بار می‌نماید.

دانیش و همکاران (۲۰۲۰)[1] یک استراتژی مسنجم 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 ارایه 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.

دی سیکویرا و پنگ (۲۰۲۱)[2]در تحقیقی به بررسی نقش سیستم ذخیره انرژی باتری در هموار کردن تولید برق بادی پرداخته‌اند. با مرور ادبیات موضوعی سیستم ذخیره انرژی باتری سه روش PI، فازی و MPC دارای بیشترین کاربرد در مطالعات مورد بررسی بوده است. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، ذخیره‌ساز باتری بهترین سیستم ذخیره انرژی برای کاهش نوسانات برق تولید شده از منابع بادی است.

لارسن و سوما (۲۰۲۱)[3]در تحقیق خود با استفاده از یک فرآیند تصمیم‌گیری چندمرحله‌ای به بررسی اثرات اقتصادی و کاهش انتشار سیستم‌های ذخیره انرژی بر برنامه‌های توسعه بلندمدت سیستم برق کشور شیلی پرداخته‌اند. یافته‌های تحقیق نشان می‌دهد، استفاده از سیستم ذخیره‌ساز باعث کاهش هزینه‌های کل سیستم و افزایش ملایم انتشار دی‌اکسید کربن در کشور شیلی شده است.

در جمع‌بندی از بررسی مطالعات موجود در پیشینه تحقیق می‌توان چنین عنوان نمود که در تحقیق حاضر، اهداف کاهش هزینه‌های سوخت، کاهش انتشار آلایندگی زیست‌محیطی و کاهش تلفات به صورت همزمان در یک تابع جندهدفه مدنظر قرار می‌گیرد. همچنین در این تحقیق از سه نوع ذخیره‌ساز باتری و ابر خازن و چرخ طیار به همراه ریز شبکه که متشکل از دیزل ژنراتورها و سیستم تولید توان خورشیدی و بادی به‌صورت ترکیبی (هیبرید) مورد استفاده قرار می‌گیرند. علاوه بر این و با توجه به این‌که در این سیستم ترکیبی، جایابی منابع ذخیره‌ساز توسط الگوریتم PSO نیز مدنظر است، تحقیق حاضر دارای نوآوری نسبت به مطالعات داخلی و خارجی موجود در ادبیات موضوعی تحقیق است.

## ۴. روش‌شناسی پژوهش

در این تحقیق، برنامه‌ریزی و جایابی بهینه منابع تولید توان پراکنده (دیزلی و تجدید پذیر) به همراه ذخیره‌سازی انرژی در شبکه‌های الکتریکی باهدف کاهش تلفات، آلایندگی و هزینه‌های کلی سیستم با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند مدنظر است تا بتوان با استفاده از بهینه‌سازی، شبکه الکتریکی با کارکرد مناسب‌تری را ایجاد نمود. به‌منظور بررسی و مدل‌سازی دقیق مسئله موردنظر از سناریوهای زیر در این تحقیق استفاده می‌شود:

**سناریو ۱:** بار مصرفی شبکه صرفاً توسط دیزل ژنراتورها[4] تأمین خواهد شد.

**سناریو ۲:** منابع تولید توان تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به شبکه (مفروض در سناریوی ۱) افزوده خواهد شد.

**سناریو ۳:** ذخیره‌سازهای انرژی علاوه بر منابع تولید توان تجدید پذیر بادی و خورشیدی به شبکه اضافه خواهد شد.

در سناریوهای شماره ۲ و ۳ هدف، کاهش هر چه بیشتر آلودگی نسبت به سناریوی شماره یک (سناریو پایه) است. درنهایت هر سه سناریو با یکدیگر مقایسه شده و نتایج تحلیل خواهد شد.

### ۴-۱. مراحل بهینه‌یابی سیستم

#### ○ مرحله اول: ظرفیت ذخیره‌سازی سیستم

ظرفیت ذخیره‌سازهایی با ظرفیت ۵ کیلووات به‌صورت پله‌ای به سیستم افزوده شده و این کار تا ظرفیت ۲۰۰ کیلووات رخداده است. پس‌ازآن در هر مرحله تلفات بار اکتیو و راکتیو محاسبه و

1 . Danish and et, al (2020)
2 . de Siqueira, & Peng, (2021)
3 . Larsen, M., & Sauma, E. (2021)
4 .Diesel Generator

موردبررسی قرار خواهد گرفت. با توجه به اینکه بار کل مورداستفاده در اوج مصرف مقدار ۶۳۹ کیلووات است، بنابراین انتخاب گنجایش ذخیره‌سازها در محدوده مقدار، تلفات شبکه دارای کمترین اندازه خواهد شد. لذا ظرفیت ۲۲۰ کیلووات به‌عنوان ظرفیت مطلوب ذخیره‌سازی در شبیه‌سازی در مرحله بعد قرار خواهد گرفت و تعدادی باس به‌عنوان باس کاندید توسط نرم‌افزار پیشنهاد شده است.

### ○ مرحله دوم: پخش بار در ریز شبکه

با توجه به اینکه روش پخش بار شبکه‌های انتقال همچون گوس – سایدل و نیوتن – رافسون در شبکه‌های توزیع کارایی ندارند. در این مرحله از شبیه‌سازی مطابق سو و گمال (۲۰۱۳)[1] از پخش بار پس رو– پیش رو[2] استفاده شده است.

### ○ مرحله سوم: شرط همگرایی

پس از مراحل ذکرشده، شرط همگرایی (مقدار توان حقیقی واردشده به شبکه و مقدار ولتاژ) مورد محاسبه قرار خواهد گرفت و در صورت عدم تائید مراحل بالا مجدد تکرار و درصورت حصول شرط همگرایی، روند جستجوی پاسخ متوقف خواهد شد.

## ۲-٤. الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

در هنگام بهینه‌سازی، شرایط اولیه با روش‌های مختلف مورد بررسی قرار می‌گیرد و اطلاعات به‌دست آمده، برای بهبود بخشیدن به یک فکر یا روش مورد استفاده قرار می‌گیرند (هاوت و هاوت، ۲۰۰۴).[3] در الگوریتم PSO، تعدادی از موجودات وجود دارند که به آن‌ها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابعی که قصد کمینه کردن (و یا بیشینه کردن) مقدار آن را داریم، پخش‌شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرارگرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی و بهترین محلی که درگذشته در آن بوده است و هم‌چنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان می‌رسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شوند تا آن که جواب موردنظر به دست بیاید.

هر ذره در الگوریتم PSO از سه بردار dبُعدی تشکیل‌شده است که d بعُدی فضای جستجو است. برای ذره iاُم این سه بردار عبارت‌اند از: $x^i$ موقعیت فعلی ذره، $v^i$ سرعت حرکت ذره و $x^{i,best}$ بهترین موقعیتی که ذره تابه‌حال تجربه کرده است.$X^i$ مجموعه‌ای از مختصات است که موقعیت فعلی ذره را نمایش می‌دهد. در هر مرحله‌ای که الگوریتم تکرار می‌شود،$x^i$ به‌عنوان یک جواب برای مسئله محاسبه می‌شود. هورفار و همکاران، ۲۰۰۷).[4] اگر این موقعیت بهتر از جواب‌های پیشین باشد در $x^{i,best}$ذخیره می‌شود.$f^i$ مقدار تابع هدف در $x^i$ و $f^{i,best}$ مقدار تابع هدف در $x^{i,best}$ است که هر دو از عناصر تشکیل‌دهنده هر ذره به‌حساب می‌آیند. ذخیره کردن مقدار $f^{i,best}$ برای انجام مقایسه‌های بعدی، ضروری است. اما ذخیره کردن مقدار $f^i$ ضروری نمی‌باشد. در هر تکرار $x^i$ و$v^i$ جدیدی به دست می‌آیند و منظور از اجرای الگوریتم، بهتر کردن $x^{i,best}$ به‌احتمال $x^i$است (استوپاتو و همکاران، ۲۰۱۴). اگر تعداد ذرات موجود در جمعیت،n آنگاه می‌توان روابط زیر را نوشت:

$$x^{i.best}[t] = \underset{\tau \le t}{\operatorname{argmin}}\ f(x^i[\tau]) = argmin\{f(x^{i.best}[t]).f^{i.best}[t-1])\} \quad (۹)$$

$$f^{i.best}[t] = f(x^{i.best}[t]) = \min_{\tau \le t} f^i[\tau] = \min\{f^i[t], f^{i.best}[t-1]\} \quad (۱۰)$$

$$x^{gbest}[t] = \underset{i=1....,n}{\operatorname{argmin}}(f^{i.best}[t]) \quad (۱۱)$$

$$f^{gbest}[t] = f(^{gbest}[t]) = \min_{i=1....,n} f^{i.best}[t] \quad (۱۲)$$

در مرحله ابتدایی الگوریتم، ذرات با موقعیت‌ها و سرعت‌های تصادفی ایجاد می‌شوند. در طی اجرای الگوریتم، موقعیت و سرعت هر ذره در مرحله t+1اُم از الگوریتم، از روی اطلاعات مرحله قبلی ساخته می‌شوند. اگر zj مؤلفهjاُم از بردار z باشد، آنگاه روابطی که سرعت و موقعیت ذرات را تغییر می‌دهند، عبارتند از:

$$f^{gbest}[t] = f(^{gbest}[t]) = \min_{i=1....,n} f^{i.best}[t] \quad (۱۳)$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1] \quad (۱۴)$$

