University of Qom
Engineering Management and Soft Computing
JEMSC.QOM
Online ISSN: 2538-2675

Application of linear programming model for optimizing the components of combined photovoltaic and battery system

Lale Mohamadifar[1], Seyed Hamed MoosaviRad[2] and Mitra Mirhosseini[3]

1 .Master student, Department of Industrial Engineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman Regional Electric Company. Email: mohamadifar_l@yahoo.com
2 .Corresponding author, Associate Professor, Department of Industrial Engineering, Faculty of ENgineering, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman. Email: s.h.moosavirad@uk.ac.ir
3.Assistant Professor, Energy and Environment Research Institute, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman. Email m.mirhosseini@uk.ac.ir

Article Info

Article type:
Research Article

Article history:
Received 13 Aug 2024
Received in revised form 5 Sep 2024
Accepted 15 Sep 2024
Published online 29 Sep 2024

Keywords:
Battery,
Energy Management,
Linear programming,
Optimization,
Photovoltaic Panel.

ABSTRACT

In this article, a combined energy system independent of the national power grid, including solar panels and batteries, is used as a storage system to provide energy. Due to the high costs of the system components, optimization with linear programming aims to reduce costs systems and complete coverage of energy demand has been done and the model has been implemented for 2 cities of Kerman and Mashhad. The results showed that since the output power of the photovoltaic panel is dependent on the temperature and intensity of solar radiation, under the conditions of using the same components and demand Equally, the implementation of this system in Kerman is more cost-effective. The sensitivity analysis of the studied system has been carried out and its effect has been examined in the results.

Cite this article: Mohamadifar, L. & others, (2024). Application of linear programming model for optimizing the components of combined photovoltaic and battery system. *Enginiiring Management and Soft Computing*, *10* (1). 143-154. **DOI**: https://doi.org/

© The Author(s)
DOI: https://doi.org/
Publisher: University of Qom

JEMSC.QOM
شاپا الکترونیکی: ۲۶۷۵-۲۵۳۸
مدیریت مهندسی و رایانش نرم
دانشگاه قم

کاربرد مدل برنامه‌ریزی خطی در بهینه‌سازی اجزای سیستم ترکیبی فتوولتائیک و باتری

لاله محمدی‌فر[۱]، سیدحامد موسوی‌راد[۲]✉ و میترا میرحسینی[۳]

۱. دانشجوی کارشناسی‌ارشد مهندسی صنایع، دانشگاه شهید باهنر کرمان، شرکت سهامی برق منطقه‌ای کرمان. رایانامه: mohamadifar_l@yahoo.com
۲. نویسنده مسئول، دانشیار، بخش مهندسی صنایع، دانشکده فنی‌ومهندسی، دانشگاه شهید باهنر کرمان. رایانامه: s.h.moosavirad@uk.ac.ir
۳. استادیار، پژوهشکده انرژی و محیط زیست، دانشگاه شهید باهنر کرمان. رایانامه: m.mirhosseini@uk.ac.ir

اطلاعات مقاله

نوع مقاله: مقاله پژوهشی
تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۵/۲۳
تاریخ بازنگری: ۱۴۰۳/۰۶/۱۵
تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۵
تاریخ انتشار: ۱۴۰۳/۰۶/۳۱

کلیدواژه‌ها:
باتری،
برنامه‌ریزی خطی،
بهینه‌سازی،
پنل فتوولتائیک،
مدیریت انرژی.

چکیده

در این مقاله یک سیستم انرژی ترکیبی مستقل از شبکه برق سراسری شامل پنل‌های خورشیدی و باتری به‌عنوان سیستم ذخیره‌ساز، جهت تامین انرژی استفاده شده‌است. با توجه به هزینه‌های بالای اجزای سیستم، بهینه‌سازی با برنامه‌ریزی خطی با هدف کاهش هزینه‌های خالص سیستم و پوشش کامل تقاضای انرژی انجام شده‌است و مدل برای دو شهر کرمان و مشهد پیاده‌سازی شده‌است. نتایج نشان داد ازآنجاکه توان خروجی پنل فتوولتائیک وابسته به دما و شدت تابش خورشیدی است، در شرایط استفاده از اجزای یکسان و تقاضای برابر، پیاده‌سازی این سیستم در کرمان مقرون‌به‌صرفه‌تر است. تحلیل حساسیت سیستم مورد مطالعه انجام و اثر آن در نتایج مورد بررسی قرار گرفته‌است.

استناد: محمدی‌فر، لاله؛ موسوی‌راد، سیدحامد؛ میرحسینی، میترا. (۱۴۰۳). «کاربرد مدل برنامه‌ریزی خطی در بهینه‌سازی اجزای سیستم ترکیبی فتوولتائیک و باتری». *مدیریت مهندسی و رایانش نرم*، دوره ۱۰ (۱). صص: ۱۵۴-۱۴۳. https://doi.org/

ناشر: دانشگاه قم
© نویسندگان.

