



# Technovations of Electrical Engineering in Green Energy System

Research Article

(2024) 3(2):17-32

## Peak Shaving of Industrial Customers through Combined Installation of Photovoltaic Power Plant and Energy Storage System

Moslem Farhangnia<sup>1,2</sup>, *M.Sc. Student*, Fariborz Haghghatdar-Fesharaki<sup>1,2</sup>, *Assistant Professor*<sup>1</sup> Department of Electrical Engineering, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran<sup>2</sup> Smart Microgrid Research Center, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran

### Abstract:

Nowadays, increasing the cost of electrical energy, especially at the peak load duration, besides the environmental caused by fossil fuels, have made the peak shaving problem by clean and renewable energies, one of the important as well as essential subjects in electric power industry. Hence, in this paper, combination of the photovoltaic power plant and the battery storage system is used to solve the peak shaving problem. In doing so, a new formulation is proposed for determining the optimal capacity of the photovoltaic power plant as well as battery storage. In the considered constraints in the mentioned formulation, technical issues and economic problems are combined together in an appropriate manner. Moreover, solving the optimization problem is performed regarding the consumption load profile as well as the hourly cost of the electrical energy of under-consideration costumer, and also the expected value of the inflation and the electrical energy cost in the future years. After that, the obtained solution is evaluated in terms of the economic feasibility and its interaction with the upstream electric power distribution network. Another considerable point in this paper is the use of the real data in an actual network for simulations. The simulation results, confirm the convenient performance as well as good efficiency of the proposed method.

**Keywords:** Battery storage, Industrial customer, Peak shaving, Photovoltaic power plant

**Received:** 28 October 2023

**Revised:** 14 December 2023

**Accepted:** 28 January 2024

**Corresponding Author:** Dr. Fariborz Haghghatdar-Fesharak, haghghatdar@pel.iaun.ac.ir

DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teegees.2024.2000052.1107>



## پیک‌سایبی مشترکان صنعتی از طریق نصب ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی

مسلم فرهنگ‌نیا<sup>۱</sup>، دانشجوی کارشناسی ارشد، فریبرز حقیقت‌دار فشارکی<sup>۲</sup>، استادیار

۱- دانشکده مهندسی برق، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

۲- مرکز تحقیقات ریزشبکه‌های هوشمند، واحد نجف‌آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف‌آباد، ایران

**چکیده:** امروزه، افزایش هزینه انرژی الکتریکی به خصوص در زمان اوج بار در کنار مشکلات زیست‌محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی، مسئله پیک‌سایبی به کمک انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر را در صنعت برق به امری مهم و حیاتی تبدیل کرده است. از این‌رو در این مقاله از ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز از نوع باتری برای حل مسئله پیک‌سایبی استفاده شده است. در این راستا، یک فرمول‌بندی جدید جهت تعیین ظرفیت بهینه نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری پیشنهاد شده است. در قیود مدنظر قرار گرفته برای فرمول‌بندی مزبور، مباحث فنی و مسائل اقتصادی با هم به نحو مناسبی ترکیب شده‌اند. علاوه بر آن حل مسئله بهینه با توجه به پروفیل بار مصرفی و هزینه ساعتی انرژی الکتریکی برای مشترک مورد مطالعه و همچنین با در نظر گرفتن نرخ تورم و هزینه انرژی الکتریکی در سال‌های پیش‌رو انجام شده است. پس از آن جواب حاصل از دیدگاه توجیه‌پذیری اقتصادی و تعاملی که با شبکه توزیع انرژی الکتریکی بالادست خواهد داشت، مورد ارزیابی قرار گرفته است. نکته قابل تامل دیگر آن‌که، در این مقاله از داده‌های حقیقی در یک شبکه واقعی به منظور شبیه‌سازی‌ها استفاده شده است. نتایج شبیه‌سازی، عملکرد مناسب و کارآیی روش پیشنهادی را تایید می‌نماید.

**واژه‌های کلیدی:** پیک‌سایبی، ذخیره‌ساز باتری، مشترک صنعتی، نیروگاه خورشیدی

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۲/۰۸/۰۶

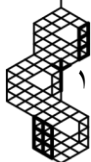
تاریخ بازنگری مقاله: ۱۴۰۲/۰۹/۲۳

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۲/۱۱/۰۸

نویسنده‌ی مسئول: دکتر فریبرز حقیقت‌دار فشارکی، [haghighatdar@pel.iaun.ac.ir](mailto:haghighatdar@pel.iaun.ac.ir)DOI: <http://dx.doi.org/10.30486/teeges.2024.2000052.1107>

امروزه با افزایش تقاضای مصرف برق در کشور و پیشرفت فن‌آوری، گرایش شرکت‌های برق جهت استفاده از منابع تولید پراکنده تجدیدپذیر افزایش یافته‌است. طبق گزارش آژانس بین‌المللی انرژی‌های تجدیدپذیر<sup>۱</sup>، در پایان سال ۲۰۲۲ ظرفیت کل تولید منابع تجدیدپذیر در جهان، ۳۳۷۲ گیگاوات و سهم نیروگاه‌های خورشیدی از این مقدار، ۱۰۵۳ گیگاوات بوده‌است [۱]. به عنوان مثال، بیش از ۵۰٪ ظرفیت نیروگاه‌های نصب شده فعلی در کشور آلمان از نوع تجدیدپذیر بوده و این کشور قصد دارد تا سال ۲۰۳۰ این ظرفیت را به بیش از ۶۵٪ برساند [۲]. در حال حاضر، از جمله عوامل مهمی که باعث تغییر گسترده شرایط تولید برق در ایران شده است، می‌توان مواردی نظیر: کاهش بارندگی و وقوع خشکسالی گسترده در سطح کشور و به تبع آن مشکل کمبود منابع آب برای تولید برق؛ افزایش قیمت ارز به دلیل تحمیل تحریم‌ها و محدودیت سرمایه‌گذاری در نیروگاه‌های بزرگ مقیاس؛ مشکلات زیر ساختی در تامین گاز طبیعی و مسایل زیست‌محیطی؛ پیدایش بارهای مصرفی جدید مانند استخراج‌کننده‌های رمزارز؛ فرسودگی تاسیسات و تجهیزات موجود و نظایر آن اشاره نمود. با توجه به این موارد می‌توان دریافت که صنعت برق ایران در سال‌های پیش رو شرایط سخت و متفاوتی را نسبت به سال‌های گذشته در پیش خواهد داشت. به طوری که با روند فعلی، بیش از ۱۵ هزار مگاوات کمبود تولید در پیک مصرف، برای سال ۱۴۰۵ پیش‌بینی می‌شود [۳]. بنابراین انتظار می‌رود که روند خاموشی‌های مشترکین صنعتی در سال‌های آتی نه تنها ادامه یافته که بر میزان و گستردگی آن نیز نسبت به سال‌های گذشته افزوده شود. بدین ترتیب، اکثر شرکت‌ها و صنایع بزرگ به دلیل خاموشی‌های بسیار و افزایش تعرفه برق می‌بایست به دنبال راهکارهایی برای مدیریت مصرف یا کاهش مصرف در زمان اوج بار باشند. با توجه به شرایط موجود، یکی از روش‌های کاهش هزینه‌های مشترکین صنایع بزرگ، جابه‌جایی مصرف برق از ساعات اوج بار و میان‌باری به ساعات کم‌باری یا به بیان دیگر انجام پیک‌سایی<sup>۲</sup> است. این کار با نصب و راه‌اندازی منابع تولید پراکنده و استفاده از سیستم ذخیره‌ساز و اتصال آن‌ها از طریق مبدل‌ها به شبکه توزیع برق انجام می‌گیرد.