در این روابط،w ضریب اینرسی،$r_1$ و $r_2$ اعداد تصادفی در بازه [۰و۱] با توزیع یکنواخت و همچنین$c_1,c_2$ ضرایب یادگیری

1 . Su and Gamal, 2013

۲. با شروع از انتهای گره تغذیه، ولتاژ گره‌های بار با توجه به امپدانس و جریان‌های عبوری از هر قطعه خط به‌روز می‌گردد.

3 . Haupt and Haupt, (2004)

4 . Hoorfar & etl al, (2007)

هستند. $r_1$ و $r_2$ باعث می‌شوند که نوعی گوناگونی در جواب‌ها به وجود بیاید و به این نحو جستجوی کاملی روی فضا انجام پذیرد. $c_1$ ضریب یادگیری مربوط به تجارب شخصی هر ذره است و در مقابل c2 ضریب یادگیری مربوط به تجارب کل جمع است (استوپاتو و همکاران، ۲۰۱۴).

مراحل الگوریتم PSO بدین صورت است که ابتدا تعدادی جمعیت بر روی فضای حالت مسئله پخش شده و سپس هر کدام از اعضا مقدار تابع هدف و مکان دقیق خود را اعلام می نمایند. بعد از این کار بهترین عضو که دارای کم ترین مقدار تابع هدف است، به عنوان عضو اول انتخاب می شود. مکان بعدی سایر اعضا تحت مکان بهترین عضو با معادلات مختص این الگوریتم تغییر یافته و مکان دیگری برای سایر اعضا به دست می آید. این مراحل آن قدر تکرار می شود تا بهترین عضو و مکان و شرایط آن مشخص گردد. و این موضوع در جایابی ذخیره‌سازها نیز آنقدر تکرار می‌شود تا جایابی بهینه به اتمام رسیده و بهترین عضو که حاوی مکان و اندازه مربوط به ذخیره‌سازها در شبکه ۱۴ باسه است، به دست آید.

- n ذره بساز.
- برای تمام ذرات، سرعت و موقعیتی تصادفی ایجاد کن.
- تا زمانی که شرایط خاتمه محقق نشده‌اند:
  - واحد به t اضافه کن.
  - مقدار تابع هدف را به ازای هر ذره محاسبه کن.
  - به ازای i از یک تا n
    - $x^{i.best}[t]$ را محاسبه کن.
  - مقدار بعدی i
  - $x^{gbest}[t]$ را محاسبه کن
  - به ازای i از یک تا n:
    - به ازای i از یک تا d:

$$v_j^i[t+1] = wv_j^i[t] + C_1 r_1 (x_j^{i.best}[t] - x_j^i[t]) + C_2 r_2 (x_j^{g\,best}[t] - x_j^i[t])$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1]$$

$$x_j^i[t+1] = x_j^i[t] + v_j^i[t+1]$$

    - مقدار بعدی j
  - مقدار بعدی i

**نمودار ۲.** مراحل الگوریتم ازدحام ذرات (PSO)

**مأخذ:** نیودا و همکاران (۲۰۱۸)[1]

## ۳-٤. تابع هدف و قیود مدل

متغیرهای تصمیم مورد استفاده در مدل تحقیق در جدول (۱) قابل مشاهده است.

**جدول۱.** متغیرهای تصمیم مدل

| نماد | متغیر تصمیم |
|---|---|
| $PG_i$ | توان تولیدی هر دیزل ژنراتور |
| $PG_{imin}$ | حداقل توان تولیدی دیزل ژنراتور |
| $PG_{imax}$ | حداکثر توان تولیدی دیزل ژنراتور |
| $B_{ij.}B_{oo.}B_{io}$ | ماتریس تلفات شبکه |
| $PL$ | تلفات شبکه |
| $P_d$ | تقاضا انرژی |
| $NO_x$ | انتشارات آلایندگی |
| $fuel\ cost$ | هزینه سوخت |
| a , b, c | ضرایب هزینه سوخت |
| SOC | میزان شارژ ذخیره‌ساز |
| $U_{i\,min}$ | حداقل ولتاژ در شبکه |
| $U_{i\,max}$ | ماکزیمم ولتاژ در شبکه |
| $U_i$ | ولتاژ در شبکه |
| $\alpha$ , $\beta_i$ , $\gamma_i$ | ضرایب آلایندگی دیزل ژنراتورها |

**مأخذ:** مفروضات پژوهش

1 . Nivedha and et., al (2018)

تابع هدف و قیود تحقیق به صورت زیر قابل ارائه است:

تابع هدف:

$$\text{تابع هدف} = Min \sum_{i=1}^{N} ( fuel\ cost + NO_x Emission + PL ) \quad (۱۵)$$

- هزینه سوخت

$$fuel\ cCost = \sum_{i=1}^{N} ( a_i + b_i \times PG_{imax} + c_i PG_{i\,max}^2 ) \quad (۱۶)$$

- انتشار آلایندگی

$$NO_x Emission = \sum_{i=1}^{N} ( \alpha_i + \beta_i \times PG_{imax} + \gamma_i \times PG_{i\,max}^2 ) + \left| e_i \sin ( f_i . (P_{i,min} - P_i) ) \right| \quad (۱۷)$$

- تلفات شبکه

$$PL = \sum_{i=1}^{N} \sum_{j=1}^{N} PG_i\, B_{ij} PG_j + \sum_{i=1}^{N} B_{oi}\, PG_i + B_{oo} \quad (۱۸)$$

- قید مربوط به میزان شارژ و دشارژ منبع ذخیره‌سازها

$$SOC_{min} \le SOC(t) \le SOC_{max} \quad (۱۹)$$

قید مربوط به ولتاژ شبکه

$$U_{min} \le U_i \le U_{i\,max} \quad (۲۰)$$

قید مربوط به توان تولیدی دیزل ژنراتورها

$$PG_{imin} \le PG_i \le PG_{imax} \quad (۲۱)$$

قید حاکم بر شبکه: توان تولیدی=تلفات+تقاضای انرژی

$$\sum_{i=1}^{N} PG_i - P_D - PL = \mathbf{0} \quad (۲۲)$$

هزینه سوخت دیزل‌ها بر اساس تابع هدف دیزل ژنراتور محاسبه می‌شود.

$$C_i = \alpha_i + \beta_i P_i + \gamma_i P_i^2 \quad (۲۳)$$

که ضرایب α- β- γ طبق جدول زیر برگرفته از مطالعه زکریازاده و همکاران (۲۰۱۴)[1] در مدل استفاده می‌شود.