۱) مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در سایر نقاط جهان، به دلیل بالارفتن آلودگی‌های زیست‌محیطی و نیاز به انرژی و مسائل سرمایه‌گذاری اقتصادی، رو به افزایش است. بیشترین منابع تولید برق تجدیدپذیر که از آن استفاده می‌شود، سیستم‌های خورشیدی و بادی هستند. برای استفاده بهینه و کارآیی بیشتر، از سیستم‌های ترکیبی به همراه سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده می‌شود. با توجه به جنبه‌های اقتصادی، منابع تجدیدپذیر برای تولید برق مقرون‌به‌صرفه هستند و می‌توانند به بی‌ثباتی قیمت انرژی در آینده کمک کنند. بطورخاص کاهش هزینه‌های فتوولتائیک، آن را به یک راه‌حل سودمند اقتصادی و زیست‌محیطی در بخش‌مصارف خانگی تبدیل می‌کند (آرکوس-وارگاس، کانسینو و رومن-کلادو[1]، ۲۰۱۸).

با این وجود، وابستگی ذاتی منابع تجدیدپذیر (بادی و خورشیدی و غیره) به شرایط اقلیمی و آب‌وهوایی باعث می‌شود که منبع انرژی عدم قطعیت داشته باشد که این منجر به تهدید تعادل بین تولید و تقاضا می‌شود و نیز به ناپایداری در شبکه برق منتهی می‌گردد (لی[2]،۲۰۱۹). در این راستا، سیستم‌های ذخیره انرژی عناصر کلیدی در سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر هستند و می‌توانند برای ذخیره انرژی اضافی از منابع تولید و بهبود تعادل بین تولید و تقاضا با مصرف محلی برق مورد استفاده قرار گیرند (لی یو[3]،۲۰۱۸). در میان فناوری‌های مختلف سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی، باتری‌ها با توجه به مزایایی مانند پاسخ سریع، کنترل‌پذیری و عدم وابستگی به شرایط محیطی بیشتر استفاده می‌شوند (یانگ[4] و همکاران،۲۰۱۸). با این حال، یکی از مسائل اصلی باتری‌ها به‌عنوان سیستم پشتیبان، هزینه سرمایه نسبتا بالای آنها در مقایسه با منابع انرژی معمولی است (لی یو،۲۰۱۸). لذا اهمیت مسئله بهینه‌سازی تعداد پنل‌های خورشیدی و باتری‌ها برای تامین تقاضای بار مشخص می‌شود.

بخش دوم این مقاله، پیشینه تحقیق آورده شده‌است. در بخش سوم، روش حل مسئله و مدل‌سازی ریاضی اجزای سیستم ارائه شده و نیز در بخش چهارم، نتایج محاسبات برای دو شهر کرمان و مشهد با توجه به اطلاعات شدت تابش خورشیدی و دمای محیط آورده شده‌است. همچنین در بخش پنجم، نتیجه‌گیری مطالعه بیان شده‌است.

۲) پیشینه تحقیق

مطالعات زیادی جهت بهینه‌سازی اجزای سیستم‌های ترکیبی با استفاده از منابع تولید انرژی و با هدف کاهش هزینه‌ها و شاخص‌های فنی انجام می‌شود. کوهساری و همکاران (۲۰۱۸) از روش بهینه‌سازی برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط با هدف به‌حداقل‌رساندن هزینه سالانه و درنظرگرفتن محدودیت‌های فنی سیستم ترکیبی توربین‌بادی/فتوولتائیک و باتری استفاده شده‌است. در مطالعه افشان و صالحی (۲۰۱۸) تاثیر مدیریت انرژی یک سیستم تامین بار باتری و پنل متصل به شبکه با استفاده از روش برنامه‌ریزی خطی با هدف حداقل‌کردن هزینه سرمایه‌گذاری سیستم، انجام شده‌است. در مطالعه دیگری نادری‌پور و همکارانش (۲۰۲۲) جهت طراحی بهینه، قابل اعتماد و مقرون‌به‌صرفه سیستم ترکیبی فتوولتائیک، بادی و باتری

---

[1] Arcos-vargas, Cansino and Román-collado
[2] Li,J
[3] Liu *et al*
[4] Yang *et al*

با درنظرگرفتن مفهوم خاموشی از الگوریتم بهینه‌سازگرگ خاکستری استفاده کرده‌است. ییلماز و دینسر[5](۲۰۱۷) بر روی اندازه بهینه سیستم ترکیبی فتوولتائیک، دیزل ژنراتور و باتری با هدف تامین انرژی برق برای یک منطقه و به‌صورت مستقل از شبکه و با مدل‌سازی براساس روش‌های ریاضی با هدف و قیود مشخص انجام شده‌است.

در مطالعه‌ای که توسط ملیکا تسلیمی و همکاران (۲۰۲۱) انجام شده، بهینه‌سازی چندهدفه با دو تابع هدف متضاد (کاهش هزینه‌های سیستم و احتمال ازدست‌دادن منبع تغذیه) با روش ضریب وزنی برای مقدار بهینه اجزای سیستم فتوولنائیک، باتری، شارژکنترلر، اینورتر یک مکان مسکونی مستقل از شبکه سراسری برق با روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط استفاده شده‌است.

مهدی مهرتاش و همکارانش (۲۰۲۰) در مطالعه‌ای که برای بهینه‌سازی تعداد پنل خورشیدی و باتری انجام دادند، از روش برنامه‌ریزی غیرخطی بهبودیافته استفاده و اثرات زیست‌محیطی را لحاظ کردند. همچنین با استفاده از برنامه‌ریزی خطی تکنیک مک‌کورمیک مطالعه را تکرار کردند که نتایج نشان‌دهنده دقت و محاسبات معقول بود. رودریگو مارتیز در پژوهشی که با همکارانش جهت بهینه‌سازی سیستم ترکیبی فتوولتائیک و باتری انجام دادند، از مدل برنامه‌ریزی‌خطی با هدف کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم اقدام کردند.