محققان در مرجع [۴]، با تحقیق بر روی یک سیستم ترکیبی شامل نیروگاه خورشیدی، نیروگاه بادی، ژنراتور دیزل و باتری به این نتیجه رسیده‌اند که ادغام یک یا چند منبع تولید برق تجدیدپذیر با ذخیره‌ساز انرژی، قابلیت اطمینان و سودآوری سیستم را افزایش می‌دهد. پژوهشگران در مرجع [۵] بررسی کرده‌اند که ترکیب سامانه‌های برق خورشیدی و باتری تا چه میزان می‌تواند باعث پیک‌سایی شود. در این پژوهش محاسبات اقتصادی بر روی یک سیستم خانگی ۳۰ کیلووات انجام شده‌است و در پایان برآورد شده‌است که سود سالانه حاصل از یک سیستم ترکیبی نسبت به سیستم خورشیدی بدون باتری، حدود ۷۰٪ بیشتر خواهد بود. در پژوهش [۶] چندین خانه که باتری‌ها و سامانه برق خورشیدی را با هم به اشتراک گذاشته‌اند مورد ارزیابی قرار گرفته‌است. نتیجه حاصل آن است که سودآوری در این روش نسبت به این‌که هر خانه به‌طور جداگانه به شبکه برق وصل شود، ۲۳٪ افزایش یافته‌است. در مرجع [۷] یک روش جدید برای پیک‌سایی یک بار مقیاس کوچک با سیستم ذخیره‌ساز باتری<sup>۳</sup> و نیروگاه خورشیدی معرفی شده‌است. با روش ارائه شده در این تحقیق، پیک‌سایی بطور میانگین به میزان ۱۵٪ و در حالت بیشینه به میزان ۳۹٪ بدست آمده‌است. محققان در پژوهش [۸]، بر مسئله ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری در یک شبکه فشار ضعیف روستایی پرداخته‌اند. محاسبات اقتصادی نشان می‌دهد که این روش تنها موقعی که هزینه استهلاک باتری‌ها از قیمت برق شبکه کمتر باشد، مقرون به صرفه است. تحقیق [۹] به ارائه روشی برای تعیین ظرفیت و موقعیت بهینه ذخیره‌ساز انرژی با هدف پیک‌سایی در شبکه توزیع می‌پردازد. نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که سیستم ذخیره‌ساز به تنهایی، به دلیل ظرفیت بالای مورد نیاز، چندان مقرون به صرفه نیست. در مرجع [۱۰] یک طرح ترکیبی نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز متصل به شبکه بررسی شده‌است. در این پژوهش از یک روش کنترلی قانون‌محور<sup>۴</sup> برای پیک‌سایی استفاده شده‌است که مبتنی بر تعیین مقدار دیماند مصرفی و پروفیل توان تولیدی نیروگاه خورشیدی در روز بعدی است. در مرجع [۱۱] یک سیستم ذخیره‌ساز انرژی ترکیبی، متشکل از دو یا چند ذخیره‌ساز، بررسی شده‌است. چالش این سیستم، تعیین دقیق ظرفیت ذخیره‌ساز است. نویسندگان در این مقاله به ارائه یک سناریو برای تعیین ظرفیت مناسب سیستم ذخیره‌ساز ترکیبی پرداخته‌اند. در مرجع [۱۲] یک بررسی اقتصادی بر روی سیستم ترکیبی خورشیدی و باتری انجام شده‌است. این مقاله ابتدا روشی برای تعیین بهینه ظرفیت نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز ارائه داده‌است. سپس محاسبات اقتصادی، شامل بررسی ارزش فعلی خالص و دوره بازگشت سرمایه انجام شده‌است. در نهایت پژوهشگران با بررسی و تجزیه و تحلیل خروجی‌ها، به این نتیجه رسیده‌اند که سیستم ترکیبی، علی‌رغم نیاز به سرمایه‌گذاری اولیه بسیار زیاد، در زمان بهره‌برداری می‌تواند بسیار مقرون به صرفه باشد. نویسندگان در مرجع [۱۳] بر روی





ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز در یک ریزشبهه تحقیق کرده‌اند. هدف از این پژوهش، پیش‌بینی توان خروجی نیروگاه خورشیدی و یکنواخت کردن آن از طریق ذخیره‌ساز است. در این مقاله از ترکیب شبکه‌های عصبی مصنوعی و الگوریتم ژنتیک برای جایابی و تعیین ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز استفاده شده‌است. در مرجع [۱۴] یک سیستم مدیریت انرژی خانگی متشکل از سامانه برق خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری بررسی شده‌است. در این مقاله، الگوریتمی ارائه شده‌است که سه شاخص هزینه‌های جاری، پیک‌سایبی و رضایت را بطور هم‌زمان بررسی و با استفاده از الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی می‌کند. پژوهشگران در مرجع [۱۵] بر روی پیکربندی ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری در یک شبکه توزیع تمرکز نموده و مسئله را از دیدگاه‌های اقتصادی و قابلیت اطمینان، مورد بررسی قرار داده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که استفاده از ذخیره‌ساز باتری به همراه نیروگاه خورشیدی در یک شبکه توزیع، علاوه بر افزایش قابلیت اطمینان شبکه، آثار نامطلوب افزودن نیروگاه خورشیدی بر شبکه توزیع را کاهش می‌دهد. در مرجع [۱۶] محققان به منظور تعیین مقدار ذخیره‌ساز باتری برای یک مشترک صنعتی که دارای نیروگاه خورشیدی است از مدل برنامه‌ریزی دو سطحی تصادفی<sup>۵</sup> استفاده کرده‌اند. هدف آنها پیک‌سایبی و بهبود هزینه‌های قبض مشترک بوده است و در نهایت توانسته‌اند هزینه‌های قبض مشترک را تا ۴۰٪ کاهش دهند. در مرجع [۱۷]، جهت برنامه‌ریزی شارژ و دشارژ باتری یک مکانیزم خاص با عنوان نسبت پیک به باتری<sup>۶</sup> به منظور پیک‌سایبی یک مشترک معرفی شده است. در این روش توان مصرفی مشترک یک بار ثابت فرض شده و بار دیگر پروفیل بار آن به صورت تصادفی ایجاد شده است. با این وجود در این مرجع، محاسبه تلفات انرژی و محاسبات اقتصادی مدنظر قرار نگرفته است.

همانطور که اشاره شد، محققان بحث ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری را در مکان‌های مختلف و به شیوه‌های مختلف بررسی نموده‌اند؛ اما به برخی از مسائل پرداخته نشده است و یا با ساده‌سازی اقدام به حل مسئله شده‌است. در این مقاله سعی شده تا تعدادی از این کمبودها پوشش داده شود. از این‌رو می‌توان نوآوری‌های این مقاله و مواردی که این مقاله را از کارهای انجام شده قبلی متمایز می‌سازد، به صورت زیر خلاصه نمود:

- یک فرمول‌بندی جدید برای تعیین هم‌زمان مقدار بهینه اندازه نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری پیشنهاد گردیده است. در این فرمول‌بندی، با استفاده از پروفیل بار ساعتی مشترک و تعرفه برق به صورت ساعتی و همچنین با در نظر گرفتن نرخ تورم و بهره برای سال‌های پیش‌رو، مقدار بهینه نیروگاه خورشیدی و باتری تعیین می‌گردد.
- در تعیین مقادیر بهینه نیروگاه و باتری از پروفیل واقعی بار مشترک و تعرفه‌های برق به صورت ساعتی برای کل سال استفاده گردیده است. همچنین کلیه قیود مربوط به توان‌های اکتیو، راکتیو، ولتاژ، جریان و حد بالا و پایین شارژ و دشارژ باتری‌ها مد نظر قرار داده شد.
- مسئله در یک شبکه واقعی با در نظر گرفتن کلیه تلفات و مشخصات خط و ترانسفورماتورها بررسی گردیده است.
- مشترک مورد مطالعه یک مشترک صنعتی با دیمانند چند مگاواتی بود.
- علاوه بر تعیین مقادیر بهینه، مسئله از بعد اقتصادی و فنی شبکه بالادست با استفاده از نرم‌افزارهای تخصصی هر حوزه نیز بررسی گردیده است.
- جدول و برنامه زمانی برای شارژ و دشارژ باتری ارائه گردیده است.

به‌طور کلی، تفاوت‌های این مقاله با پژوهش‌های مشابه در جدول (۱) به‌طور خلاصه بیان شده است.

در ادامه این مقاله، در بخش دوم، مفهوم پیک‌سایبی و دلیل استفاده از ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز برای انجام پیک‌سایبی در این مقاله، بیان می‌گردد. علاوه بر آن در این بخش، به مباحث اقتصادی مطرح در مسئله پیک‌سایبی نیز پرداخته می‌شود. در بخش سوم، فرمول‌بندی پیشنهادی در مسئله پیک‌سایبی مطرح می‌گردد. نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌های تکمیلی در بخش چهارم ارائه می‌شود. در نهایت در بخش پنجم، نتیجه‌گیری انجام می‌گیرد.



جدول (۱): مقایسه ویژگی‌های فنی این مقاله با کارهای انجام‌شده قبلی

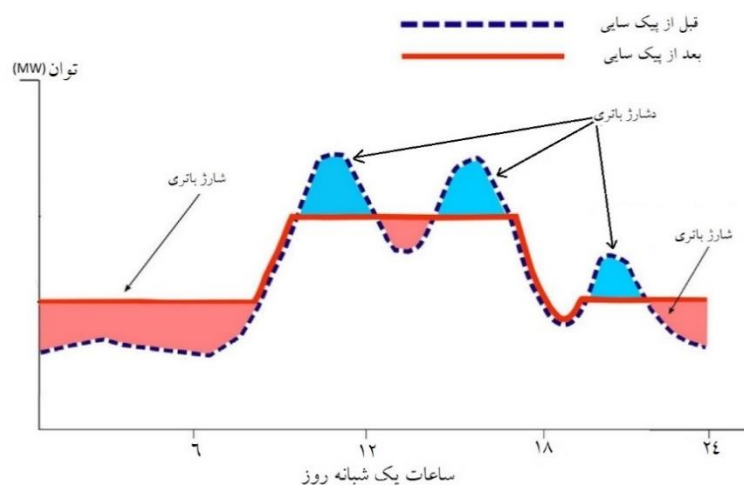
ویژگی‌های فنی پژوهش‌های پیشین	ویژگی‌های فنی این مقاله
<p>عموماً به یک یا دو جنبه از موارد زیر پرداخته شده است [۱-۱۹]:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* انتخاب بهینه ظرفیت نیروگاه یا ذخیره‌ساز</li> <li>* انجام محاسبات اقتصادی طرح</li> <li>* ارائه جدول شارژ/دشارژ باتری‌ها</li> </ul> <p>سیستم تحت مطالعه عموماً یک مشترک خانگی، روستایی یا یک واحد آموزشی است [۶,۸]، [۱۱] و [۱۴].</p> <p>توان سیستم تحت مطالعه کمتر از ۱۰۰ کیلووات است [۵]، [۷]، [۱۲] و [۱۸].</p> <p>از الگوریتم‌های فرا ابتکاری (مانند ازدحام ذرات، ژنتیک، گرگ خاکستری و ...) در حل مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است [۱۰] و [۱۳، ۱۴].</p> <p>تعرفه برق به صورت یک عدد ثابت یا نهایتاً به صورت دو نرخ ثابت ولی متفاوت تابستانی و زمستانی در نظر گرفته شده است [۱۸، ۱۹].</p>	<p>به تمام موارد زیر به‌طور همزمان پرداخته شده است:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>* انتخاب بهینه ظرفیت نیروگاه یا ذخیره‌ساز</li> <li>* انجام محاسبات اقتصادی طرح</li> <li>* ارائه جدول شارژ/دشارژ باتری‌ها</li> <li>* ارزیابی شرایط فنی شبکه توزیع بالادست</li> </ul> <p>سیستم تحت مطالعه یک مشترک صنعتی است.</p> <p>توان سیستم تحت مطالعه ۵/۳ مگاوات است.</p> <p>مسئله بهینه‌سازی با روش‌های تحلیلی با جواب یکتا و مطلق حل شده است.</p> <p>تعرفه برق به صورت متغیر ساعتی در کل سال در نظر گرفته شده است.</p>

## ۲- مفاهیم و ملزومات مطرح در مسئله پیک‌سایبی

در این بخش به تعریف مسئله پیک‌سایبی و لزوم ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی<sup>۶</sup> پرداخته می‌شود. در ادامه، مباحث اقتصادی مطرح در مسئله مورد بحث نیز بیان می‌گردد.