**جدول ۲.** ضرایب تابع درجه دو دیزل ژنراتورها

| شماره ژنراتور | γ | β | α |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۰/۰۱۲۶ | ۰/۹ | ۲۲/۹۸۳ |
| ۲ | ۰/۰۲ | ۰/۱ | ۲۵/۳۱۳ |
| ۳ | ۰/۰۲۷ | ۰/۰۱ | ۲۵/۵۰۵ |
| ۴ | ۰/۰۲۹۱ | ۰/۰۰۵ | ۲۴/۹ |
| ۵ | ۰/۰۲۹ | ۰/۰۰۴ | ۲۴/۷ |

**مأخذ:** مفروضات پژوهش

همچنین تابع تولید توان بادی استفاده شده در شبیه‌سازی سناریوی دوم به صورت زیر است:

$$P_w(v) = f(x) = \begin{cases} 0, & 0 \le v_a \le v_d \\ P_{rated} \times \frac{v_a - v_d}{v_r - v_d}, & v_{ci} \le v_a \le v_r \\ P_{rated} v_r \le v_a \le v_{co} & \\ 0, & v_{co} \le v_a \end{cases} \quad (۲۴)$$

در این تحقیق یک شبکه تست ۱۴ باس استاندارد IEEE[2] در نظر گرفته شده است که عناصر آن مطابق با (بیلینتون، ۲۰۰۵)[3] عبارت است از:

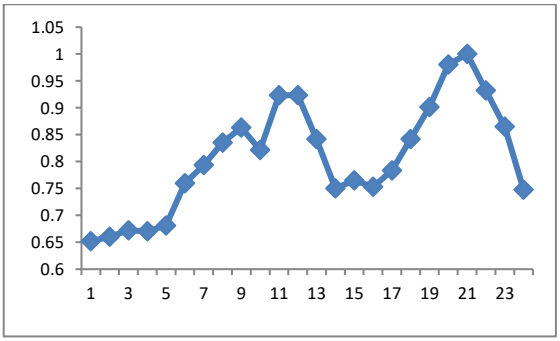
- بار شبکه از مصارف صنعتی و تجاری و مسکونی
- منابع تولید پراکنده از نوع توربین بادی
- پنل‌های خورشیدی
- دیزل با سوخت فسیلی
- منابع ذخیره‌ساز

1 . Zakariazadeh and et., al (2014)
2 . Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE)
3 . Billinton, 2005

در ادامه توضیحاتی در خصوص هر یک از عناصر ریزشبکه ارائه می‌شود:

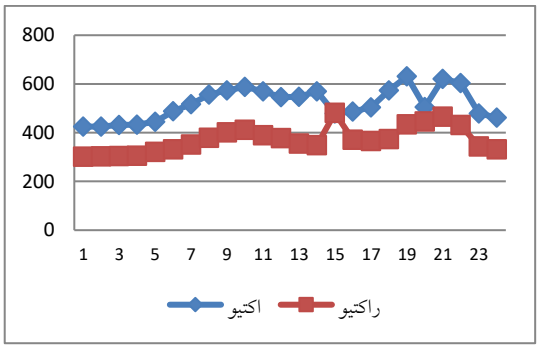
### ○ بار شبکه

با توجه به نمودارهای ۳ و ۴ که دارای ضرایب بار و منحنی بار مصرفی شبکه در ۲۴ ساعت شبانه‌روز است، بار شبکه در ساعت۲۱ که اوج مصرف خود می‌رسد و دارای ضریب بار ۱ و توان اکتیو ۶۳۹ و توان راکتیو ۴۵۴ است و در سایر ساعت شبانه‌روز به‌طور نسبی پراکنده شده است. بار شبکه مدنظر در این تحقیق به صورت زیر شبیه‌سازی شده است:




**نمودار۳.** ضریب بار مصرفی طی ۲۴ ساعت ایران

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش




**نمودار ٤.** داده‌های منحنی بار روزانه طی ۲۴ ساعت ایران

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

### ○ منابع انرژی‌های تجدیدپذیر از نوع توربین بادی

با توجه به متغیر بودن سرعت باد، مقادیر آن تصادفی می‌باشد. به همین دلیل حداکثر سرعت، حداقل سرعت به دلایل ذکرشده در شبیه‌سازی لحاظ شده است و توربین بادی اگر سرعت باد ۵ متر در ثانیه (۱۸ کیلومتر در ساعت) شود، شروع به حرکت می‌کند و در ۱۲ متر بر ثانیه بیشترین مقدار و اگر از ۲۵ متر در ثانیه (۹۰ کیلومتر در ساعت) تولید انرژی شود به‌طور خودکار قطع می‌گردد تا به قطعات دیگر آسیب وارد نشود (بیلینتون، ۲۰۰۵).

**جدول ۳.** داده‌های وزش باد در ۲۴ ساعت از شبانه‌روز

| ساعت | کیلووات بر مترمربع | ساعت | کیلووات بر مترمربع | ساعت | کیلووات بر مترمربع |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۰۰/۰۰ | ۹ | ۰۰/۳۸۱ | ۱۷ | ۰۰/۱۹۰ |
| ۲ | ۰۰/۰۰ | ۱۰ | ۰۰/۵۱۱ | ۱۸ | ۰۰/۰۸۰ |
| ۳ | ۰۰/۰۰ | ۱۱ | ۰۰/۶۱۰ | ۱۹ | ۰۰/۰۱۷ |
| ۴ | ۰۰/۰۰ | ۱۲ | ۰۰/۶۵۷ | ۲۰ | ۰۰/۰۰ |
| ۵ | ۰۰/۰۰ | ۱۳ | ۰۰/۶۴۸ | ۲۱ | ۰۰/۰۰ |
| ۶ | ۰۰/۰۱۹ | ۱۴ | ۰۰/۵۹۰ | ۲۲ | ۰۰/۰۰ |
| ۷ | ۰۰/۰۹۶ | ۱۵ | ۰۰/۴۴۷ | ۲۳ | ۰۰/۰۰ |
| ۸ | ۰۰/۲۲۲ | ۱۶ | ۰۰/۳۳۸ | ۲۴ | ۰۰/۰۰ |

**مأخذ:** مفروضات پژوهش

### ○ مولد دیزل با سوخت فسیلی

تولید برق در محل مصرف منجر به کاهش هزینه‌های تولید الکتریکی می‌شود، به‌این‌ترتیب، قیمت تمام‌شده انرژی الکتریکی کمتر از قیمت برق شبکه می‌شود. در سال‌های اخیر با بالا رفتن نسبی هزینه حامل‌های انرژی، با نصب چنین مولدهایی می‌توان به کاهش هزینه‌های شبکه کمک کرد. در جدول ۴، ضرایب فنی مربوط به دیزل ژنراتورهای تأمین‌کننده توان در سیستم ارائه شده است.

**جدول ٤.** ضرایب فنی مربوط به دیزل ژنراتورهای تأمین‌کننده توان در سیستم

| ضریب فنی | شماره Bus | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | ۱ | ۲ | ٦ | ۱۱ | ۱۲ |
| KW | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۳۰ |
| Ai | ۱۰/۱۹۳ | ۲/۰۵۳ | ۰/۵۷۶۸ | ۱/۱۸۲۵ | ۰/۳۳۸ |
| Bi | ۱۰۵/۱۸ | ۶۰/۲۸ | ۵۷/۷۸۳ | ۶۵/۳۴ | ۸۹/۱۴ |
| Ci | ۶۵/۲۲ | ۱۴/۴۲۹۶ | ۱۳۳/۰۵۹۹ | ۴۴ | ۵۷۴/۶۹ |
| Alpha | ۲۶/۵۵ | ۱۴/۴۲۹۶ | ۳/۰۳۵۸ | ۱۹/۳۸ | ۱/۰۳۴۸ |
| Beta | ۱۶/۱۸۳۶ | ۶۴/۱۵۳۶ | ۵۷/۴۳۰۳ | ۱۷۶/۶۷۴۶ | ۶۰/۳۸۴ |
| Gamma | ۷/۰۵۰۸ | ۱۳۰/۴۰۹ | ۳۱۱/۵۷۲۸ | ۸۲۱/۶۵۷۳ | ۹۴۳/۱۸۹ |
| Pmax | ۵۰۰ | ۲۰۰ | ۸۰ | ۱۰۰ | ۳۰ |
| Pmin | ۰ | ۴۰ | ۱۶ | ۲۰ | ۶ |
| Heat (Kj/KWh) | ۱۰۳۱۴ | ۱۱۰۴۱ | ۱۱۳۷۳ | ۱۰۵۸۱ | ۱۲۱۸۶ |

**مأخذ:** کومار، ۲۰۱۵

### ○ منابع ذخیره‌ساز

بنا بر تعریف «یک سیستم فیزیکی با قابلیت اخذ انرژی برای جایگزینی الکتریسیته در زمان‌های بعد» را یک منبع ذخیره‌ساز انرژی الکتریکی، می‌نامند (لیو، ۲۰۱۲).[1] امروزه ذخیره‌سازها با توجه به‌اندازه و ظرفیت، قابلیت ذخیره‌سازی انرژی تا مرز یک ماه را دارا می‌باشند (سو و همکاران،۲۰۱۳).[2] با توجه به شرایط اقلیمی و نوع نیروگاه موردنظر می‌توان به انواع روش‌ها از قبیل ذخیره‌سازی باتری‌ها، ذخیره‌سازی هوای فشرده، ذخیره‌سازی در ابر خازن‌ها، ذخیره‌سازی با استفاده از پتانسیل ریزش آب (سد ذخیره تلمبه‌ای)، ذخیره‌سازی در چرخ طیار، ذخیره‌سازی در میدان مغناطیسی، ذخیره‌سازی در پیل سوختی اشاره کرد. منابع ذخیره‌ساز انرژی مورد استفاده در مدلسازی این تحقیق شامل باتری و سوپرکاپاسیتور و چرخ طیار می‌باشد که ظرفیت و توان نامی آن‌ها در جدول ۵ آورده شده است.