همچنین به‌منظور مطالعات دینامیکی جهت تامین برق ساعتی برای مصارف خانگی، مطالعات متعددی با استفاده از سایر روش‌های فراابتکاری و لحاظ‌نمودن مشخصات فنی اجزای سیستم ترکیبی تجدیدپذیرها توسط محققان انجام شده‌است. هدف مطالعه بهینه‌سازی صوفیان و همکاران[6] (۲۰۱۹) پیداکردن ظرفیت بهینه برای سیستم ذخیره‌ساز باتری، به‌حداقل‌رساندن هزینه سرمایه‌گذاری و تعمیر و نگهداری سالیانه آنها و نیز به‌حداقل‌رساندن هزینه روزانه برنامه‌ریزی ریزشبکه‌ها می‌باشد که توسط الگوریتم کرم‌شب‌تاب پردازش و با میزان حداقل و حداکثر مجاز شارژ و دشارژ باتری‌ها در کنار حفظ تعادل بین تولید و مصرف محدود می‌شود. سائو و همکاران[7] (۲۰۲۲) طراحی، شبیه‌سازی دینامیکی و انتخاب اندازه بهینه سیستم ترکیبی خورشیدی/بادی و مبتنی بر باتری برای تامین انرژی خارج از شبکه با استفاده از برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط و با اهداف کاهش هزینه سرمایه‌گذاری و کاهش شاخص قابلیت اطمینان ازدست‌دادن احتمال منبع تغذیه، انجام شده‌است. کسیراوات، بونسیری و ساک سورنچائی[8](۲۰۱۸) از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی طراحی سیستم و محاسبه ظرفیت نصب‌شده PV، ظرفیت باتری و ظرفیت سیستم ذخیره‌ساز انرژیCSP برای حالت مستقل از شبکه با هدف کاهش هزینه‌ها استفاده شده‌است.

در مطالعه دیگری که توسط خاریچ، سایوتی و آخراز[9](۲۰۱۸) انجام شده، با استفاده از روش بهینه‌سازی ازدحام ذرات چندهدفه MOPSO برای بهینه‌سازی سیستم هیبرید منابع انرژی تجدیدپذیر استفاده شده‌است. رونگ‌رونگ و همکارانش[10] (۲۰۱۸) با استفاده از الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی طراحی سیستم هیبرید تامین برق را با هدف کاهش هزینه‌ها انجام داده‌است. در پژوهش محمودی، بوآزیزک و صاحب‌کوسا[11](۲۰۱۸) از رویکرد بهینه‌سازی چندهدفه سیستم تولید

[5] Yilmaz and Dincer
[6] Sufyan *et al*
[7] Cao *et al*
[8] Kasirawat, Boonsiri and Saksornchai
[9] Kharrich, Sayouti and Akherraz
[10] Rongrong *et al.*
[11] Mahmoudi, Bouazizc and Saheb-Koussa

برق مستقل از شبکه برق سراسری با سه هدف کاهش هزینه تولید، کاهش تولید گازهای آلاینده هوا و افزایش کیفیت و قابلیت اطمینان برق استفاده شده‌است.

در این مقاله، با استفاده از برنامه‌ریزی خطی در Matlab2020b ، با هدف کاهش هزینه‌های سیستم فتوولتائیک و باتری در طول عمر سیستم جهت تامین تقاضای انرژی الکتریکی مکان مستقل از شبکه برق، مطالعه بهینه‌سازی تعداد پنل‌های فتوولتائیک و باتری با درنظرگرفتن محدودیت‌های مطالعات پیشین انجام شده‌است و عملکرد سیستم ارائه‌شده با استفاده از داده‌های هواشناسی، تقاضای‌بار و مشخصات فنی تجهیزات برای دو مکان در شهر کرمان و مشهد، با توجه به موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی، پیاده‌سازی شده و در ادامه با اضافه‌کردن محدودیت فضای قابل دسترس و هزینه، مجددا مطالعه تکرار و نتایج ارائه گردیده‌است.

۳) روش تحقیق

برای حل مسائل بهینه‌سازی، ابتدا لازم است مدل سیستم تهیه شود. به‌عبارتی روابط ریاضی، تابع هدف، متغیرها، محدودیت‌های مدل تعریف شوند. بطورکلی یک سیستم فتوولتائیک همراه با باتری که مستقل از شبکه برق سراسری طراحی می‌شود باید بتواند بار مورد تقاضا را تامین نماید. برای طراحی اینگونه واحدها بایستی مدل بار و کل توان موردنیاز بار در یک دوره شبانه‌روز محاسبه و ظرفیت واحدها و تعداد پنل‌ها بر این اساس محاسبه شود. ازآنجاییکه سیستم فتوولتاییک قابلیت تولید پیوسته توان (برای مثال در هنگام شب) را ندارد و میزان تولید آن به شرایط جوی بستگی دارد لذا باید از سیستم ذخیره‌ساز انرژی استفاده گردد.