### ۲-۱- مفهوم پیک‌سایبی

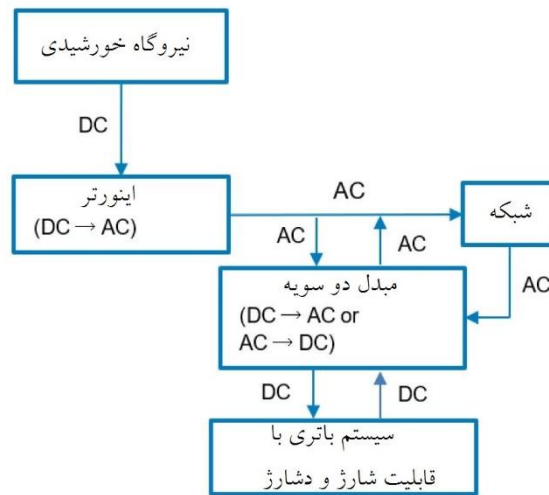
پیک‌سایبی به فعالیتی گفته می‌شود که در آن در ساعات کم‌باری، مانند نیمه‌های شب و اوایل صبح، انرژی ذخیره شده و در ساعات اوج بار، که مصرف زیاد و انرژی گران‌تر است، انرژی ذخیره شده به شبکه تزریق می‌گردد. بدین ترتیب شکل قله و دره‌ای که به‌طور معمول برای منحنی انرژی مصرفی روزانه ایجاد می‌شود، تغییر کرده و منحنی مزبور هموارتر می‌گردد. این موضوع را می‌توان در شکل (۱) مشاهده نمود. این شکل مربوط به یک شبکه قدرت نمونه است که در آن از یک ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری استفاده شده است. از مناسب‌ترین ذخیره‌سازها برای این منظور می‌توان به باتری‌ها، هوای فشرده<sup>۷</sup> و سیستم تلمبه‌ذخیره‌ای<sup>۹</sup> اشاره نمود [۲۰].



شکل (۱): بار مصرفی از دید شبکه قدرت قبل و بعد از پیک‌سایبی با استفاده از ذخیره‌ساز باتری [۲۱]

## ۲-۲- ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز

خروجی نیروگاه خورشیدی به‌صورت تصادفی و نامعین است. به‌طوری که به شرایط جوی، فصل سال، دما، ساعت روز، آلودگی هوا و نظایر آن وابسته است. از این‌رو خروجی نیروگاه ناپایدار بوده و نمی‌تواند متناسب با توان مورد نیاز مصرف‌کننده تغییر کند. این موضوع می‌تواند باعث ایجاد مسائل فنی و اقتصادی شود. از مسائل فنی می‌توان به تغییر ولتاژ و فرکانس به دلیل عدم تعادل میان تولید و مصرف و همچنین محدود شدن ضریب نفوذ انرژی‌های تجدیدپذیر اشاره کرد. از نظر اقتصادی نیز می‌توان به مواردی اشاره کرد که اپراتورها به دلیل اشتباه در برآورد و پیش‌بینی خود، نتوانند توان مورد انتظار را فراهم کنند و ممکن است مشمول جریمه شوند [۲۲]. برای حل این مشکلات می‌توان از ذخیره‌ساز باتری به همراه نیروگاه خورشیدی استفاده کرد. در این حالت، باتری‌ها می‌توانند در ساعات کم‌باری که انرژی ارزان است، از طریق شبکه و نیروگاه خورشیدی شارژ شده و در زمان اوج مصرف، به‌کمک نیروگاه خورشیدی بیایند و انرژی خود را به شبکه تزریق کنند. بدین ترتیب می‌توانند به‌طور مناسبی به همراه نیروگاه خورشیدی در مسئله پیک‌سازی مشارکت کنند. در شکل (۲) می‌توان طرح‌واره یک نوع اتصال این ترکیب را مشاهده کرد. همان‌گونه که در این شکل دیده می‌شود، از مبدل دو سویه<sup>۱</sup> برای باتری‌ها استفاده شده است. در یک سیستم متصل به شبکه<sup>۱۱</sup>، تعیین مقدار بهینه نیروگاه خورشیدی و سیستم باتری مسئله مهمی است. مقادیر مذکور باید بگونه‌ای انتخاب شوند که به مزایای فنی و اقتصادی حداکثری بتوان دست‌یافت [۱۰].



شکل (۲): طرح‌واره ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری [۲۳]

## ۲-۳- مفاهیم اقتصادی مطرح در مسئله پیک‌سازی

برخی از مفاهیم که در ارزیابی توجیه‌پذیری اقتصادی طرح پیشنهادی، در بخش چهارم مقاله، مورد استفاده قرار می‌گیرد، در ادامه شرح داده می‌شود. همچنین در جدول (۲)، علائم و متغیرهایی که در روابط این مقاله به‌کار رفته‌اند، به‌طور کامل معرفی و تشریح گردیده‌اند. ارزش فعلی خالص<sup>۱۲</sup> (NPV): NPV نشان‌دهنده تفاوت بین جریان مبالغ ورودی و خروجی یک پروژه در طول زمان است. به صورت ساده، NPV مقدار خالص واقعی ارزش حال مبلغ وجوه نقدی وارد شده و خارج شده در طول عمر پروژه است. به عبارت دیگر،  $NPV < 0$  مشخص‌کننده این واقعیت است که ارزش فعلی هزینه‌ها<sup>۱۳</sup> از ارزش فعلی درآمدها بیشتر است. پس برای این‌که پروژه‌ای اقتصادی باشد باید  $NPV \geq 0$  باشد. مقدار NPV را می‌توان از رابطه (۱) محاسبه نمود [۲۴].

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (1)$$

نرخ بازده داخلی<sup>۱۴</sup> (IRR): IRR نرخ کاهشی است که بر اساس آن NPV برابر با صفر می‌شود. به عبارت دیگر، برای محاسبه IRR ابتدا NPV برابر با صفر قرار داده می‌شود و از رابطه حاصل، IRR محاسبه می‌گردد. در واقع IRR نرخ است که به ازای آن، درآمدها و هزینه‌های پروژه متعادل می‌شود. چنان‌چه نرخ بازده داخلی از نرخ هزینه سرمایه‌گذاری کمتر باشد، آن طرح مردود خواهد بود. هرچه میزان IRR پروژه‌ای بزرگتر باشد، آن پروژه ارزش اقتصادی بیشتری خواهد داشت [۲۵].