**جدول ۵.** منابع ذخیره‌سازی انرژی

| نام ذخیره‌ساز | باتری | سوپر کاپاسیتور | چرخ طیار |
|---|---|---|---|
| ظرفیت (کیلووات ساعت) | ۵۲۰ | ۴۶۰ | ۳۹۰ |
| توان نامی (کیلووات) | ۱۵۰ | ۴۰ | ۳۰ |

**مأخذ:** مفروضات تحقیق

## ۵. تجزیه و تحلیل یافته‌های پژوهش

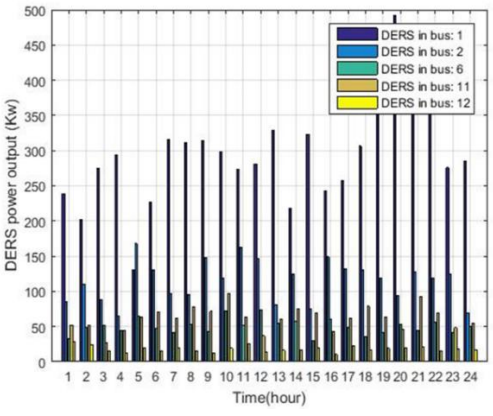
### ۵-۱. داده‌ها و متغیرهای الگو

بر اساس مدلسازی که در بخش قبل ارائه گردید، در این بخش شبیه‌سازی با در نظر گرفتن ۳ سناریو متفاوت، به دنبال کاهش انتشار آلایندگی و بهبود تلفات شبکه و کاهش هزینه سوخت مصرفی (هزینه دیزل‌ها) است و در نهایت هر سه سناریو با یکدیگر مقایسه شده و نتایج تحلیل خواهد شد.

### ۵-۲.. نتایج اجرای سناریوی ۱

مطابق با این سناریو، بار مصرفی شبکه صرفاً توسط دیزل ژنراتورها تأمین خواهد شد و با در نظر گرفتن اینکه مصرف دیزل‌ها از سوخت فسیلی است بهتر است که ساعات کمتری از آن استفاده شود تا از آلایندگی تولیدشده آن کاسته شود و با مدنظر داشتن اینکه دیزل در مدار قابلیت دیسپاچ شدن را دارا است (چه زمانی در مدار باشد و چه زمانی نباشد) پخش بار شبکه توسط دیزل ژنراتورها صورت گرفته و نتایج شبیه‌سازی انجام شده در ضمیمه شماره ۱ موجود است.

بار پیش‌بینی‌شده در ۲۴ ساعت روز طبق شکل میله‌ای زیر در نظر گرفته‌شده و دیزل ژنراتورهای پراکنده‌شده در باس های شماره ۱،۲،۶،۱۱،۱۲ طبق این منحنی بار به‌صورت هوشمند توسط نرم‌افزار با در نظر گرفتن پارامترهای پخش بار اقتصادی، اقتصادی‌ترین توان را در شبکه تولید نموده‌اند.

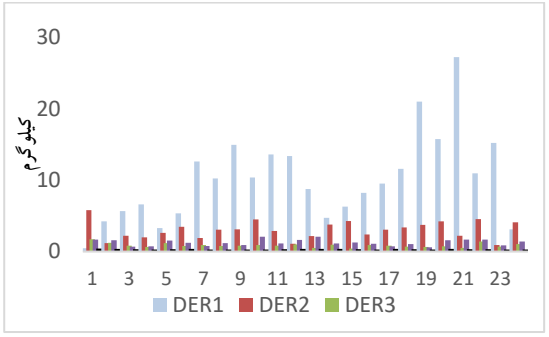



**نمودار ۵.** توان تولیدی دیزل ژنراتورهای پراکنده در سیستم ۱۴ باسه در طول۲۴ ساعت تحت سناریوی ۱

1 . Leou (2012)

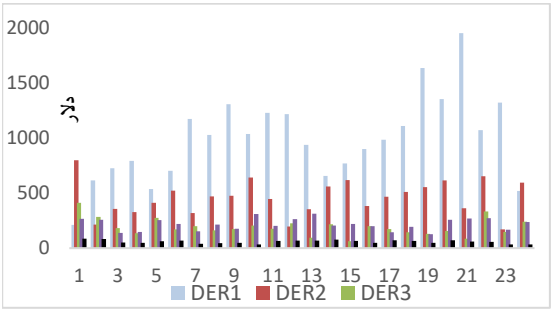
2 . Su, et al, (2013)

با توجه به نمودارهای شماره ۶ و ۷، ملاحظه می‌شود که ساعت ۲۱ بیشترین توان تولید رخ داده است و بیشترین میزان انتشار آلایندگی را نیز دارا است که به‌طور مثال برای DER1 در ساعت ۲۱ مقدار ۲۷/۲۲ کیلوگرم و برای DER2 نیز ۲/۲۳ کیلوگرم است.




**نمودار ٦.** آلایندگی تولیدی دیزل‌ها در ریز شبکه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی ۱

با مشاهده نمودار ۷ که میزان سوخت مصرفی دیزل‌ها در سیستم ۱۴ باسه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز را نشان می‌دهد، می‌توان نتیجه گرفت که دیزل شماره ۱ در ساعت ۲۱ با بیشترین توان تولید دارای بیشترین سوخت مصرفی است که مقدار در DER1 آن نیز ۱۹۵۰ دلار است.




**نمودار ۷.** سوخت مصرفی دیزل‌ها در سیستم ۱۴ باسه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی ۱

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

در جدول ۶ خلاصه نتایج شبیه‌سازی توان تولیدی، هزینه سوخت و آلایندگی را تحت سناریوی ۱ می‌توان ملاحظه نمود. بر این اساس، کل توان تولیدی، هزینه سوخت و آلایندگی به ترتیب برابر با ۱۳۳۹۰ کیلووات، ۴۷۳۹۴ دلار و ۱۷۶ کیلوگرم است.

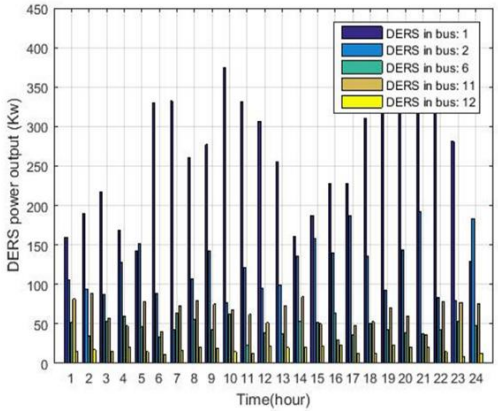
**جدول ٦.** شبیه‌سازی توان تولیدی و هزینه سوخت و آلایندگی تحت سناریوی [۱]

| شماره باس | توان تولیدی (کیلووات) | هزینه سوخت (دلار) | آلایندگی (کیلوگرم) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۷۳۴۰ | ۲۳۹۶۰ | ۱۱۱ |
| ۲ | ۲۸۰۵ | ۱۱۴۷۳ | ۳۵ |
| ۶ | ۱۱۲۵ | ۴۶۶۹ | ۱۰ |
| ۱۱ | ۱۶۷۷ | ۵۷۹۵ | ۱۶ |
| ۱۲ | ۴۴۳ | ۱۵۵۱ | ۴ |
| میزان کل | ۱۳۳۹۰ | ۴۷۳۹۴ | ۱۷۶ |

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

## ۳-۵. نتایج اجرای سناریوی ۲

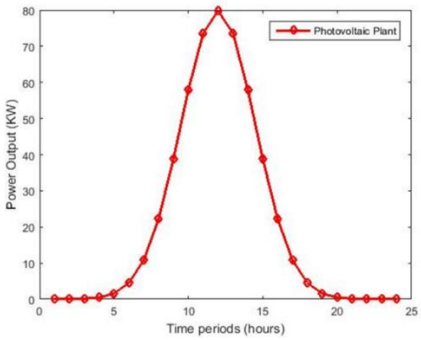
تحت این سناریو، منابع تولید توان تجدید پذیر بادی و خورشیدی به شبکه اضافه شده است و نتایج به‌دست‌آمده از شبیه‌سازی مشاهده می‌شود که بخشی از توان شبکه و میزان آلایندگی و هزینه سوخت بهبودیافته و مقادیر مربوطه کمتر از سناریو ۱ شده است. پس از انجام شبیه‌سازی نتایج حاصله درستی این ادعا را اثبات خواهد کرد.