۳–۱) مدل‌سازی ریاضی اجزای سیستم

برای حل مسائل بهینه‌سازی، ابتدا لازم است مدل سیستم تهیه شود. به‌عبارتی روابط ریاضی، تابع هدف، متغیرها، محدودیت‌های مدل تعریف شوند لذا در ادامه مدل‌سازی پنل فتوولتائیک و باتری آورده شده‌است.

۳–۱–۱) مدل ریاضی پنل فتوولتائیک

توان تولیدی یک سیستم فتوولتائیک (P_{pv})، به شدت تابش خورشیدی و دمای محیط بستگی دارد. در این مقاله برای مدل‌سازی از روش عددی، مطابق روابط ریاضی زیر استفاده شده‌است (نادری‌پور و همکاران، ۲۰۲۲):

$$P_{PV} = P_{PV,rated} \times \frac{S}{S_{ref}} \times [1 + N_T (T_{C-} T_{STC})] \quad (۱)$$

$$T_C = T_{amb} + [\frac{(NOCT - 20}{800} \times S] \quad (۲)$$

$P_{PV,rated}$: توان نامی هر واحد پنل فتوولتائیک است.

S و S_{ref} به‌ترتیب شدت تابش خورشیدی مکان موردمطالعه و شدت تابش خورشیدی در شرایط استاندارد و واحد آن (W/m^2) است. N_T: ضریب دمایی پنل است که نشان‌دهنده میزان تغییر در توان تولیدی پنل خورشیدی با افزایش یا

کاهش دما نسبت به شرایط استاندارد یعنی ۲۵ درجه سانتی‌گراد است. T_{amb} و Tc دمای محیط و دمای شرایط تست استاندارد (۲۵ درجه سلسیوس) است و NOCT[12] به دمای اسمی سلول (^oC) اشاره دارد.

۳-۱-۲) ظرفیت باتری موردنیاز

ظرفیت باتری (آمپرساعت) موردنیاز سیستم را در حالت استاتیک می‌توان از فرمول زیر نیز محاسبه نمود (خطیب و همکاران، ۲۰۱۱):

$$C_{Wh} = \frac{E_L * D_{Autonomous}}{V_B.DOD.\eta_B} \quad (۳)$$

که در آن V_B و η_B به‌ترتیب ولتاژ و راندمان باتری هستند درحالیکه DOD[13] نرخ عمق مجاز تخلیه باتری و E_L مصرف انرژی روزانه برحسب کیلووات‌ساعت و یا وات‌ساعت است. $D_{Autonomous}$ تعداد روزهایی که ابری است و تولید از پنل‌های خورشیدی وجود ندارد.

۳-۲-۳) تابع هدف

هدف از بهینه‌سازی سیستم، حداقل‌کردن کل هزینه خالص فعلی (TNPC[14]) با لحاظ عمر باتری و نرخ بهره سالانه است. هزینه سیستم شامل هزینه سرمایه‌گذاری اجزای سیستم، هزینه بهره‌برداری و نگهداری و هزینه جایگزینی با توجه به دوره عمر تجهیزات می‌باشد که براساس روابط زیر می‌باشد (نادری‌پور و همکاران، ۲۰۲۲):

$$ACS = AC_{capt} + AC_{o\&m} + AC_{rep} \quad (۴)$$

$$AC_{capt} = (N_{PV} \times C_{cap_pv}) + (N_{BAT} \times C_{cap_bat}) \quad (۵)$$

$$AC_{o\&m} = (N_{PV} \times C_{o\&m_pv}) + (N_{BAT} \times C_{o\&m_bat}) \quad (۶)$$

$$AC_{rep} = (N_{BAT} \times C_{rep_bat}) \quad (۷)$$

AC_{capt}: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سیستم

$AC_{o\&m}$: هزینه تعمیر و نگهداری سالانه سیستم

AC_{rep}: هزینه جایگزینی سیستم

C_{cap_pv}: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه پنل خورشیدی

C_{cap_bat}: هزینه سرمایه‌گذاری اولیه باتری

C_{rep_bat}: هزینه جایگزینی باتری

N_{PV}: تعداد پنل خورشیدی

N_{BAT}: تعداد باتری است.

[12] Nominal Operating Cell Temperature
[13] Deep Of Discharge
[14] Total net present cost

۳-۳) محدودیت‌ها

(۸)

براساس مدل ریاضی اجزای سیستم مورد مطالعه و مشخصات فنی آنها، محدودیت‌های لحاظ‌شده در این مطالعه شامل حداکثر پوشش بار مورد تقاضا، حداقل و حداکثر تعداد باتری‌ها و پنل‌های خورشیدی است و قید حداکثر فضای قابل دسترس جهت نصب سیستم نیز اضافه شده‌است.

$$N_{PV\min} \le N_{PV} \le N_{PV\max} \quad (۹)$$

$$N_{Bat\min} \le N_{Bat} \le N_{Bat\max}$$

$$N_{PV} \times A_{PV} \le C \quad (۱۰)$$

$N_{PV\max}$: تعداد ماکزیمم پنل خورشیدی

$N_{PV\min}$: تعداد مینمم پنل خورشیدی

$N_{Bat\max}$: تعداد ماکزیمم باتری

$N_{Bat\min}$: تعداد مینیمم باتری

A_{PV}: مساحت هر پنل‌خورشیدی

و C: فضای قابل دسترس به متر مربع است.