جدول (۲): واژه‌نامه

نماد	شرح	نماد	شرح
$\eta$	بازده شارژ و دشارژ سیستم ذخیره‌ساز (%)	$P_{grid,h}$	توان خریداری شده از شبکه (MW)
$b_j$	سوسپتانس معادل متصل به باس $j$ (S/km)	$p_{grid,j,h}$	توان اکتیو دریافتی از شبکه در باس $j$ و در ساعت $h$ (MW)
$CF_t$	خالص وجوه نقد در پایان سال $t$ ام	$P_{pv}$	ظرفیت نیروگاه خورشیدی (MW)
$Cost_{pv}$	هزینه نصب نیروگاه خورشیدی (€/MW)	$pp_{v,j,h}$	توان اکتیو تولیدی توسط نیروگاه خورشیدی موجود در باس $j$ و در ساعت $h$ (MW)
$Cost_{st}$	هزینه نصب ذخیره‌ساز (€/MWh)	$Price_h$	تعرفه برق (€/MWh)
$E$	مجموعه دربردارنده کلیه خطوط شبکه	$q_{j,h}$	توان راکتیو تزریقی خالص به باس $j$ در ساعت $h$ (MVAR)
$Est$	ظرفیت ذخیره ساز باتری (MWh)	$Q_{jk,h}$	توان راکتیو جاری در خط $(i,j)$ در ساعت $h$ (MVAR)
$g_j$	کنداکتانس معادل متصل به باس $j$ (S/km)	$q_{d,j,h}$	توان راکتیو مصرفی در باس $j$ در ساعت $h$ (MVAR)
$h$	ساعت	$q_{dch,j,h}$	توان راکتیو دشارژ شده توسط سیستم ذخیره‌ساز موجود در باس $j$ و در ساعت $h$ (MVAR)
$H$	مجموعه دربردارنده کلیه ساعات شبیه‌سازی	$q_{g,i,h}$	توان راکتیو تولیدی در باس $j$ در ساعت $h$ (MVAR)
$i, j$	اندیس‌های نشان‌دهنده باس‌های شبکه	$q_{grid,j,h}$	توان راکتیو دریافتی از شبکه در باس $j$ و در ساعت $h$ (MVAR)
$infr$	نرخ تورم (%)	$qp_{v,j,h}$	توان راکتیو تولیدی توسط نیروگاه خورشیدی موجود در باس $j$ و در ساعت $h$ (MVAR)
$intr$	نرخ بهره (%)	$r$	نرخ تنزیل (%)
$IRR$	نرخ بازده داخلی (%)	$r_{ij}$	مقاومت خط $(i,j)$ ( $\Omega/km$ )
$l_{i,j,h}$	متغیر متناظر با مجذور جریان خط $(i,j)$ ( $A^2$ )	$SOC_{j,h}$	میزان شارژ سیستم ذخیره‌ساز باس $j$ در ساعت $h$ (%)
$N, T$	بازه زمانی مورد مطالعه (سال)	$SOC_{j,h-1}$	میزان شارژ سیستم ذخیره‌ساز باس $j$ در ساعت $h-1$ (%)
$NPV$	ارزش فعلی خالص (یورو)	$SOC_{max}$	حداکثر میزان شارژ مجاز سیستم ذخیره‌ساز (%)
$p_{j,h}$	توان اکتیو تزریقی خالص به باس $j$ در ساعت $h$ (MW)	$SOC_{min}$	حداقل میزان شارژ مجاز سیستم ذخیره‌ساز (%)
$P_{jk,h}$	توان اکتیو جاری در خط $(i,j)$ در ساعت $h$ (MW)	$t$	سال
$pd_{j,h}$	توان اکتیو مصرفی در باس $j$ در ساعت $h$ (MW)	$v_{j,h}$	متغیر متناظر با مجذور اندازه ولتاژ باس $j$ در ساعت $h$ ( $V^2$ )
$pdch_{j,h}$	توان اکتیو دشارژ شده توسط سیستم ذخیره‌ساز موجود در باس $j$ و در ساعت $h$ (MW)	$x_{ij}$	راکتانس خط $(i,j)$ ( $\Omega/km$ )
$pg_{j,h}$	توان اکتیو تولیدی در باس $j$ در ساعت $h$ (MW)		

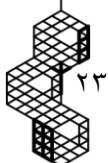
دوره بازگشت سرمایه ( $PP^{15}$ ): یک تحلیل‌گر اقتصادی به دنبال دوره‌ای است که مجموع درآمد سالیانه با هزینه سرمایه‌گذاری اولیه برابر شود. هرچه این شاخص کوچک‌تر باشد، بیانگر سرعت بیشتر جبران جریانات نقدی خروجی به‌وسیله جریانات نقدی ورودی است. از این‌رو پروژه از جذابیت بیشتری برای سرمایه‌گذاری برخوردار خواهد بود [۲۵].

### ۳- فرمول‌بندی پیشنهادی در مسئله پیک‌سای

در این مقاله سعی شده است تا علاوه بر ترم‌های فنی که از دیدگاه مهندسی برق در طراحی نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز باتری باید در نظر گرفته شود [۲۶، ۲۷]، ترم‌های اقتصادی نیز بطور همزمان مدنظر قرار گیرند [۲۵]. تابع هدف پیشنهادی در رابطه زیر ارائه شده‌است.

$$Cost = P_{pv}.Cost_{pv} + Est.Cost_{st} + \sum_{t=1}^T \left( \frac{1+infr}{1+intr} \right)^t \sum_h P_{grid,h}.Price_h \quad (2)$$

در رابطه (۲)، تغییرات تعرفه برق به‌صورت ساعتی و برای کل سال در نظر گرفته می‌شود تا نتیجه حاصل به واقعیت نزدیک‌تر باشد. ضمن این‌که تغییرات قیمت انرژی در سال‌های آتی نیز در آن لحاظ شده‌است. همچنین به‌طور همزمان مقدار بهینه نیروگاه خورشیدی





و ذخیره‌ساز باتری مشخص می‌شود. علاوه بر آن، هزینه‌های قبض مشترک مورد مطالعه در بازه زمانی مورد نظر و هزینه‌های نصب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز نیز در این رابطه محاسبه می‌شود. بدین ترتیب سرمایه‌گذار ضمن اطمینان از برآورده شدن مسایل فنی، با آگاهی از ملاحظات اقتصادی طرح، بهتر می‌تواند تصمیم‌گیری نماید.

همچنین سعی شده است تا قیود مسئله بطور جامع در برگیرنده ملاحظات عملی مطرح در مسئله مورد مطالعه باشند. در ادامه قیود استفاده‌شده در تعیین مقدار بهینه نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز انرژی از نوع باتری، در روابط (۳) تا (۱۲) ارائه شده‌است [۲۸، ۲۹].

$$P_{j,h} = \sum_{k:j \rightarrow k} P_{jk,h} - \sum_{i:i \rightarrow j} (P_{ij,h} - r_{ij} l_{ij,h}) + g_j v_{j,h}, \forall h \in H \quad (3)$$

$$Q_{j,h} = \sum_{k:j \rightarrow k} Q_{jk,h} - \sum_{i:i \rightarrow j} (Q_{ij,h} - x_{ij} l_{ij,h}) + b_j v_{j,h}, \forall h \in H \quad (4)$$

$$v_{j,h} = v_{i,h} - 2(r_{ij} P_{ij,h} + x_{ij} Q_{ij,h}) + (r_{ij}^2 + x_{ij}^2) l_{ij,h}, \forall (i, j) \in E, \forall h \in H \quad (5)$$

$$l_{ij,h} = \frac{P_{ij,h}^2 + Q_{ij,h}^2}{v_{i,h}}, \forall (i, j) \in E, \forall h \in H \quad (6)$$

$$P_{j,h} = pg_{j,h} - pd_{j,h}, \forall j \in N, \forall h \in H \quad (7)$$

$$Q_{j,h} = qg_{j,h} - qd_{j,h}, \forall j \in N, \forall h \in H \quad (8)$$

$$pg_{j,h} = ppv_{j,h} + pdch_{j,h} + pgrid_{j,h}, \forall j \in N, \forall h \in H \quad (9)$$

$$qg_{j,h} = qpv_{j,h} + qdch_{j,h} + qgrid_{j,h}, \forall j \in N, \forall h \in H \quad (10)$$

$$SOC_{j,h} = SOC_{j,h-1} - pdch_{j,h} \cdot \left(\frac{1}{\eta}\right), \forall j \in N, \forall h \in H \quad (11)$$

$$SOC_{\min} \leq SOC_{j,h} \leq SOC_{\max}, \forall j \in N, \forall h \in H \quad (12)$$

باید توجه داشت که در این‌جا با یک مسئله بهینه‌سازی چند هدفه شامل تعیین هم‌زمان ظرفیت نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری مواجه هستیم. از این‌رو برای حل این مسئله از روش برنامه‌ریزی با محدودیت درجه دوم (QCP<sup>16</sup>) استفاده شده‌است. روش QCP برای حل مسائل بهینه‌سازی غیر خطی کاربرد دارد. در این مقاله، این روش با برنامه‌نویسی در نرم‌افزار GAMS و استفاده از حل‌کننده CPLEX پیاده‌سازی شده است.

#### ۴- نتایج بهینه‌سازی و شبیه‌سازی‌های تکمیلی

مشترک مورد مطالعه در این مقاله، یک مشترک با دیماند ۵/۳ مگاوات است که از طریق یک فیدر اختصاصی به طول ۲/۳ کیلومتر برق‌دار می‌شود. این مشترک در یک شهرک صنعتی در استان اصفهان قرار دارد. اطلاعات فنی شبکه مانند مشخصات ترانسفورماتورها و فیدرها، میزان مصارف مشترک مدنظر در طول سال و تعرفه‌های برق در ساعات و ماه‌های مختلف سال از شرکت برق منطقه‌ای اصفهان و شرکت توزیع برق استان اصفهان دریافت شده است. برای حل مسئله بهینه‌سازی، پارامترهای لازم مطابق با جدول (۳) انتخاب گردیده است.