**نمودار ۸.** توان تولیدی دیزل ژنراتورهای پراکنده در شبکه طی ۲۴ ساعت تحت سناریوی ۲

با مشاهده خروجی به‌دست‌آمده در ساعات ۱ تا ۵ بامداد و از ساعات ۸ تا ۱۲ شب ملاحظه می‌شود که با عدم میزان تابش خورشید روبرو هستیم، تولید برق فتوولتاییک متوقف‌شده و تولید توان از میزان تابش خورشید به شبکه انتقال پیدا نمی‌کند. می‌توان مشاهده کرد که در ساعات ۱۰ صبح تا ۲ بعد ظهر که تابش

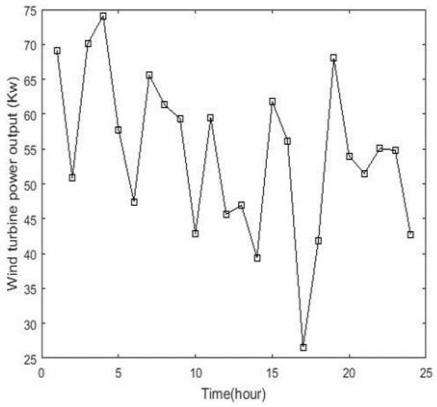
خورشید دارای بیشترین مقدار خود در ۲۴ ساعت از شبانه‌روز است دارای بیشترین توان تولیدی از آن‌ها نیز خواهد بود.




**نمودار ۹.** منحنی نمونه توان تولیدی منابع فتوولتاییک در طی ۲۴ ساعت

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

با توجه به اینکه تغییرات سرعت باد به صورت یک متغیر غیرقابل پیش‌بینی است، لذا توان خروجی و تحویلی توربین بادی دارای عدم قطعیت و به صورت تولید تصادفی خواهد بود.




**نمودار ۱۰.** منحنی توان تولیدی توربین‌های بادی در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

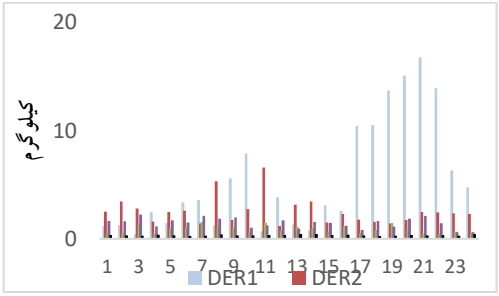
با ملاحظه میزان توان توربین بادی در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز می‌توان مشاهده نمود که بیشترین توان تولیدی در ساعت ۴ بامداد با مقدار متناظر ۷۴ کیلووات و سرعت باد ۱۰ متر بر ثانیه رخد اده است (جدول ۷).

**جدول ۷.** میزان توان توربین بادی طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز

| ساعت | کیلووات | ساعت | کیلووات | ساعت | کیلووات |
|---|---|---|---|---|---|
| ۱ | ۶۸ | ۹ | ۵۹ | ۱۷ | ۲۷ |
| ۲ | ۵۱ | ۱۰ | ۴۳ | ۱۸ | ۴۲ |
| ۳ | ۷۱ | ۱۱ | ۶۰ | ۱۹ | ۶۷ |
| ۴ | ۷۳ | ۱۲ | ۴۶ | ۲۰ | ۵۶ |
| ۵ | ۵۶ | ۱۳ | ۴۷ | ۲۱ | ۵۲ |
| ۶ | ۴۳ | ۱۴ | ۳۸ | ۲۲ | ۵۶ |
| ۷ | ۶۶ | ۱۵ | ۶۴ | ۲۳ | ۵۵ |
| ۸ | ۶۳ | ۱۶ | ۵۷ | ۲۴ | ۴۳ |

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

در نمودار ۱۱ می‌توان نتایج حل مدل برای آلایندگی تولیدی دیزل‌ها در ریز شبکه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی دوم تحقیق را مشاهده کرد. بر این اساس، بیشترین میزان آلایندگی در ساعت ۲۱ شب ایجاد شده است.




**نمودار ۱۱.** آلایندگی تولیدی دیزل‌ها در ریز شبکه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی ۲ (کیلوگرم)

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

در جدول ۸ خلاصه نتایج نتایج شبیه‌سازی توان تولیدی و هزینه سوخت و آلایندگی تحت سناریوی ۲ قابل مشاهده است. مجموع توان تولیدی، هزینه سوخت و آلایندگی به ترتیب ۱۱۱۱۳کیلووات، ۳۸۲۵۶ دلار و ۱۲۱ کیلوگرم بدست آمده است.

**جدول ۸.** نتایج شبیه‌سازی توان تولیدی و هزینه سوخت و آلایندگی تحت سناریوی ۲

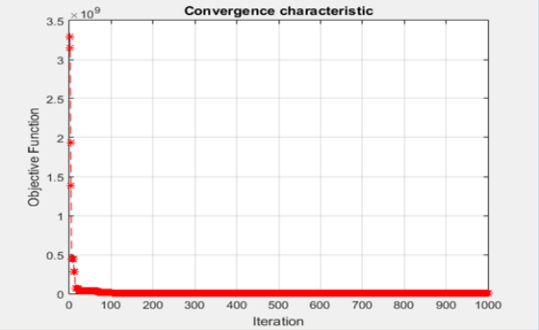
| شماره باس | توان تولیدی (کیلووات) | هزینه سوخت (دلار) | آلایندگی (کیلوگرم) |
|---|---|---|---|
| ۱ | ۵۳۰۳/۶ | ۱۵۸۷۰/۸ | ۶۰ |
| ۲ | ۲۵۵۵ | ۹۵۰۰/۲ | ۲۷/۶ |
| ۶ | ۱۱۰۵/۹ | ۴۵۶۱/۸ | ۹/۵ |
| ۱۱ | ۱۵۲۵/۳ | ۵۷۹۵/۳ | ۱۶ |
| ۱۲ | ۴۲۲/۷ | ۱۴۶۸/۵ | ۳/۷ |
| میزان کل | ۱۱۱۱۳ | ۳۸۲۵۶ | ۱۲۱ |

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

## ٤-٥. نتایج اجرای سناریوی ۳

با در نظر گرفتن سه نوع ذخیره‌ساز که شامل باتری، سوپرکاپاسیتور و چرخ طیار است، علاوه بر اضافه شدن ذخیره‌سازهای انرژی و جایابی آن‌ها به منابع تولید توان تجدید پذیر بادی و خورشیدی برای بهبود کاهش تلفات شبکه، انتشار آلایندگی و کم شدن هزینه سوخت در سیستم از الگوریتم PSO استفاده می‌شود که بتواند در جهت بهینه‌سازی شبکه الکتریکی صورت بگیرد.