۴) یافته‌ها

با توجه به اینکه سیستم مورد مطالعه، یک منبع تولید انرژی برق که پنل فتوولتائیک است و از باتری به‌عنوان سیستم پشتیبان برای ساعاتی که تابش وجود ندارد جهت تامین برق استفاده شده‌است لذا قید حداکثر پوشش تقاضای بار در مسئله لحاظ شده‌است. ازجمله قیود دیگر حاکم بر مسئله، ماکزیمم و مینیمم تعداد باتری، پنل‌ها و فضای مورد دسترس جهت نصب سیستم است. با توجه به نقشه شدت تابش خورشیدی ایران و مدل ریاضی توان تولیدی پنل‌های خورشیدی، ملاحظه می‌شود ازجمله عوامل اثرگذار در تولید توان پنل‌های خورشیدی، شدت تابش خورشید و دما هستند که دما اثر کاهشی و شدت تابش خورشید اثر افزایشی بر تولید دارد. بنابراین برای نشان‌دادن این عوامل در نتایج مطالعه، دو شهر کرمان و مشهد که دارای شدت تابش خورشیدی بالا و دمای محیطی مناسب هستند برای پیاده‌سازی مدل مطالعه انتخاب شده‌اند. براساس داده‌های تابش خورشیدی و دمای محیط از سایت ناسا و https://meteonorm.com دو مکان مورد مطالعه و مدل‌سازی روابط اجزای سیستم، مشخصات فنی آنها و با لحاظ تامین بار مورد تقاضا تعداد پنل‌ها و باتری‌ها بدون هیچ محدودیتی محاسبه شده‌است. همچنین هزینه‌های سیستم شامل هزینه‌های سرمایه‌گذاری، هزینه‌های تعمیرات و نگهداری سالیانه اجزای سیستم و هزینه‌های جایگزینی در طول عمر پروژه محاسبه هزینه سیستم انجام شده‌است. مجددا برنامه با لحاظ قیود ذکرشده تکرار گردید که نتایج در جدول ۱ ارائه شده‌است.

جدول شماره ۱. نتایج مطالعه سیستم فتوولتائیک/باتری در کرمان و مشهد با تغییر پارامترهای اجزای سیستم

مکان مطالعه	اجزای سیستم موردمطالعه	تعداد	هزینه سرمایه‌گذاری	هزینه تعمیر و نگهداری	هزینه جایگزینی	جمع هزینه‌ها در طول عمر ۲۵ ساله سیستم
کرمان	پنل فتوولتائیک ۲۵۰ واتی	۱۱	۲۷۳۷۰۰	۶۶۶۱۴۵۶	–	۹۴۳۶۵۰۸
	باتری ۱۰۰ آمپر ساعتی	۱۸			۲۵۰۱۳۵۲	
	پنل فتوولتائیک ۳۲۵ واتی	۹	۲۱۴۵۰۰	۵۲۲۰۶۱۵	–	۷۲۶۱۴۹۲
	باتری ۱۵۰ آمپر ساعتی	۱۲			۱۸۲۶۳۸۴	
مشهد	پنل فتوولتائیک ۲۵۰ واتی	۱۵	۳۰۴۵۰۰	۷۴۱۱۰۸۲	–	۱۰۲۱۶۹۰۳
	باتری ۱۰۰ آمپر ساعتی	۱۸			۲۵۰۱۳۵۲	
	پنل فتوولتائیک ۳۲۵ واتی	۱۲	۲۴۰۰۰۰	۵۸۴۱۲۴۷	–	۷۹۰۷۶۳۱
	باتری ۱۵۰ آمپرساعتی	۱۲			۱۸۲۶۳۸۴	

*هزینه‌ها در ۱۰۰۰ ضرب می‌شود و واحد آن میلیون تومان و مربوط به سال ۱۴۰۲ است.

همانگونه که مشاهده می‌شود به دلیل شدت تابش خورشیدی بالای کرمان نسبت به مشهد، تولید توان پنل‌های خورشیدی در کرمان بیشتر از مشهد می‌باشد لذا برای تامین انرژی برق یک بار مشابه، به تعداد پنل کمتری نسبت به مشهد نیاز است درنتیجه هزینه سرمایه‌گذاری در کرمان کمتر است.

۴-۱) نتایج مطالعه بهینه‌سازی مقید

ماکزیمم انرژی مورد تقاضا در مکان‌های مورد بررسی جهت نصب سیستم تامین انرژی، ۱۴۸۰۰ وات‌ساعت، ضریب بهره باتری، اینورتر به‌ترتیب ۰.۸۵-۰.۹ و متوسط ساعات خورشیدی برای شهر کرمان ۵.۸، ولتاژ باتری با ولتاژ سیستم ۱۲ ولت و عمق دشارژ باتری ۰.۸ لحاظ شده‌است.

براساس مشخصات فنی سازندگان پنل‌های خورشیدی، ابعاد و قیمت پنل‌ها مشخص است. در این مطالعه مساحت پنل ۲۵۰ وات براساس ابعاد آن برابر ۱.۶۳۴ مترمربع و مساحت پنل۳۲۵ وات برابر ۱.۹۳۶ مترمربع درنظرگرفته شده‌است. با فرض اینکه فضای قابل دسترسی برای سیستم، ۱۲ مترمربع و حداکثر هزینه سرمایه‌گذاری اولیه ۳۵۰ میلیون تومان باشد، با استفاده از برنامه‌ریزی‌خطی در Matlab2020b این قیود استفاده شده و نتایج در جدول ۲ ارائه شده‌است.