جدول (۳): پارامترهای انتخابی در حل مسئله بهینه‌سازی

مقدار	کمیت	مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
۰/۲۷۶۷ (Ω/km)	مقاومت فیدر	۰/۲۴۶۴ (Ω/km)	راکتانس فیدر	۸۸/۵۹۳۷ (μS/km)	سوسپتانس فیدر
۲/۱۷۴۱ (nS/km)	کنداکتانس فیدر	۲۰۰۰۰۰ (€/MWh)	هزینه نصب ذخیره‌ساز	۴۵۰۰۰۰ (€/MW)	هزینه نصب نیروگاه خورشیدی
٪۹۵	بازده باتری	٪۹۰	حداکثر شارژ باتری	٪۱۰	حداقل شارژ باتری
۰/۹	ضریب توان	٪۱۸	نرخ بهره	٪۴۰	نرخ تورم





با حل مسئله برای سه افق زمانی ۱۰، ۱۵ و ۲۰ سال، نتایج بصورت جدول (۴) حاصل شده است. باید توجه داشت که عمر مفید ذخیره‌ساز باتری لیتیوم-یون حدود ۲۰ سال است. از سوی دیگر، ساتبا<sup>۱۲</sup> با نیروگاه‌های خورشیدی قرارداد تضمینی خرید برق ۲۰ ساله می‌بندد. از این رو طرح ۲۰ ساله معقول‌ترین انتخاب برای سرمایه‌گذاری محسوب می‌شود. به همین دلیل، محاسبات فنی و اقتصادی که در ادامه ارائه می‌شود، همگی بر مبنای طرح ۲۰ ساله است. بدین ترتیب، همان‌گونه که در جدول (۴) مشاهده می‌شود، مقادیر بهینه ظرفیت نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز باتری به ترتیب برابر با ۱۲/۹ مگاوات و ۴۷ مگاوات‌ساعت خواهد بود. منظور از هزینه کل در این جدول، مجموع هزینه خرید برق از شبکه و سرمایه‌گذاری جهت احداث سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری است. باید توجه داشت که سرمایه‌گذار می‌تواند باتوجه به سرمایه خود، هر بازه زمانی دلخواه دیگری را با توجه به قابل حل بودن مسئله در آن بازه توسط نرم‌افزار GAMS انتخاب نماید. سایر مسائل اقتصادی دخیل در طرح، در ادامه این بخش بررسی خواهد شد.

جدول (۴): ظرفیت بهینه نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری با توجه به سرمایه‌گذاری لازم در افق‌های زمانی مختلف

افق زمانی (سال)	۱۰		۱۵		۲۰	
	بدون نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	با نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	بدون نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	با نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	بدون نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز	با نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز
هزینه خرید برق از شبکه (M€)	۲۴/۷	۴/۸	۴۳/۵	۶	۶۸/۶	۱/۸
ظرفیت بهینه نیروگاه خورشیدی (MW)	۰	۸/۳	۰	۹/۵	۰	۱۲/۹
ظرفیت بهینه ذخیره‌ساز باتری (MWh)	۰	۱۹/۶	۰	۲۶/۳	۰	۴۷
هزینه سرمایه‌گذاری (M€)	۰	۷/۸۵	۰	۹/۸	۰	۱۵/۷
هزینه کل (M€)	۲۴/۷	۱۲/۴۵	۴۳/۵	۱۵/۵۳	۶۸/۶	۱۷/۵

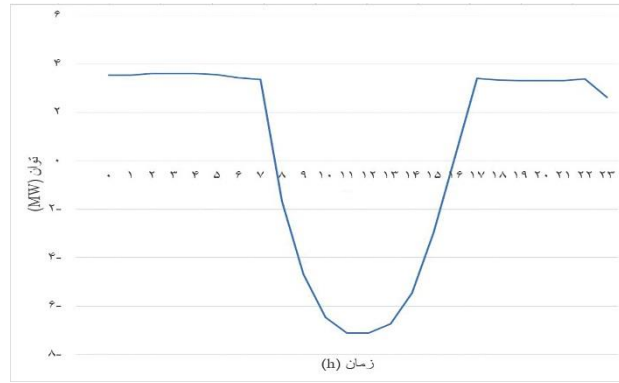
بهترین مکان برای نصب نیروگاه خورشیدی و سیستم ذخیره‌ساز باتری، نزدیک‌ترین نقطه به محل مصرف است. چراکه بهتر است تا مصرف‌کننده در ساعات پیک بار، حتی الامکان بصورت خودتامین عمل کند. در این صورت در اثر قطع برق نیز دچار ضرر و زیان نمی‌شود. با این وجود چنان‌چه فضای کافی در محل مصرف کننده وجود نداشته نباشد، در صورتی که مصرف کننده از طریق شبکه برق سراسری تأمین شود و محدودیت‌های بهره‌برداری از شبکه رعایت گردد، نصب نیروگاه خورشیدی و باتری در هر کجای شبکه بلامانع است. تبادل توان در سیستم ترکیبی پیشنهادی، در یک شبانه‌روز، به‌طور نمونه در شکل (۳) نشان داده شده است. در شکل (۳-الف) نمودار شارژ و دشارژ باتری‌ها و در شکل (۳-ب) نمودار متوسط توان تولیدی نیروگاه خورشیدی در یک بازه ۲۴ ساعته را می‌توان مشاهده نمود. همان‌گونه که در شکل‌های (۳-الف) و (۳-ب) می‌توان دید، در ساعات ابتدایی روز و همچنین بعد از غروب خورشید، تولید نیروگاه خورشیدی صفر است و در این زمان‌ها انرژی لازم برای مشترک، از طریق باتری‌ها و شبکه فراهم می‌شود. در حالی که در طول روز باتری‌ها از طریق نیروگاه خورشیدی در حال شارژ شدن هستند. باید توجه داشت که در شکل (۳-الف)، اعداد مثبت بیانگر دشارژ و اعداد منفی بیانگر شارژ باتری است.

در نهایت در شکل (۴)، توان دریافتی مشترک از شبکه برق، قبل و بعد از اتصال سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری باهم مقایسه شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، وابستگی کلی مشترک به برق شبکه کاهش چشم‌گیری داشته است. به خصوص در ساعات اوج مصرف، توان دریافتی از شبکه تقریباً به صفر رسیده است. پس در صورت قطع برق ناشی از مشکل کمبود تولید، مشترک متضرر نخواهد شد. از سوی دیگر به‌طور متوسط برای ساعات اوج بار (ساعات ۱۲ تا ۱۸) پیک‌سایی به‌میزان ۹۶٪ انجام شده است. همچنین برای ساعات میان‌باری (ساعات ۶ تا ۱۲ و ۱۸ تا ۲۲) و کم‌باری (ساعات ۲۲ تا ۶) دریافت توان مشترک از شبکه

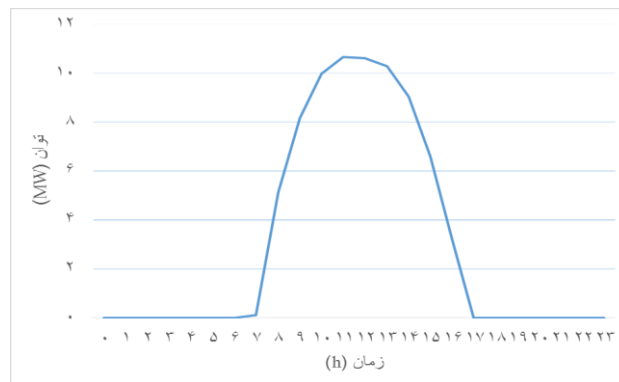




به‌طور متوسط، به‌ترتیب، به‌میزان ۰.۹۵٪ و ۰.۸۰٪ کاهش داشته‌است. به‌عبارت دیگر، در مجموع برای کل شبانه‌روز، پیک‌سایبی به‌میزان ۰.۹۱٪ انجام شده‌است. همان‌گونه که از این اعداد مشخص است، عمده پیک‌سایبی در ساعات اوج بار و میان‌باری است که انرژی گران‌تر می‌باشد. همچنین در ساعات کم‌باری که انرژی ارزان‌تر است، میزان پیک‌سایبی نیز کم‌تر شده‌است. از این‌رو وابستگی مشترک به شبکه برق به حداقل رسیده‌است. پس مشترک مورد مطالعه به نوعی به‌صورت خودتامین عمل می‌کند. از این‌رو می‌توان گفت که هدف برنامه در تعیین مقدار بهینه برای نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری، محقق شده‌است.

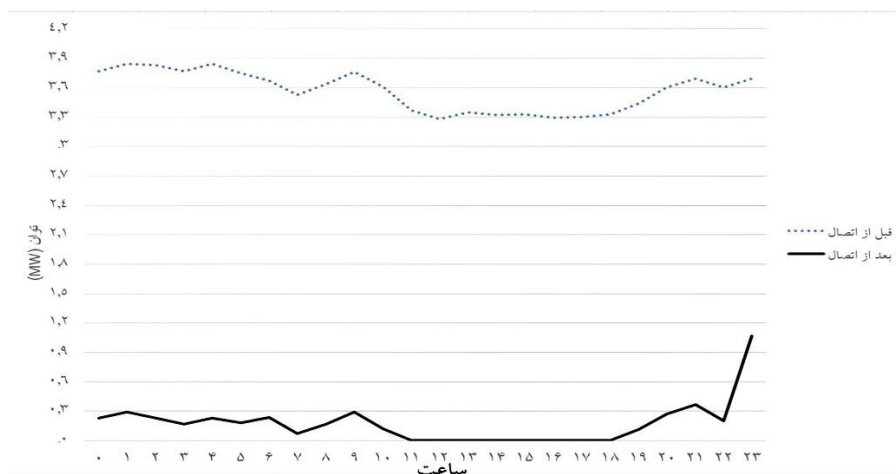


(الف): نمودار شارژ و دشارژ باتری‌ها



(ب) متوسط توان تولیدی نیروگاه خورشیدی

شکل (۳): تبادل توان در سیستم ترکیبی پیشنهادی



شکل (۴): مقایسه متوسط توان دریافتی از شبکه قدرت، قبل و بعد از اتصال سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری



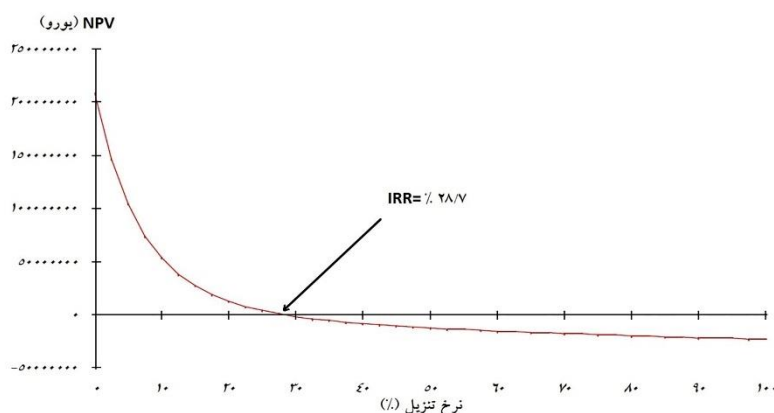
برای تحلیل اقتصادی، لازم است تا میزان انرژی تولیدی نیروگاه خورشیدی در طول سال مشخص باشد. به این منظور، شبیه‌سازی نیروگاه ۱۲/۹ مگاواتی مورد بحث در نرم‌افزار PVsyst صورت پذیرفته است. از نتایج شبیه‌سازی، انرژی تولیدی نیروگاه مزبور در یک سال، برابر با ۲۹/۳ گیگاوات‌ساعت به‌دست می‌آید. همچنین این نیروگاه در مدت ۲۰ سال فعالیت خود، از انتشار ۳۰۰۰۰۰ تن دی‌اکسید کربن جلوگیری خواهد کرد.