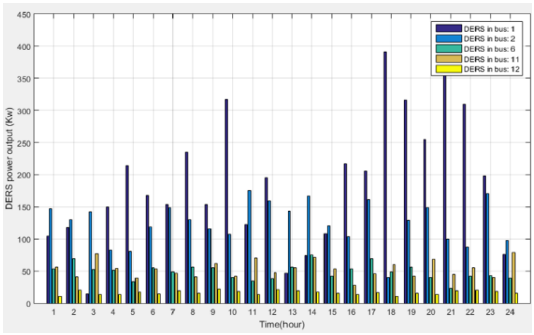
در برنامه‌نویسی با الگوریتم PSO تعداد جمعیت را روی ۲۰۰ ذره و تعداد ۱۰۰۰ بار تکرار است و برای تعداد ذرات بالاتر هم انجام‌شده است ولی نتایج متفاوتی حاصل نشده است. ضرایب C1:1.5 و C2:2 و W=1 که مربوط به تنظیمات الگوریتم PSO است که از مطالعه کومار و همکاران (۲۰۱۵) استفاده شده است. متغیر مستقل یک بردار به طول ۳ است که شماره باس‌های کاندید جهت نصب ذخیره‌سازها را انجام می‌دهد و هر یک از سه متغیر باس ۱ تا باس ۳ یک عدد طبیعی بین ۱ تا ۱۴ است که مکان نصب ذخیره‌ساز را مشخص می‌کند؛ باید متغیر X عدد طبیعی باشد چون نشان‌دهنده باس‌های موردنظر است (عربلی و همکاران، ۲۰۱۳).[1]




**نمودار ۱۲.** همگرایی الگوریتم پس از ۱۰۰۰ تکرار در سناریوی ۳

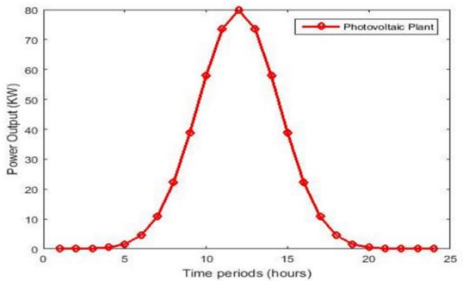
**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

جایابی ذخیره‌سازها در باس‌های شماره ۲، ۶، ۱۳ به‌طور خودکار جایابی شده و نتایج حاصل چندین بار تکرار شده است تا مورد تأیید باشد.




**نمودار ۱۳.** توان تولیدی دیزل ژنراتورهای پراکنده در سیستم ۱۴ باسه در طی ۲۴ ساعت

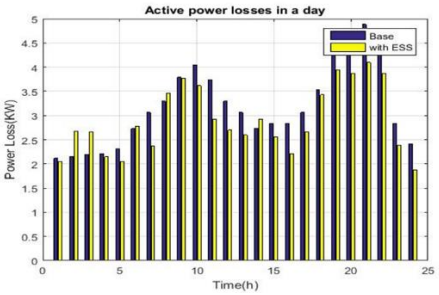
**مأخذ:** یافته‌های پژوهش




**نمودار ١٤.** منحنی بار توان تولیدی سلول‌های فتوولتاییک در طول ۲۴ ساعت شبانه‌روز

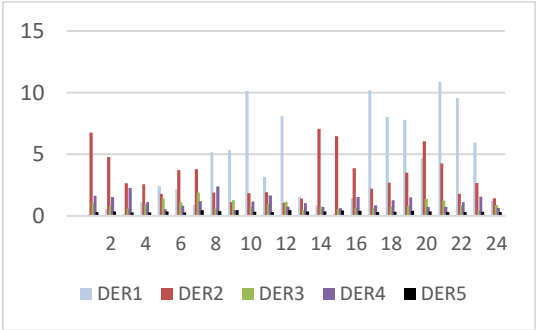
**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

1 . Arabali and et., al (2013)



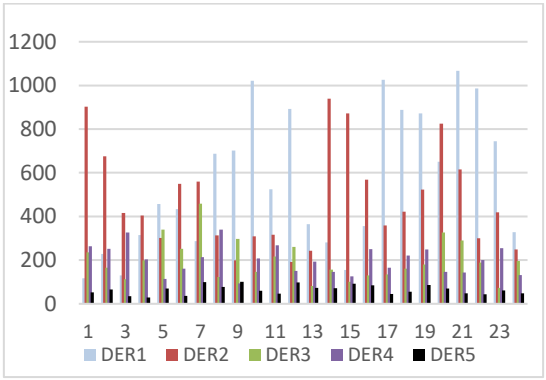

**نمودار ۱۵.** میزان کل تلفات منابع ذخیره‌ساز باتری، سوپرکاپاسیتور و چرخ طیار

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش




**نمودار ۱۶.** آلایندگی تولیدی دیزل‌ها در ریز شبکه در طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی ۳

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

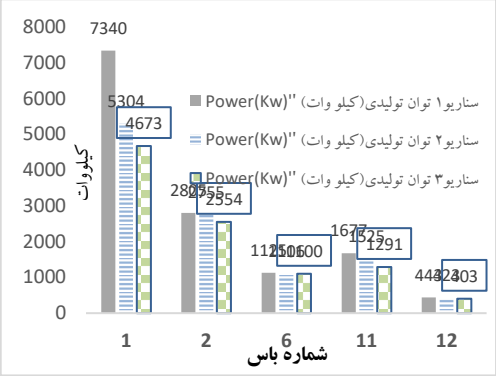



**نمودار ۱۷.** سوخت مصرفی دیزل‌ها در سیستم ۱۴ باسه طی ۲۴ ساعت شبانه‌روز تحت سناریوی ۳

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

## ۵-۵. مقایسه نتایج اجرای سناریوهای مختلف تحقیق

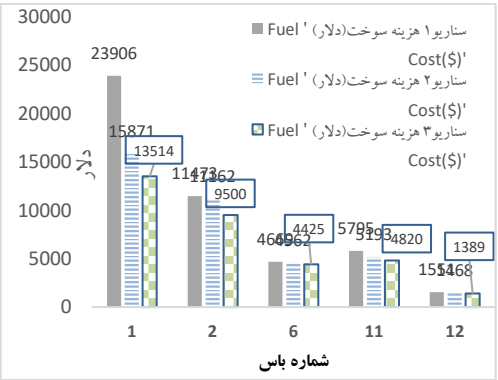
پس از طراحی سناریوهای مختلف و حل مدل، در این بخش به مقایسه نتایج تحقیق تحت سناریوهای مختلف طراحی شده پرداخته می‌شود. در نمودار ۱۸ می‌توان کل توان تولیدی در ۲۴ ساعت توسط منابع تولید پراکنده را تحت سه سناریوی تحقیق مشاهده نمود. بر این اساس، حداقل توان تولیدی در کلیه باس‌های تحقیق تحت سناریوی سوم تحقیق حاصل می‌شود. بنابراین، شبکه طراحی شده تحت فروض سناریوی سوم کاراتر عمل می‌کند.




**نمودار ۱۸.** مقایسه سه سناریو از نظر مقدار توان تولیدی در ۲۴ ساعت از شبانه‌روز

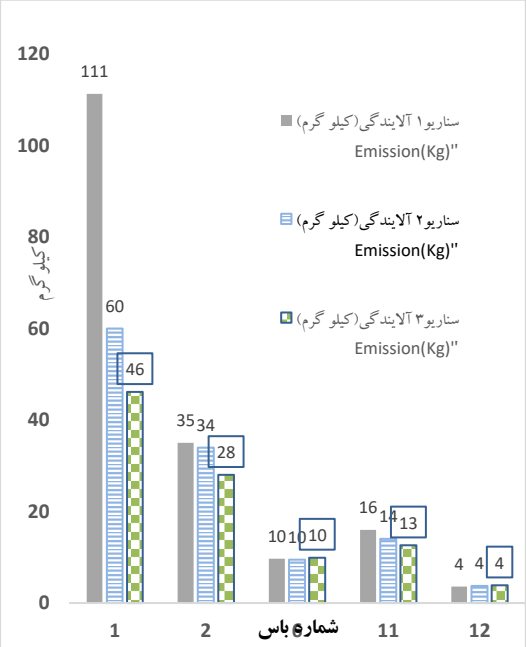
**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

در نمودار ۱۹ می‌توان نتایج حاصل از هر سه سناریوی تحقیق را از نظر هزینه سوخت ملاحظه کرد. بر این اساس، کمترین هزینه سوخت تحت سناریوی سوم تحقیق که از ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است، حاصل شده است.