جدول ۲. نتایج بهینه‌سازی ترکیب اجزای سیستم مورد مطالعه در شهر کرمان با قیود تعریف‌شده

اجزای سیستم مورد مطالعه	هزینه خرید	هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه	هزینه جایگزینی	طول عمر مفید	توان پنل/ظرفیت نامی باتری	ترکیب تعداد اجزای سیستم با قیود فضای قابل‌دسترسی/هزینه سرمایه‌گذاری اولیه		
پنل فتوولتائیک	۷۷۰۰	۷۷۰	–	۲۵	۲۵۰ وات	۸	۸	
	۸۵۰۰	۸۵۰	–		۳۲۵ وات			۶
هزینه کل پنل فتوولتائیک انتخاب‌شده در طول عمر ۲۵ساله (هزار تومان)						۱۵۰۶۹۵۳	۱۵۰۶۹۵۳	۱۲۴۹۷۶۵
	۱۰۵۰۰	۱۰۵۰	۱۰۵۰۰	۵	۱۰۰ آمپرساعت	۲۶		

اجزای سیستم مورد مطالعه	هزینه خرید	هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه	هزینه جایگزینی	طول عمر مفید	توان پنل/ظرفیت نامی باتری	ترکیب تعداد اجزای سیستم با قیود فضای قابل‌دسترسی/هزینه سرمایه‌گذاری اولیه		
باتری	۱۱۵۰۰	۱۱۵۰	۱۱۵۰۰		۱۵۰ آمپرساعت		۱۶	۱۶
هزینه کل باتری انتخاب‌شده در طول عمر ۲۵ ساله (هزار تومان)						۷۴۴۰۹۱۹	۴۶۴۱۹۸۸	۴۶۴۱۹۸۸
هزینه کل سیستم در طول عمر ۲۵ ساله (هزار تومان)						۸۶۱۷۲۳۶	۶۳۷۵۳۴۲	۶۱۰۶۷۵۳

*هزینه‌ها در ۱۰۰۰ ضرب می‌شود و واحد آن میلیون تومان و مربوط به سال ۱۴۰۲ است.

۵) نتیجه‌گیری و پیشنهادها

هدف اصلی پژوهش حاضر، طراحی بهینه اجزای سیستم فتوولتائیک و باتری برای تامین انرژی الکتریکی مکان مستقل از شبکه سراسری برق بود که پیاده‌سازی عملی با توجه به طراحی انجام شده، بر مبنای اطلاعات محیطی متفاوت واقعی در دو شهر کرمان، مشهد و مشخصات فنی یکسان اجزای سیستم مورد مطالعه (پنل و باتری) و بار مورد تقاضای یکسان مورد بررسی قرار گرفت. همانگونه که از نتایج این مطالعه مشاهده می‌شود، با توجه به عمر باتری‌ها و هزینه جایگزینی آنها در طول عمر پروژه که در اینجا ۲۵ سال لحاظ شده‌است، بیشترین سهم هزینه سرمایه‌گذاری مربوط به باتری‌ها می‌باشد. از طرفی با توجه به هزینه پنل‌های‌خورشیدی، مشخصات فنی آنها و براساس شرایط محیطی محل نصب سیستم ترکیبی پنل‌خورشیدی/ باتری و شرایط موجود (موجودبودن اجزای سیستم مورد مطالعه در انبار) جهت طراحی بهینه، لازم است با کمک برنامه‌ریزی‌خطی در حل مسئله، سناریوهای مختلف را درنظر گرفت و بهینه‌ترین حالت را جهت پیاده‌سازی سیستم تامین انرژی الکتریکی، انتخاب نمود.

همانطورکه در نتایج پژوهش مشاهده می‌شود، انتخاب بهینه تعداد باتری‌ها به‌عنوان پشتیبان سیستم مورد مطالعه اثر زیادی در کاهش هزینه‌ها در طول عمر پروژه دارد. لذا جهت کاهش هزینه‌های سرمایه‌گذاری با انتخاب باتری‌های با ظرفیت بالاتر، تعداد آنها کمتر می‌شود و درنتیجه هزینه سیستم مورد مطالعه کاهش می‌یابد. همچنین نتایج نشان داد که با لحاظ‌کردن قید فضای قابل دسترس جهت نصب پنل‌های فتوولتائیک، تعداد حداکثر پنل‌ها محدود می‌شود لذا می‌توان از پنل‌ها با توان خروجی بالاتر و با درنظرگرفتن محدودیت‌های هزینه، اجزای بهینه سیستم مورد مطالعه را مشخص نمود. همچنین می‌توان با توجه به شرایط موجود سرمایه‌گذار برای طراحی سیستم، محدودیت‌های دیگری نیز ازجمله تعداد ماکزیمم یا مینیمم هریک از اجزای سیستم را در برنامه لحاظ نمود و مطالعه را تکرارکرد. می‌توان به‌عنوان تحقیق در آینده از منابع دیگر تولید انرژی ازجمله توربین بادی، جهت تامین انرژی استفاده نمود و نتایج را با این پژوهش مقایسه نمود. همچنین ارزش زمانی پول ازجمله مواردی است که می‌توان در مطالعه آتی نیز لحاظ گردد.