برای ارزیابی اقتصادی مشترک مورد مطالعه، از نرم‌افزار COMFAR استفاده شده است. به‌منظور یکسان‌سازی واحدها، هزینه‌ها برحسب یورو بیان شده است. همچنین جریانات نقدینگی برای دوره ۲۰ ساله محاسبه شده و مقادیر پارامترهای تاثیرگذار در انجام محاسبات، مطابق جدول (۵) در نظر گرفته شده است.

جدول (۵): پارامترهای انتخابی در محاسبات اقتصادی

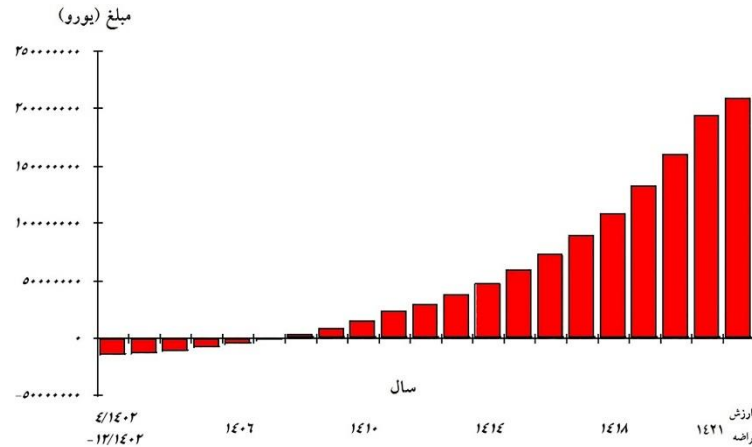
مقدار	کمیت	مقدار	کمیت	مقدار	کمیت
۸۷۷۵۰ (€)	هزینه‌های عملیاتی (تولید) در سال اول	۲۰٪ در سال	نرخ متوسط افزایش هزینه‌ها و قبض برق	۱۵٪ در ۲۰ سال	نرخ پیری ماژول‌های خورشیدی
٪۱۸	نرخ تنزیل	۱۹۳۵۴۸ (€)	هزینه ناشی از قطع برق در ماه	۲۹/۴۹ (GWh)	انرژی مصرفی سالانه مشترک طبق قبض‌ها
۶ ماه	مدت انجام پروژه	۰/۰۲۶ (€/kWh)	میانگین نرخ تعرفه برق مشترک	۰/۰۶۴ (€/kWh)	نرخ جریمه ماده شانزده

منظور از نرخ تنزیل<sup>۱۸</sup>، نرخ بهره مورد استفاده در تحلیل جریان نقدی تنزیل یافته است که به‌واسطه آن، ارزش فعلی جریان‌های نقدی آتی، مشخص می‌شود [۳۰]. همچنین در محاسبات، آیین‌نامه اجرایی ماده ۱۶ قانون جهش تولید دانش‌بنیان مصوب ۱۴۰۱/۰۵/۲۶ هیأت وزیران که اعلام می‌دارد واحدهای صنعتی بالای یک مگاوات، باید به میزان ۵٪ انرژی مصرفی خود، نیروگاه تجدیدپذیر احداث کنند نیز لحاظ شده است. با استفاده از این اطلاعات، محاسبات اقتصادی در نرم‌افزار COMFAR انجام شده است. نتیجه این محاسبات نشان می‌دهد که مقدار NPV پروژه ۱۷۹۲۵۶۴۳ یورو است. باید توجه داشت که ظرفیت‌های ارائه شده، در این مقاله، مقادیر بهینه بوده و حتی سرمایه‌گذار می‌تواند متناسب با سرمایه خود ظرفیت‌ها را بطور متناسب کاهش داده و پیاده‌سازی کند که در این صورت صرفاً از نقطه بهینه دور می‌شود؛ اما بهبود کیفی سیستم و سودآوری اقتصادی طرح به میزانی کمتر از حد بهینه، همچنان پابرجاست. همچنین در شکل‌های (۵) و (۶) که از این نرم‌افزار بدست آمده است، می‌توان به ترتیب تغییرات NPV نسبت به نرخ تنزیل و جریانات نقدینگی تجمعی پروژه و بازگشت سرمایه را مشاهده نمود. همان‌گونه که در شکل (۵) مشاهده می‌شود، محل برخورد منحنی NPV با محور افقی، یعنی جایی که مقدار NPV به صفر می‌رسد، بیانگر مقدار IRR پروژه است که در این پروژه، مقدار آن ۲۸/۷٪ است.



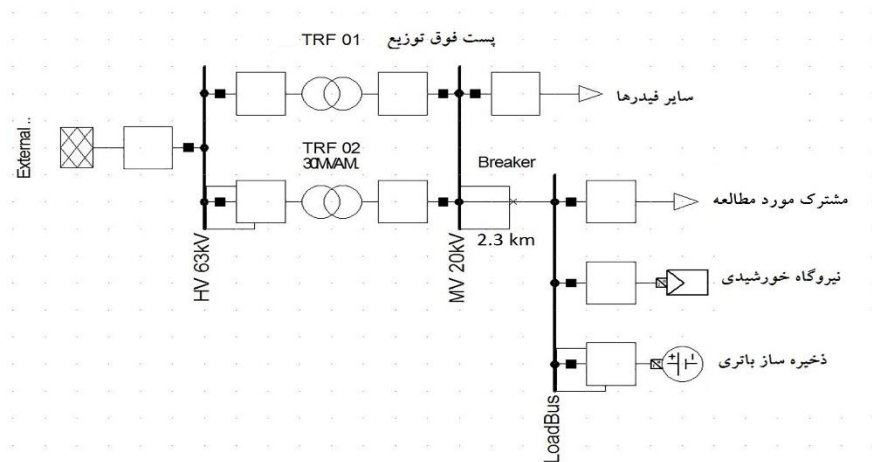
شکل (۵): تغییرات NPV نسبت به نرخ تنزیل

در شکل (۶) نیز، جایی که جریانات نقدینگی صفر می‌شود، بیانگر دوره بازگشت سرمایه است. در این نمودار، این اتفاق در سال ششم رخ داده است. از این‌رو، دوره بازگشت سرمایه این پروژه، ۶ سال است. همچنین در این شکل، منظور از ارزش قراضه، ارزش تخمینی دارایی‌های ثابت در پایان عمر پروژه است. در نهایت، با توجه به اینکه مقدار NPV مثبت شده و مقدار IRR از نرخ تنزیل (۱۸٪)، بیشتر گردیده، و زمان بازگشت سرمایه در محدوده قابل قبولی قرار دارد، می‌توان نتیجه گرفت که طرح دارای توجیه اقتصادی است.



شکل (۶): جریانات نقدینگی تجمعی و دوره بازگشت سرمایه

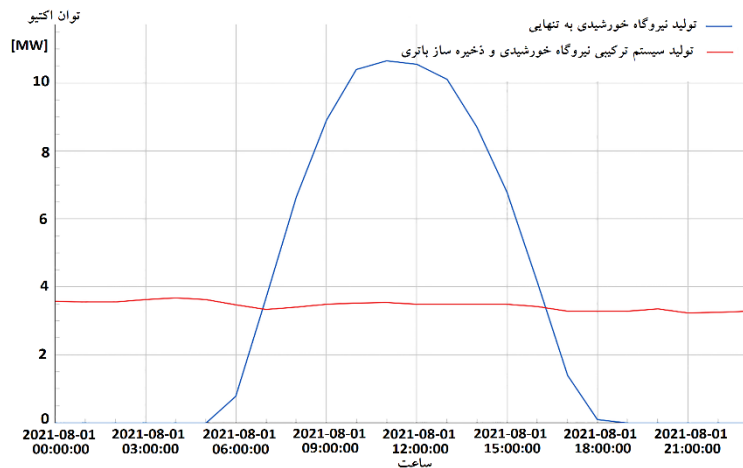
برای بررسی فنی پروژه، مشترک مورد مطالعه به همراه شبکه فشار متوسط و پست فوق توزیع تغذیه کننده آن و همچنین نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری، در نرم افزار DigSILENT مدل‌سازی گردیده است. اضافه شدن منابع تجدیدپذیر به شبکه توزیع می‌تواند باعث اضافه ولتاژ در شبکه توزیع و مسائل و مشکلاتی از این دست گردد [۳۱]. از این‌رو در ادامه، با شبیه‌سازی به کمک نرم‌افزار DigSILENT، تاثیرات اتصال نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری بر شبکه بالادست مورد بررسی قرار گرفته است. اطلاعات شبکه فشار متوسط و پست فوق توزیع تغذیه کننده آن از شرکت برق منطقه‌ای اصفهان اخذ گردیده است. دیاگرام تک‌خطی این سیستم را می‌توان در شکل (۷) مشاهده نمود.