**نمودار ۱۹.** مقایسه سه سناریو از نظر مقدار هزینه سوخت در ۲۴ ساعت

بر اساس نتایج ارائه شده در نمودار ۲۰، مقایسه نتایج مدل تحت سه سناریوی تحقیق حاکی از آن است که کمترین میزان آلودگی در دیزل ژنراتورها و در باس‌های مختلف، در سناریوی شماره ۳ قابل دسترس است.




**نمودار ۲۰.** مقایسه سه سناریو از نظر مقدار آلایندگی در دیزل ژنراتورها در ۲۴ ساعت

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

خلاصه نتایج حاصل از بررسی سناریوهای تحقیق و میزان بهبود در عملکرد شبکه را در جدول ۱۱ می‌توان ملاحظه نمود. با توجه به کاهش آلایندگی، کاهش تلفات و کاهش هزینه‌های سوخت دیزل ژنراتورها، می‌توان نتیجه گرفت که بهترین سناریوی پیشنهادی، سناریوی شماره سوم می‌باشد. آلایندگی در سناریوی شماره ۱ دارای مقداری عددی۱۷۶ کیلوگرم، در سناریوی شماره دو دارای مقداری عددی ۱۲۱کیلوگرم و در سناریوی شماره سوم دارای مقداری عددی ۱۰۱ کیلوگرم می‌باشد که این مقدار در سناریوی شماره سوم در مقایسه با حالت اولیه شبکه به مقدار۵۴ کیلوگرم کاهش محسوس داشته است. شبکه در حالت پایه دارای تلفات به مقدار ۷۱۹ کیلووات بوده، سپس در سناریوی شماره دو با اضافه کردن منابع توربین بادی و فتوولتائیک به مقدار ۳۹۷ کاهش یافته و در سناریوی شماره سوم که بهترین حالت پیشنهادی است به کمترین حد خود به مقدار ۲۸۷ رسیده است و این کاهش به دلیل حضور منابع ذخیره‌سازی و عدم کارکرد بیشتر منابع دیزلی می‌باشد. این یافته با نتیجه مطالعه نیگو و همکاران (۲۰۱۹)[1] از این جهت که استفاده از ذخیره‌ساز در شبکه برق موجب کاهش تلفات شبکه می‌شود در یک راستا است.تلفات از حالت پایه تا سناریوی شماره سه به مقدار کلی ۴۳۲ کیلووات کاهش بسیار محسوس داشته است. در ارتباط با هزینه سوخت دیزل ژنراتورها، این منابع در هر سناریو برای تأمین بار دائم مشترک ریز شبکه مورد نظر دارای هزینه سوختی می‌باشند. بیشترین ( به‌نوعی بدترین) هزینه سوخت مربوط به سناریوی شماره یک با مقدار ۴۷۳۹۴ دلار، سناریوی دوم با مقدار۳۸۲۵۶ دلار و سناریوی سوم با مقدار ۳۳۶۴۸ دلار می‌باشد. با مقایسه اجمالی اعداد و ارقام می‌توانیم به نتیجه برسیم که بازهم در سناریوی شماره سوم مصرف سوخت از دو سناریوی قبلی کاهش قابل‌ملاحظه‌ای داشته است. هزینه سوخت در حرکت از حالت پایه به سناریوی شماره سه به میزان ۱۳۷۴۶ دلار کاهش یافته است که این خود نشان‌دهنده بهبود در عملکرد شبکه است.

**جدول ۱۱.** مقایســه نتایج کاهش تلفات، توان تولیدی و آلایندگی تحت سناریوهای مختلف تحقیق

| | نتایج سناریو ۱ | نتایج سناریو ۲ | نتایج سناریو ۳ | مقدار کاهش (بهبود) در حرکت از سناریو ۱ به سناریو ۲ | مقدار کاهش (بهبود) در حرکت از سناریو ۲ به سناریو ۳ |
|---|---|---|---|---|---|
| میزان کل بار در ۲۴ ساعت | ۱۲۳۱۷ | ۱۰۵۱۵ | ۱۰۰۸۵ | ۱۸۰۲ | ۴۳۰ |
| میزان کل تلفات شبکه (کیلووات) | ۷۱۹ | ۳۹۷ | ۲۸۷ | ۳۲۲ | ۱۱۰ |
| میزان کل تولید توان (کیلووات) | ۱۳۳۹۰ | ۱۱۱۱۳ | ۱۰۰۲۲ | ۲۲۷۷ | ۱۰۹۱ |
| میزان کل هزینه سوخت (دلار) | ۴۷۳۹۴ | ۳۸۲۵۶ | ۳۳۶۴۸ | ۹۱۳۸ | ۴۶۰۸ |
| میزان آلایندگی شبکه (کیلوگرم) | ۱۷۶ | ۱۲۱ | ۱۰۱ | ۵۴ | ۲۰ |

**مأخذ:** یافته‌های پژوهش

## ۶. بحث و نتیجه‌گیری

منابع انرژی تجدیدپذیر (تولیدات پراکنده) جهت تولید توان الکتریکی در سطح وسیعی در سیستم‌های قدرت بکار گرفته می‌شوند. در برخی از این منابع مانند 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 می‌گردد که این امر مشکلات فراوانی را برای عملکرد سیستم قدرت به همراه خواهد داشت (منسز و کانتراس، ۲۰۱۶).[2] به همین دلیل، به‌کارگیری سیستم‌های ذخیره انرژی

1 . Neagu and et. al (2019)

2 . Meneses and Contreras, (2016)

در نقاط مختلف سیستم قدرت ضروری است تا تعادل بین تولید و مصرف برقرار گردد و یا اینکه برای بازه‌های زمانی که تولید کمتر از مصرف است، بتوان ذخیره‌سازی انجام داد. علاوه بر این، همواره توازن بین انرژی تولید پراکنده و بار بدون مصرف از منابع ذخیره‌سازهای انرژی، کاری دشوار، پرهزینه و از نظر زیست‌محیطی، دارای آلایندگی زیاد است و همچنین باعث افت طول عمر دستگاه تولید توان خواهد شد. بنابراین باید سیستمی را در نظر گرفت که شامل منابع تولید پراکنده تجدید پذیر همانند توربین بادی و پنل‌های خورشیدی باشد که به دلیل عدم قطعیت در تولید این منابع و تولید مقطعی آن‌ها، استفاده از منابع ذخیره‌ساز نیاز است تا بتوان به طریقی این عدم قطعیت را کاهش داد.

هدف اصلی این تحقیق بررسی عملکرد ذخیره‌ساز برق در شبکه‌های الکتریکی و برنامه‌ریزی و جایابی بهینه منابع تولید توان پراکنده (دیزلی و تجدیدپذیر) با سه هدف حداقل‌سازی تلفات، آلایندگی و هزینه‌های کلی سیستم بود که در همین راستا سه سناریو تحت الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) طراحی و مدل‌سازی لازم صورت گرفت. در سناریوی (۱) بار مصرفی شبکه صرفاً توسط دیزل ژنراتورها تأمین می‌شود. در سناریوی (۲)، منابع تولید توان تجدیدپذیر بادی و خورشیدی به شبکه اضافه می‌شود و در سناریوی (۳) علاوه بر دیزل ژنراتور و توربین بادی و پنل‌های خورشیدی، ذخیره‌سازهای انرژی به شبکه افزوده شده و الگوریتم PSO جایابی بهینه ذخیره‌سازها انجام شده است. نتایج حاصل از حل مدل نشان می‌دهد که بهترین حل مدل تحت سناریوی شماره (۳) قابل دستیابی است که اهمیت استفاده از ذخیره‌سازی انرژی را نمایان می‌سازد. بر این اساس، میزان تلفات شبکه، هزینه سوخت و آلایندگی در حرکت از سناریوی اول ( حالت پایه) به سناریوی سوم به ترتیب ۴۳۲ کیلووات، ۱۳/۷ هزار دلار و ۷۵ کیلوگرم کاهش نشان می‌دهد که نشان از بهبود قابل ملاحظه عملکرد شبکه تحت این سناریو است.

با توجه به نقش زیربنایی صنعت برق در اقتصاد جوامع مختلف از جمله ایران، افزایش قابلیت اطمینان برای پاسخگویی به تقاضای در حال رشد اهمیت فراوان دارد. 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.

در خاتمه، خاطر نشان می‌شود در این تحقیق از سه ذخیره‌ساز (باتری، ابرخازن و چرخ طیار) استفاده شد که به عنوان پیشنهاد تکمیلی برای سایر محققین 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 استفاده نمود.

## منابع


جان‌نثار، محمد رسول، 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*، (۴)۱۷، صص ۲۹۵-۲۸۷.

حسینی، محمد حسن، عزیزی، حسین و جوانبخت، مهران و موسوی تاکامی، کوروش (۱۳۹۵). «سند راهبردی و نقشه راه طراحی، ساخت و تدوین دانش فنی ذخیره سازهای انرژی در صنعت برق». ویرایش اول، وزارت نیرو، تهران.

حری، حمیدرضا، صادقی، زین العابدین و رضایی نژاد، سعیده (۱۳۹۷). "اندازه‌گیری صرفه‌های ناشی از مقیاس در صنعت برق ایران: مورد نیروگاه‌های حرارتی"، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصاد صنعتی*، (۶)۲، صص ۲۴-۱۳.

صفدری، مهران، قلی‌نیا، محمد (۱۳۹۴). "ارائه روشی نوین در بهره‌برداری بهینه ریز شبکه، با استفاده از بارهای پاسخگو و منابع ذخیره انرژی، با نفوذ زیاد منابع تجدیدپذیر"، *سی‌امین کنفرانس بین‌المللی برق*، تهران، ایران.

صیادی، محمد، ممی پور، سیاب و چراغی، مریم (۱۳۹۹). "ارزیابی تأثیر عوامل قیمتی، درآمدی و کارایی بر شدت انرژی در صنعت برق ایران: کاربرد مدل SVAR در نیروگاه‌های حرارتی"، *فصلنامه پژوهش‌های اقتصاد صنعتی*، (۱۳)۴، صص ۶۰-۴۷.

عباسی سنجدری، محمدحسین، عفت نژاد، رضا و رضاپور، کامبیز (۱۳۹۵)، "مدل‌سازی اقتصادی و فنی بکارگیری بهینه از ذخیره‌سازهای انرژی در برنامه‌ریزی سیستم‌های انرژی" .

*فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*. ۲ (۴)، صص۷-۳۲.

عشقی، امیرحسین، رضایی، محمد مهدی (۱۳۹۴). "بررسی روش‌های ذخیره‌سازی انرژی و مطالعه اثرات روش ذخیره‌سازی انرژی هوای فشرده"، *همایش ملی انرژی*، دانشگاه آزاد اسلامی واحد خمینی شهر.

عفت‌نژاد، رضا، زارع برگ‌آبادی، اکرم (۱۳۹۲). "برنامه‌ریزی بهینه برق با محدودیت‌های زیست محیطی با استفاده از الگوریتم جستجوی هارمونی". *فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی*. ۱(۳)، صص ۹۷-۱۱۲.

علیزاده، محمد، جعفری نوکندی، میثم و سلطان مرادی، یامین (۱۳۹۸). "مدل‌سازی و بهینه‌سازی مصرف انرژی در خانه هوشمند با حضور ذخیره ساز انرژی, سلول خورشیدی, خودروی برقی و پاسخ گویی بار". *مدل‌سازی در مهندسی*, ۱۷(۵۷ )، صص ۲۱۵-۲۲۶.

محمدی، جلال، گلدانی، سعیدرضا و فلقی، حمید. (۱۳۹۸). "ارزیابی اقتصادی آربیتراژ انرژی سیستم ذخیره ساز انرژی باتری با توجه به نوع بهره‌برداری آن". *نشریه مهندسی برق (دانشکده فنی دانشگاه تبریز)*، ۴۹(۳ (پیاپی ۸۹) )، صص ۱۳۰۶-۱۲۹۵.

هوشمند، رحمت اله، پرستگاری، معین (۱۳۸۷). "کاربرد الگوریتم PSO در پخش بار اقتصادی و پخش آلودگی برای توابع هزینه ناصاف با وجود تلفات خطوط انتقال و محدودیت‌های عملی سیستم. مهندسی برق و مهندسی کامپیوتر ایران"، ۶(۳)، صص ۱۹۱-۱۹۸.

Abido, M. A. (2003). Environmental / economic power dispatch using multiobjective evolutionary algorithms. *IEEE transactions on power systems*, *18*(4), 1529-1537.

Arabali, A., Ghofrani, M., & Etezadi-Amoli, M. (2013). Cost analysis of a power system using probabilistic optimal power flow with energy storage integration and wind generation. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 53, 832-841. DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.05.053

Billinton, R. (2005, May). Impacts of energy storage on power system reliability performance. In *Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering, 2005.* (pp. 494-497). IEEE.

Chen, G., Yi, X., Zhang, Z., & Wang, H. (2018). Applications of multi-objective dimension-based firefly algorithm to optimize the power losses, emission, and cost in power systems. Applied Soft Computing, 68, 322-342.

Chen, Y., Xu, J., Wang, J., & Lund, P. D. (2021). Exergo-environmental cost optimization of a combined cooling, heating and power system using the emergy concept and equivalent emissions as ecological boundary. *Energy*, 121124.

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

De Siqueira, L. M. S., & Peng, W. (2021). Control strategy to smooth wind power output using battery energy storage system: A review. *Journal of Energy Storage*, *35*, 102252.

Effatnejad, R., Hosseini, H., & Ramezani, H. (2014). Solving unit commitment problem in microgrids by harmony search algorithm in comparison with genetic algorithm and improved genetic algorithm. *International Journal on Technical and Physical Problems of Engineering (IJTPE)*, 21, 61-65.

Haupt, R. L., & Haupt, S. E. (2004). Practical genetic algorithms second edition. *A Wiley-Interscience publication*.

Hoorfar, A. (2007). "Evolutionary Programming in Electromagnetic Optimization", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol 55, no. 3.

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

Kumar Mishra, Sudhansu Kumar Mishra. (2015). *Multi-objective Economic Emission Dispatch Solution using Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II*. Discovery, 47(219), 121-126.

Larsen, M., & Sauma, E. (2021). Economic and emission impacts of energy storage systems on power-system long-term expansion planning when considering multi-stage decision processes. *Journal of Energy Storage*, *33*, 101883.

Leou, Rong-Ceng. 2012. "An economic analysis model for the energy storage system applied to a distribution substation". International Journal of Electrical Power & Energy Systems 34.1, 132-137.

Li, L. L., Shen, Q., Tseng, M. L., & Luo, S. (2021). Power system hybrid dynamic economic emission dispatch with wind energy based on improved sailfish algorithm. *Journal of Cleaner Production*, 128318.

Meneses de Quevedo, P., & Contreras, J. (2016). Optimal placement of energy storage and wind power under uncertainty. *Energies*, *9*(7), 528.

Neagu, B. C., Gavrilaş, M., Pentiuc, R. D., & Hopulele, E. (2019). Optimal Placement of Energy Storage Systems in Microgrids Using a PSO based Approach. In 2019 *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT-Europe*) (pp. 1-5). IEEE.

Nivedha, R. R., Singh, J. G., & Ongsakul, W. (2018, January). PSO based economic dispatch of a hybrid microgrid system. In 2018 International Conference on Power, Signals, Control and Computation (EPSCICON) (pp. 1-5). IEEE.

Rizk-Allah, R. M., El-Sehiemy, R. A., & Wang, G. G. (2018). A novel parallel hurricane optimization algorithm for secure emission/economic load dispatch solution. *Applied Soft Computing*, *63*, 206-222.

Thakur, T., Sem, K., Saini, S., & Sharma, S. (2006, August). A particle swarm optimization solution to NO2 and SO2 emissions for environmentally constrained economic dispatch problem. In 2006 *IEEE/PES Transmission & Distribution Conference and Exposition*: Latin America (pp. 1-5). IEEE.

Sönmez, Y. (2013). Estimation of fuel cost curve parameters for thermal power plants using the ABC algorithm. *Turkish Journal of Electrical Engineering & Computer Sciences*, *21*(Sup. 1), 1827-1841.

Su, H. I., & El Gamal, A. (2013). *Modeling and analysis of the role of energy storage for renewable integration: Power balancing*. IEEE Transactions on Power Systems, 28(4), 4109-4117.

Zakariazadeh, A. Jadid, S. & Siano, P. (2014). *Smart microgrid energy and reserve scheduling with demand response using stochastic optimization*. International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 63, 523-533.