منابع

Afshan, R, and J Salehi. 2018. “Optimal Scheduling of Battery Energy Storage System in Distribution Network Considering Uncertainties Using Hybrid Monte Carlo- Genetic Approach.” Journal of Operation and Automation in Power Engineering VO - 6 6 (1). https://doi.org/10.22098/joape.2017.3385.1271

Arcos-vargas, Angel, José M Cansino, and Rocío Román-collado. 2018. “Economic and Environmental Analysis of a Residential PV System : A pro Fi Table Contribution to the Paris Agreement” 94 (July): 1024–35. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.06.023

Cao, Yan, Melika S Taslimi, Sajad Maleki Dastjerdi, Pouria Ahmadi, and Mehdi Ashjaee. 2022. “Design, Dynamic Simulation, and Optimal Size Selection of a Hybrid Solar/Wind and Battery-Based System for off-Grid Energy Supply.” Renewable Energy 187. https://doi.org/10.1016/j.renene.2022.01.112

Kasirawat, Tirapong, Patompong Boonsiri, and Titti Saksornchai. 2018. “PEA Microgrid Design for Coexistence with Local Community and Environment: Case Study at Khun Pae Village Thailand.” In 2017 IEEE Innovative Smart Grid Technologies - Asia: Smart Grid for Smart Community, ISGT-Asia 2017. https://doi.org/10.1109/ISGT-Asia.2017.8378343

Kharrich, Mohammed, Yassine Sayouti, and Mohamed Akherraz. 2018. “Microgrid Sizing with Environmental and Economic Optimization.” In 3rd Renewable Energies, Power Systems and Green Inclusive Economy, REPS and GIE 2018. https://doi.org/10.1109/REPSGIE.2018.8488864

Khatib, Tamer, A Mohamed, K Sopian, and M Mahmoud. 2011. “Optimal Sizing of Building Integrated Hybrid PV / Diesel Generator System for Zero Load Rejection for Malaysia.” Energy & Buildings 43 (12): 3430–35. https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2011.09.008

Kohsri, Sompol, Apichart Meechai, Chaiwat Prapainainar, Phavanee Narataruksa, Piyapong Hunpinyo, and Gürkan Sin. 2018. “Design and Preliminary Operation of a Hybrid Syngas/Solar PV/Battery Power System for off-Grid Applications: A Case Study in Thailand.” Chemical Engineering Research and Design 131. https://doi.org/10.1016/j.cherd.2018.01.003

Li, Jiaming. 2019. “Optimal Sizing of Grid-Connected Photovoltaic Battery Systems for Residential Houses in Australia.” Renewable Energy 136: 1245–54. https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.09.099

Liu, Jiahong, Chao Mei, Hao Wang, Weiwei Shao, and Chenyao Xiang. 2018. “Powering an Island System by Renewable Energy—A Feasibility Analysis in the Maldives.” Applied Energy 227: 18–27. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.10.019

Mahmoudi, Ahssen, Mohamed Najib Bouazizc, and Djohra Saheb-Koussa. 2018. “Feasibility Study for the Implantation of a Photovoltaic Generator in Addition to the Existing Electricity Supply in the Village of Tarat (Illizi Algeria).” In 2018 9th International Renewable Energy Congress, IREC 2018. https://doi.org/10.1109/IREC.2018.8362560

Mehrtash, Mahdi, Florin Capitanescu, Per Kvols Heiselberg, Thomas Gibon, and Alexandre Bertrand. 2020. “An Enhanced Optimal PV and Battery Sizing Model for Zero Energy Buildings Considering Environmental Impacts” 56 (6): 6846–56. https://doi.org/10.1109/TIA.2020.3022742

Naderipour, Amirreza, Amir Reza Ramtin, Aldrin Abdullah, Massoomeh Hedayati Marzbali, Saber Arabi Nowdeh, and Hesam Kamyab. 2022. “Hybrid Energy System Optimization with Battery Storage for Remote Area Application Considering Loss of Energy Probability and Economic Analysis.” Energy 239: 122303. https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122303

Rongrong, Ying Chen, Hongtao Liu, Zhai Hao Wu, Yongping Yang, and Mohammad O Hamdan. 2018. “Optimal Design Method of a Hybrid CSP-PV Plant Based on Genetic Algorithm Considering the Operation Strategy.” International Journal of Photoenergy 2018. https://doi.org/10.1155/2018/8380276

Sufyan, Muhammad, Nasrudin Abd Rahim, Chia Kwang Tan, Munir Azam Muhammad, and Siti Rohani Sheikh Raihan. 2019. “Optimal Sizing and Energy Scheduling of Isolated Microgrid Considering the Battery Lifetime Degradation.” PLoS ONE 14 (2). https://doi.org/10.1371/journal.pone.0211642

Taslimi, Melika, Pouria Ahmadi, Mehdi Ashjaee, and Marc A Rosen. 2021. “Design and Mixed Integer Linear Programming Optimization of a Solar / Battery Based Conex for Remote Areas and Various Climate Zones.” Sustainable Energy Technologies and Assessments 45 (February): 101104. https://doi.org/10.1016/j.seta.2021.101104

Yang, Yuqing, Stephen Bremner, Chris Menictas, and Merlinde Kay. 2018. “Battery Energy Storage System Size Determination in Renewable Energy Systems: A Review.” Renewable and Sustainable Energy Reviews 91: 109–25. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.047

Yilmaz, Saban, and Furkan Dincer. 2017. “Optimal Design of Hybrid PV-Diesel-Battery Systems for Isolated Lands: A Case Study for Kilis, Turkey.” Renewable and Sustainable Energy Reviews. https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.037

پیوست

کد برنامه در نرم افزار متلب

```
clear
clc
%Ra1=1*[6.73  7.34  8.35  8  7.54  6.94  5.45  4.48  3.79  3.97 4.77 5.8];%Average
radiation(kwh/m^2)kerman
%T1=[18.2 23.5 27.5 28.9 26.7 23.2 18.3 10.4 6.4 5.4 8 13.1];%Average empreture(oc)kerman
Ra1=1*[5.30 6.06 6.98 6.92 6.34 5.4 3.9 2.9 2.17 2.56 3.24 3.87];%Average
radiation(kwh/m^2)mashhad
T1=[15.7 22.1 26.5 29 27 21.6 15.5 8.8 4.4 3.5 5 10.4];%Average empreture(oc)mashhad
L1=1*[10.2 11.5 13 14.8 14.2 12.8 9.1 7 6.5 8.3 8.5 9];%Average Load (KW)
Ra=Ra1';
a=length(Ra1);
NOCT=43.6;
Tamb=T1;
L=L1;
PV_Wp=0.250; % the capacity of the PV array (KWatt)
```

```
DOD=0.8;ebat=0.85;einv=0.9;vinput=24;cbat=100;vbat=12;PSH=5.4;Sf=1;
tic;
NbatP=ceil((max(L1)*1000*1)/ (DOD*einv*vinput*cbat));
Nbats=vinput/vbat;
NbatT=NbatP*Nbats;
for i=1:a
    Tc(i)=Tamb(i)+(((NOCT-20)/800)*((Ra(i)*1000)/PSH));
    Ppv(i)=PV_Wp*((Ra(i)*1000/PSH)/1000)*(1-0.004*(Tc(i)-25));
         F(i)=ceil((L(i)*Sf)/ (0.95*einv*PSH*Ppv(i)));
        fprintf('Number of pv is:%d\n',F(i))
    subplot(2,2,1);bar(1:a,Ra)
xlabel('mounth')
ylim([0 8.5])
ylabel('Average radiation(KWh/m^2)')
        subplot(2,2,2);bar(1:a,Tamb)
    xlabel('mounth')
    ylim([0 30])
ylabel('Average Tempteture (OC)')
subplot(2,2,3);bar(1:a,L)
    xlabel('mounth')
    ylim([0 16])
ylabel('Average Load (KWh)')
disp(Ppv(i))
subplot(2,2,4);bar(1:i,Ppv)
    xlabel('mounth')
    ylim([0 0.4])
ylabel('Average power Pv (kw)')
end
fprintf('Number of pv is:%d\n',max(F))
fprintf('Number of paraller battery is:%d\n',NbatP)
fprintf('Number of series battery is:%d\n',Nbats)
fprintf('Number of total battery is:%d\n',NbatT)
%%cost evaluation
lbat=5;lpv=25;l=25;y=(l/lbat);
ir=0.035;nbatr=l/lbat;
fr=0.015;
NPC_CAP_pv=7700;
NPC_OM_pv=770;
NPC_REP_PV=0;
NPC_CAP_bat=10500;
NPC_OM_bat=1050;
NPC_REP_bat=10500;
NPC_CAP=(max(F))*NPC_CAP_pv+NbatT*NPC_CAP_bat;
fprintf(' Total capital cost is:%d\n',NPC_CAP);
for k=1:l
    pwa(k)=(((1+ir)^k)-1)/ (ir*(1+ir)^k);
    NPC_OM(k)=pwa(k).*((max(F))*NPC_OM_pv+NbatT*NPC_OM_bat);
end
NPC_OMT=sum(NPC_OM);
fprintf(' Total operation & maintenance cost is:%d\n',NPC_OMT);
for f=1:y
    mo(f)=(1/ (1+ir)^ (f*1));
    NPC_REP_batT(f)=f.* mo(f)*NPC_REP_bat*NbatT;
end
NPC_REPbT=sum(NPC_REP_batT);
fprintf(' Total REPlace cost of battery for 25 years is:%d\n',NPC_REPbT);
TNPC=NPC_CAP+NPC_OMT+NPC_REPbT;
fprintf('  Total Net Present cost for 25 years is:%d\n',TNPC);
toc
```

برنامه‌ریزی خطی

```
%%solve optimization problem using matlab
%syms x y
%x=Npv; y=Nbat
%minz=135030*x+278888*y;
%7700*x+10500*y<=450000;
%807.3*x=14800;
%864*y=29600;
%1.6*x<50;
%1<x<10
%2<y<38
```

```
%%
tic
f=[195107;405019];
%A=[7700 10500;1 0;0 1;-1 0;0 -1;1.8 0];
%b=[300000;12;18;-1;-1;50];
%A=[1239.75 816;1 0;0 1;-1 0;0 -1];
%b=[29600;20;20;-1;-1];
A=[1 0;0 1;-1 0;0 -1;1.634 0;7700 11500];
b=[15;30;-1;-1;12;350000];
Aeq=[1239.75 816];
beq=[29600];
%Aeq=[250 0;0 100];
%beq=[2984.47;1813.72];
linprog(f,A,b,Aeq,beq)
toc
```