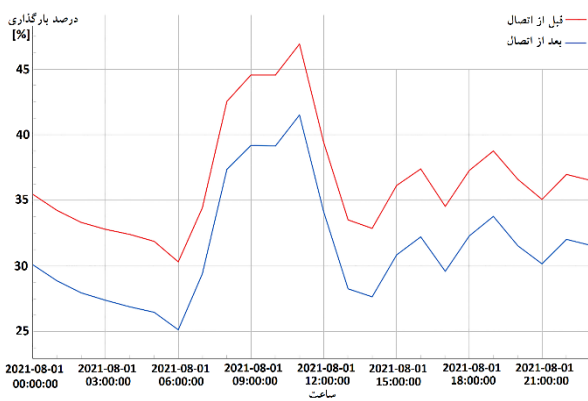
شکل (۷): دیاگرام تک‌خطی سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز

در شکل (۸) منحنی تولید ساعتی نیروگاه خورشیدی در دو حالت وجود ذخیره‌ساز و عدم وجود ذخیره‌ساز بر حسب مگاوات ارائه شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، در حالت ترکیبی، خروجی تقریباً یکنواخت است. شبیه‌سازی در دو حالت قبل و بعد از اتصال سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری، در نرم‌افزار DigSILENT انجام شده است. خروجی این نرم‌افزار که در شکل (۹) ارائه

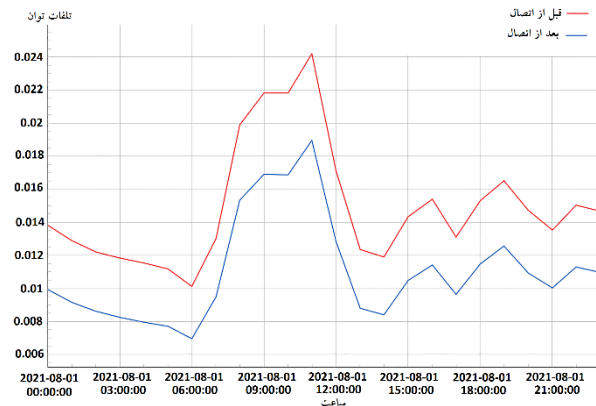
شده است، مقادیر شاخص‌های شبکه بالادست در دو حالت قبل و بعد از اتصال سیستم ترکیبی پیشنهادی به شبکه را نشان می‌دهد. در شکل (۹-الف) تلفات پست فوق توزیع، در شکل (۹-ب)، درصد بارگذاری پست فوق توزیع، در شکل (۹-ج) ولتاژ باس ۲۰ کیلوولت پست فوق توزیع و در شکل (۹-د)، بار پست فوق توزیع را قبل و بعد از اتصال ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری برای یک بازه ۲۴ ساعته می‌توان مشاهده کرد. همچنین مقادیر عددی تغییر در کمیت‌های مورد اشاره در شکل (۹) را می‌توان در جدول (۶) خلاصه نمود.



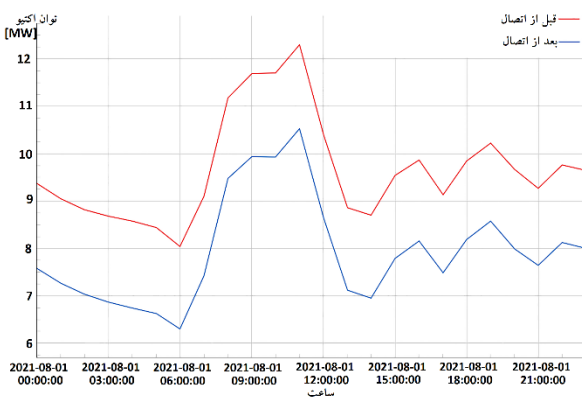
شکل (۸): منحنی تولید نیروگاه خورشیدی به تنهایی و در کنار ذخیره‌ساز باتری



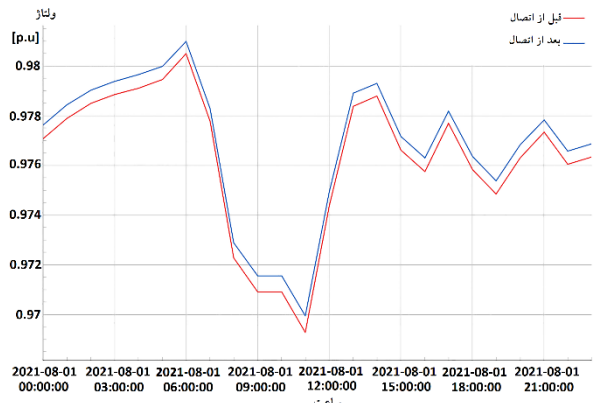
(ب) درصد بارگذاری پست فوق توزیع



(الف) تلفات پست فوق توزیع



(د) بار پست فوق توزیع



(ج) ولتاژ باس ۲۰ کیلوولت پست فوق توزیع

شکل (۹): شاخص‌های شبکه در دو حالت قبل و بعد از اتصال ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری در یک بازه ۲۴ ساعته





جدول (۶): تغییر شاخص‌های فنی پست فوق توزیع در حالت قبل و بعد از اتصال ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری

تغییرات (%)	بعد از اتصال سیستم ترکیبی خورشیدی و ذخیره‌ساز	قبل از اتصال سیستم ترکیبی خورشیدی و ذخیره‌ساز	شاخص فنی
کاهش ۱۴٪	۲۱/۴۸	۲۴/۹۸	حداکثر بار پست فوق توزیع (MW)
کاهش ۵/۳۴٪	۴۲/۳۱	۴۷/۶۵	حداکثر بارگذاری پست فوق توزیع (%)
کاهش ۲۱٪	۱۹/۶۹	۲۴/۹۸	تلفات توان پست فوق توزیع (kW)
کاهش ۲۵٪	۱۰۸/۸۳	۱۴۳/۹۹	تلفات انرژی سالیانه پست فوق توزیع (MWh)
افزایش ۰/۰۶٪	۰/۹۶۹۴	۰/۹۶۸۸	حداقل ولتاژ (پریونیت)

همان‌گونه که از شکل (۹) می‌توان دریافت، از آن‌جاکه توان مشترک بصورت محلی تامین شده‌است، از شبکه بالادست جریان و توان کمتری عبور می‌کند. بنابراین تلفات شبکه و ترانسفورماتورها کاهش می‌یابد. همچنین ظرفیت اشغالی ترانسفورماتورها و ضریب بهره‌برداری آن‌ها کم‌تر می‌شود. این امر باعث بهبود ولتاژ باس ۲۰ کیلوولت نیز می‌گردد. از مقایسه نتایج ارائه شده در جدول (۶) می‌توان دریافت که استفاده از سیستم ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری، باعث بهبود قابل توجه در شاخص‌ها و پارامترهای شبکه توزیع برق بالادست شده‌است.

## ۵- نتیجه‌گیری

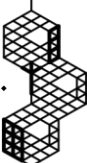
در این مقاله یک فرمول‌بندی جدید برای مسئله پیک‌سازی پیشنهاد گردید که در آن هم قیود فنی لحاظ شده و هم مسائل اقتصادی مد نظر قرار گرفته است. با حل مسئله بهینه‌سازی پیشنهادی، نتایج خروجی برای افق زمانی ۲۰ ساله مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفت. با انتخاب مقدار بهینه محاسبه شده برای نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری، نتایج نشان داد که در مجموع برای کل شبانه‌روز ۹۱٪ پیک‌سازی انجام شده‌است. بنابراین پیک‌سازی مورد انتظار برآورده شده و نتایج نشان می‌دهد که روش پیشنهادی به درستی عمل کرده‌است. در ادامه برخلاف بسیاری از مقالات که هیچ‌گونه تحلیل اقتصادی بر روی نتایج خود انجام نداده‌اند و صرفاً پارامترهای فنی را در مسئله پیک‌سازی مد نظر قرار می‌دهند، در این مقاله موضوع از بعد اقتصادی نیز بررسی شد. هر سه شاخص اقتصادی ارزیابی شده در سیستم تحت مطالعه، یعنی NPV، IRR و زمان بازگشت سرمایه، در بازه قابل قبول قرار داشتند. از این‌رو طرح پیشنهادی، از توجیه اقتصادی برخوردار است. در نهایت مسئله از نظر فنی نیز مورد ارزیابی قرار گرفت. شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار تحلیل شبکه DigSILENT انجام شد و نتایج نشان داد که استفاده از ترکیب نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز با مقادیر تعیین شده برای آن‌ها در مسئله بهینه‌سازی، باعث بهبود پارامترهای شبکه برق بالادست شده است. در نهایت نتایج حاصل شده، عملکرد مناسب و کارایی روش پیشنهادی در حل مسئله پیک‌سازی برای مشترک صنعتی مورد بحث از طریق نصب ترکیبی نیروگاه خورشیدی و ذخیره‌ساز باتری را تایید نمود.

## سپاس‌گزاری

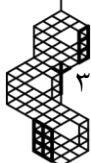
نویسندگان مقاله لازم می‌دانند تا از شرکت توزیع برق استان اصفهان و شرکت برق منطقه‌ای اصفهان به جهت در اختیار قرار دادن اطلاعات لازم برای انجام این پژوهش، تشکر و سپاس‌گزاری نمایند.

## مراجع

- [1] IRENA, *Renewable Capacity Statistics*. 2023. [Online]. Available: [www.irena.org](http://www.irena.org)
- [2] L. K. A. Halae, and M. M. Rezaei, "Optimum design of solar power plant in off-grid mode in order to reduce construction costs and the amount of unsupplied load by ALPSO algorithm," *Technovations in Electrical Engineering and Green Energy System*, vol. 2, no. 1, pp. 96-116, June 2023, doi: 10.30486/teegees.2023.1972393.1049.
- [3] [Online] Available: <https://www.farsnews.ir/news/14010129000915/>



- [4] A. Kaabeche, and R. Ibtouen, "Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind/diesel/battery generation in a stand-alone power system," *Solar Energy*, vol. 103, pp. 171-182, May 2014, doi: 10.1016/j.solener.2014.02.017.
- [5] F. Braam, R. Hollinger, M. L. Engesser, S. Muller, R. Kohrs, and C. Wittwer, "Peak shaving with photovoltaic-battery systems," in *IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies, Europe*, 2014, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2014.7028748.
- [6] R. Luthander, J. Widén, J. Munkhammar, and D. Lingfors, "Self-consumption enhancement and peak shaving of residential photovoltaics using storage and curtailment," *Energy*, vol. 112, pp. 221-231, Oct. 2016, doi: 10.1016/j.energy.2016.06.039.
- [7] N. Boyouk, N. Munzke, and M. Hiller, "Peak shaving of a grid connected-photovoltaic battery system at Helmholtz Institute Ulm (HIU)," in *2018 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT-Europe)*, 2018, pp. 1-5, doi: 10.1109/ISGTEurope.2018.8571616.
- [8] D. Dongol, T. Feldmann, M. Schmidt, and E. Bollin, "A model predictive control based peak shaving application of battery for a household with photovoltaic system in a rural distribution grid," *Sustainable Energy, Grids Networks*, vol. 16, pp. 1-13, Dec. 2018, doi: 10.1016/j.segan.2018.05.001.
- [9] S. M. S. Danish, M. Ahmadi, M. S. S. Danish, P. Mandal, A. Yona, and T. Senjyu, "A coherent strategy for peak load shaving using energy storage systems," *Journal of Energy Storage*, vol. 32, pp. 1-11, Dec. 2020, doi: 10.1016/j.est.2020.101823.
- [10] R. Manojkumar, C. Kumar, S. Ganguly, and J. P. S. Catalao, "Optimal peak shaving control using dynamic demand and feed-in limits for grid-connected PV sources with batteries," *IEEE System Journal*, vol. 15, no. 4, pp. 5560-5570, Dec. 2021, doi: 10.1109/JSYST.2020.3045020.
- [11] E. W. Schaefer, G. Hoogsteen, J. L. Hurink, and R. P. van Leeuwen, "Sizing of hybrid energy storage through analysis of load profile characteristics: A household case study," *Journal of Energy Storage*, vol. 52, pp. 1-19, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.est.2022.104768.
- [12] Y. Guo, and Y. Xiang, "Cost-benefit analysis of photovoltaic-storage investment in integrated energy systems," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 66-71, Aug. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.02.158.
- [13] S. Rajamand, M. Shafie-khah, and P. S. Catal, "Energy storage systems implementation and photovoltaic output prediction for cost minimization of a Microgrid," *Electric Power System Research*, vol. 202, pp. 1-15, Jan. 2021, doi: 10.1016/j.epr.2021.107596.
- [14] Z. Song, X. Guan, and M. Cheng, "Multi-objective optimization strategy for home energy management system including PV and battery energy storage," *Energy Reports*, vol. 8, pp. 5396-5411, Nov. 2022, doi: 10.1016/j.egy.2022.04.023.
- [15] Y. He, H. Zhang, Y. You, J. Tao, H. Sheng, and Q. Zhu, "Research on hybrid configuration of photovoltaic and storage distribution network considering the power demand of important loads," in *2022 5th International Conference on Energy, Electrical and Power Engineering (CEEPE)*, pp. 542-551, 2022, doi: 10.1109/CEEPE55110.2022.9783402.
- [16] G. Xu, C. Shang, S. Fan, X. Zhang, and H. Cheng, "Sizing battery energy storage systems for industrial customers with photovoltaic power," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 4953-4958, Feb. 2019, doi: 10.1016/j.egypro.2019.01.693.
- [17] L. C. Yong, "Peak shaving mechanism employing a battery storage system (BSS) and solar forecasting," *ECTI Transactions on Electric Engineering Electronics and Communications*, vol. 21, no.2, pp. 1-10, June 2023, doi: 10.37936/ecti-ec.2023212.249826.
- [18] R. Khezri, A. Mahmoudi, and M. H. Haque, "Optimal capacity of solar PV and battery storage for Australian grid-connected households," *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 56, no. 5, pp. 5319-5329, May 2020, doi: 10.1109/TIA.2020.2998668.
- [19] A. Abbasi, H. A. Khalid, H. Rehman, and A. U. Khan, "A novel dynamic load scheduling and peak shaving control scheme in community home energy management system based microgrids," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 32508-32522, March 2023, doi: 10.1109/ACCESS.2023.3255542.
- [20] Grid Energy Storage Report, [Online] Available: [http://energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/Grid Energy Storage December 2013.pdf](http://energy.gov/sites/prod/files/2014/09/f18/Grid_Energy_Storage_December_2013.pdf)
- [21] M. Uddin, M.F. Romlie, M. F. Abdullah, C. Tan, G. M. Sha, and A. H. A. Bakar, "A novel peak shaving algorithm for islanded microgrid using battery energy storage system," *Energy*, vol. 196, pp. 1-13, April 2020, doi: 10.1016/j.energy.2020.117084.
- [22] S. Wei, S. Xu, A. Agrawal, S. Choudhury, Y. Lu, Z. Tu, L. Ma, and L. A. Archer, "A stable room-temperature sodium-sulfur battery," *Nature Communication*, vol. 7, pp. 1-10, June 2016, doi:





- 10.1038/ncomms11722.
- [23] R. Fu, T. Remo, and R. Margolis, "Photovoltaics-plus-energy storage system costs benchmark," [Online] Available: <https://www.nrel.gov/docs/fy19osti/72401.pdf>
- [24] T. K. Mukherjee, G. V. Henderson, "Capital budgeting process: theory and practice," *Interfaces*, vol. 17, no. 2, April 1987, doi: 10.1287/inte.17.2.78.
- [25] M. M. Oskooonejad, "Basic Principles in Engineering Economics," *Engineering Economics (Economic Evaluation of Industrial Projects)*, Amirkabir University of Technology Publication, 1996, pp. 15-24, ISBN: 973-964-463-567-0.
- [26] C. Lehmann, M. Weeber, J. Böhner, and R. Steinhilper, "Techno-economical analysis of photovoltaic-battery storage systems for peak-shaving applications and self-consumption optimization in existing production plants," *Procedia CIRP*, vol. 48, pp. 313-318, May 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.03.017.
- [27] K. H. Chua, Y. S. Lim, and S. Morris, "Energy storage system for peak shaving," *International Journal of Energy Sector Management*, vol. 10, no. 1, pp. 3-18, Dec. 2016, doi: 10.1108/IJESM-01-2015-0003.
- [28] M. H. Abolhassani, and A. Safdarian, "Electric vehicles as mobile energy storage devices to alleviate network congestion," in *2019 Smart Grid Conference (SGC)*, pp. 1-5, 2019, doi: 10.1109/SGC49328.2019.9056608.
- [29] M. Farivar, and S. H. Low, "Branch flow model: relaxations and convexification-part I," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 3, pp. 2554-2564, April 2013, doi: 10.1109/TPWRS.2013.2255317.
- [30] [Online] Available: <https://modiremali.com/dictionary/>
- [31] J. Alpizar-Castillo, L. Ramirez-Elizondo, and P. Bauer, "The effect of non-coordinated heating electrification alternatives on a low-voltage distribution network with high PV penetration," in *2023 IEEE 17th International Conference on Compatibility, Power Electronics and Power Engineering (CPE-POWERENG)*, pp. 1-6, 2023, doi: 10.1109/CPE-POWERENG58103.2023.10227394.

## زیر نویس‌ها

<sup>1</sup> International Renewable Energy Agency (IRENA)

<sup>2</sup> Peak shaving

<sup>3</sup> Battery energy storage system

<sup>4</sup> Rule-based

<sup>5</sup> Bi-level stochastic programming model

<sup>6</sup> Spike-to-battery ratio

<sup>7</sup> Energy storage system

<sup>8</sup> Compressed air energy storage

<sup>9</sup> Pumped hydro storage

<sup>10</sup> Bi-directional converter

<sup>11</sup> Grid-connected

<sup>12</sup> Net present value

<sup>13</sup> Present worth of cost

<sup>14</sup> Internal rate of return

<sup>15</sup> Payback period

<sup>16</sup> Quadratic constrained programming

<sup>18</sup> Discount rate

<sup>۱۷</sup> سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق

