

مقاله پژوهشی

تحلیل فنی اقتصادی تطبیقی سیستم‌های فتوولتائیک متصل و منفصل از شبکه برای تأمین انرژی گلخانه در اقلیم‌های مختلف ایران (مطالعه موردی: ارومیه و کاشان)

نادره تبریزی^{۱*}، مجتبی مروج^۲

۱- عضو هیأت علمی، بخش فنی مهندسی، مرکز تحقیقات و آموزش کشاورزی و منابع طبیعی استان آذربایجان غربی، سازمان تحقیقات، آموزش و ترویج کشاورزی، ارومیه، ایران
۲- دانشیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه پیام نور، تهران، ایران
تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۳/۳۱؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۹/۱۵

چکیده

این پژوهش به ارزیابی جامع عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک متصل به شبکه در دو منطقه ارومیه و کاشان و مقایسه آن‌ها با یک سیستم منفصل از شبکه با pvsyst پرداخته است. نتایج ارزیابی نشان داد سیستم متصل به شبکه در کاشان، نسبت به ارومیه، به دلیل شدت تابش بالاتر عملکرد بهتری دارد. چالش اصلی هر دو سیستم یک بار ثابت شبانه ۵ کیلوواتی بود که به عنوان مصرف تجهیزات جانبی گلخانه (مانند گرمایش، روشنایی، تهویه و مانیتورینگ) در شب یا نبود نور کافی فرض شده است. پنل‌ها که برای هر دو شهر یکسان طراحی شده اند، شامل ۷۲ ماژول (پنل) خورشیدی است که مجموعاً مساحتی برابر با ۱۸۶ متر مربع را اشغال می‌کنند. تلفات حرارتی و کاهش راندمان ماژول‌ها نیز عملکرد را تحت تأثیر قرار داد. از نظر اقتصادی، سیستم‌های متصل به شبکه با دوره بازگشت سرمایه ۳ سال، میزان بازده داخلی ۹۹/۷۱ درصد و هزینه تراز شده انرژی (LCOE) جذبه بالایی دارند. این سیستم‌ها با کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای مزایای زیست‌محیطی قابل توجهی ارائه می‌دهند. در مقابل، سیستم منفصل از شبکه با کمبود ۳۱ درصد انرژی و هدررفت در زمان اشباع باتری‌ها، قابلیت اطمینان و کارایی پایین‌تری دارند. هزینه تراز شده انرژی این سیستم به دلیل بالابودن هزینه باتری و راندمان پایین، آن را به گزینه‌ای کمتر باصرفه تبدیل می‌کند. تحلیل‌ها نشان می‌دهند سیستم‌های متصل به شبکه، در صورت وجود زیرساخت شبکه، از نظر فنی و اقتصادی بر سیستم‌های منفصل برتری دارند، اما پایداری آن‌ها به سیاست‌های حمایتی وابسته است.

واژه‌های کلیدی

پنل، گلخانه، متصل به شبکه، منفصل از شبکه، pvsyst

مقدمه

کشاورزی در محیط کنترل‌شده، به ویژه از طریق گلخانه‌ها، به عنوان یک استراتژی حیاتی برای افزایش بهره‌وری محصولات کشاورزی و تضمین تولید در تمام فصل‌ها مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، وابستگی شدید این سیستم‌ها به انرژی

تلاقی بحران‌های جهانی در امنیت غذایی، تغییرات اقلیمی و کمبود منابع انرژی جامعه علمی را به سمت توسعه راه‌حل‌های یکپارچه و پایدار سوق داده است، (Masriadi et al., 2024). در این میان،

می‌دهد تأثیر متغیرهای جغرافیایی و عملیاتی بر عملکرد سیستم به صورت ایزوله و کمی ارزیابی شود. هدف های کلیدی این مطالعه عبارت اند از: (۱) ارزیابی کمی پتانسیل تولید انرژی، نسبت عملکرد (PR) و تلفات سیستم در هر منطقه، (۲) روشن ساختن عوامل اصلی مؤثر بر ناکارآمدی سیستم به ویژه تأثیر تلفات حرارتی و بارهای جانبی، (۳) ارائه تحلیل اقتصادی جامع بر اساس شاخص‌های هزینه تراز شده انرژی (LCOE)، دوره بازگشت سرمایه (PBP) و نرخ بازده داخلی (IRR) برای سناریوهای متصل به شبکه، و (۴) ارزیابی چالش‌های فنی و اقتصادی یک سیستم منفصل از شبکه به عنوان یک گزینه برای مناطق دورافتاده. یافته‌های این پژوهش، داده‌های معتبری را برای بهینه‌سازی طراحی و سیاست‌گذاری در زمینه پروژه‌های کشاورزی پایدار در ایران و دیگر مناطق با شرایط اقلیمی مشابه فراهم می‌آورد.

مواد و روش‌ها

این پژوهش بر پایه شبیه‌سازی‌های عددی دقیق با استفاده از نرم‌افزار PVsyst 7.4 استوار است تا عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک را در سناریوهای مختلف ارزیابی کند. برای ارزیابی تأثیر تنوع اقلیمی بر عملکرد سیستم، دو شهر نماینده اقلیم‌های متفاوت در ایران انتخاب شدند:

ارومیه: در شمال غرب ایران با مختصات جغرافیایی ۳۷ درجه و ۳۲ دقیقه عرض شمالی، ۴۵ درجه و ۷ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۳۱۳ متر از سطح دریای آزاد. این شهر نماینده اقلیم سرد و کوهستانی است.

برای تنظیم دما، رطوبت و روشنایی آن‌ها را به یکی از پرمصرف‌ترین بخش‌های زنجیره کشاورزی تبدیل کرده است، (Ali Abaker Omer *et al.*, 2025; Soussi *et al.*, 2025) این مصرف بالای انرژی نه تنها هزینه‌های تولید را به شدت افزایش می‌دهد، بلکه با اتکا بر سوخت‌های فسیلی، با هدف های توسعه پایدار و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای در تضاد است. ادغام سیستم‌های فتوولتائیک به عنوان منبع انرژی پاک و تجدیدپذیر، راهکاری منطقی برای کاهش این وابستگی و حرکت به سوی گلخانه‌هایی با انرژی نزدیک به صفر ارائه می‌دهد (Gorjane *et al.*, 2021). در پژوهش‌های اخیر، ارزیابی فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک در کاربردهای کشاورزی مورد توجه قرار گرفته است. با این حال، بخش قابل توجهی از این مطالعات بر یک منطقه یا سناریوی خاص تمرکز داشته و از ارائه یک چارچوب تحلیلی جامع که عملکرد یک سیستم استاندارد را در شرایط مرزی متفاوت ارزیابی کند، بازمانده‌اند. در ادبیات علمی شکاف مشخصی در زمینه تحلیل‌های تطبیقی وجود دارد. به ویژه پژوهشی که بتواند به طور هم‌زمان اثر تنوع شدید اقلیمی (مانند تضاد بین اقلیم سرد و نیمه‌خشک با اقلیم گرم و بیابانی) و همچنین سناریوهای مختلف اتصال به شبکه و سیستم‌های منفصل از شبکه را بر عملکرد فنی و اقتصادی سامانه فتوولتائیک گلخانه‌ای بررسی کند (Zahrawi & Aly, 2024; Lepley *et al.*, 2025; Mazzeo *et al.*, 2025).

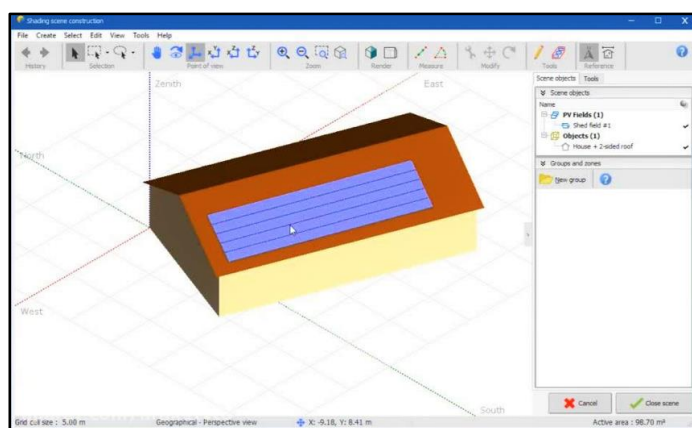
این پژوهش با هدف پر کردن این شکاف تحقیقاتی، یک تحلیل فنی-اقتصادی تطبیقی و دقیق از سیستمی فتوولتائیک طراحی شده برای یک گلخانه استاندارد در دو اقلیم‌های مختلف ایران (ارومیه و کاشان) ارائه می‌دهد. مقایسه‌ای که اجازه

مشخصات مدل گلخانه

برای پرداختن به تحلیل تطبیقی معتبر، مدل گلخانه استاندارد و یکسانی برای هر دو سایت در نظر گرفته شد (شکل ۱). این گلخانه از نوع تک‌دهانه‌ای با مساحت کف ۳۰۰ متر مربع و ارتفاع ۴ متر است. پوشش سازه از جنس پلی‌اتیلن دولایه انتخاب شد که ماده‌ای رایج برای ایجاد تعادل میان انتقال نور و عایق حرارتی است. خواص نوری و حرارتی این پوشش بر اساس مقادیر پیش‌فرض موجود در کتابخانه نرم‌افزار PVSyst تنظیم شد که نماینده ویژگی‌های معمول این ماده است.

کاشان: واقع در مرکز ایران با مختصات ۳۳/۵۹ درجه عرض شمالی، ۵۱ درجه و ۲۷ دقیقه طول شرقی و ارتفاع ۱۰۶۵ متر از سطح دریای آزاد. این شهر نماینده اقلیم گرم و خشک بیابانی است.

داده‌های هواشناسی ساعتی برای هر دو سایت با استفاده از پایگاه داده 8.1 Meteonorm تولید شدند. برای ارومیه از داده‌های دوره ۱۹۸۵-۲۰۰۰ و برای کاشان از داده‌های دوره ۱۹۸۸-۲۰۰۰ با اتکای ۱۰۰ در صد به داده‌های ماهواره‌ای استفاده شد. این داده‌ها شامل تابش افقی جهانی (GHI)، تابش پراکنده (DHI)، دمای محیط و سرعت باد است.



شکل ۱- نمایی از قرار گیری پنل‌ها روی سقف گلخانه

Fig. 1- View of the PV panel arrangement on the greenhouse roof

نصب‌شده در این پروژه اشغال می‌کنند. مساحت کل سلول ۱۷۲ متر مربع است که این مقدار تنها به مساحت بخش فعال و تولیدکننده الکتریسیته در پنل‌ها، یعنی مجموع مساحت خود سلول‌های سیلیکونی، برای هر دو شهر طراحی شد تا امکان مقایسه مستقیم فراهم گردد. جزئیات فنی این سیستم در جدول ۱ ارائه شده است. زاویه شیب و آریزیموت پنل‌ها برای هر سایت به گونه‌ای بهینه‌سازی شده است که دریافت سالانه تابش به حداکثر برسد.

سیستم متصل به شبکه

دو پیکربندی اصلی برای سیستم فتوولتائیک تعریف و شبیه‌سازی شد: یک سیستم متصل به شبکه برای هر دو شهر و یک سیستم منفصل از شبکه برای شهر ارومیه. سیستم فتوولتائیک یکسان با توان نامی ۳۹/۶ کیلووات (kWp) و مساحت کل ماژول، ۱۸۶ متر مربع است. این مقدار به کل ابعاد فیزیکی پنل خورشیدی شامل قاب آلومینیومی، فضای بین سلول‌ها و حاشیه‌هاست. در واقع، مساحت کل ماژول فضایی است که ۷۲ پنل

جدول ۱- مشخصات فنی سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه

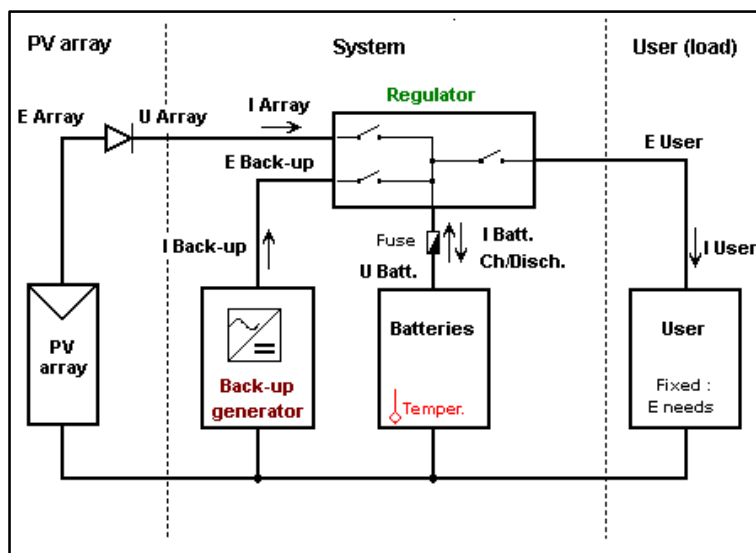
Table 1- Technical Specifications of the Grid-Connected PV System

مشخصات (Specification)	پارامتر (Parameter)
AE Solar AE 550MD-144BS , Monocrystalline Silicon	
550 W	ماژول PV
72 Module	PV Module
39.6 KW	توان کل آرایه
	Total Array Power
مدل: 36 KW(AC) ,Huawei SUN2000-36KTL-M3	اینورتر
1.1	نسب توان DC/AC
172 m ² / 186 m ²	مساحت کل ماژول/سلول
	Total Module / Cell Area
Urmia: 33.3 Kashan: 34.5	زاویه شیب (Tilt Angle)
Urmia: 25.1 Kashan: 24.7	زاویه آزیموت (Azimuth Angle)

سیستم منفصل از شبکه

برای ذخیره‌سازی انرژی و کنترل‌های مربوط است. این سیستم برای تأمین یک بار مصرفی سالانه تعریف شده معادل ۴۳۵۷۸ کیلووات ساعت طراحی شد (شکل ۲).

برای ارزیابی عملکرد در حالت مستقل، یک سیستم منفصل از شبکه برای سایت ارومیه مدل‌سازی شد. این سیستم شامل یک آرایه فتوولتائیک با توان ۲۲ کیلووات، یک بانک باتری



شکل ۲- شماتیک سیستم منفصل از شبکه

Fig. 2- Schematic diagram of the off-grid photovoltaic system

فرضیات شبیه‌سازی و تحلیل

شبیه‌سازی‌ها با در نظر گرفتن مجموعه‌ای از تلفات واقعی سیستم برای افزایش دقت نتایج صورت گرفت:

افت راندمان^۱: تمامی تحلیل‌ها برای سال بیست و پنجم عمر سیستم و افت راندمان تجمعی ماژول‌ها معادل ۹/۸۰ درصد در نظر گرفته شده است.

تلفات آلودگی^۲: بر اساس شرایط اقلیمی، این تلفات برای ارومیه ۳ درصد و برای کاشان ۵ درصد فرض شد.

مصرف تجهیزات جانبی^۳: فرض کلیدی در این پژوهش در نظر گرفتن یک بار ثابت شبانه به میزان ۵ کیلووات به عنوان مصرف تجهیزات جانبی است که تأثیر آن بر عملکرد نهایی سیستم ارزیابی شده است.

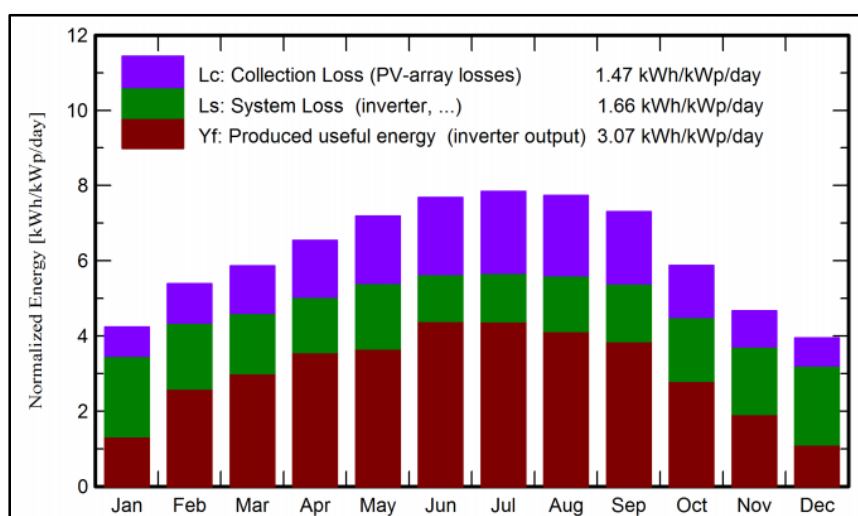
فرضیات اقتصادی: تحلیل اقتصادی بر مبنای هزینه‌های سرمایه‌گذاری و عملیاتی، نرخ خرید برق خورشیدی در سال ۱۴۰۳ برای مصرف بیشتر از ۲۰ کیلووات ۲۲۰۰۰ ریال برآورد شده برای بازار ایران

در نظر گرفته شد. تورم سالانه ۴۰ درصد به عنوان یکی از پارامترهای کلیدی در محاسبات مالی لحاظ گردید.

نتایج و بحث

عملکرد سیستم متصل به شبکه در ارومیه

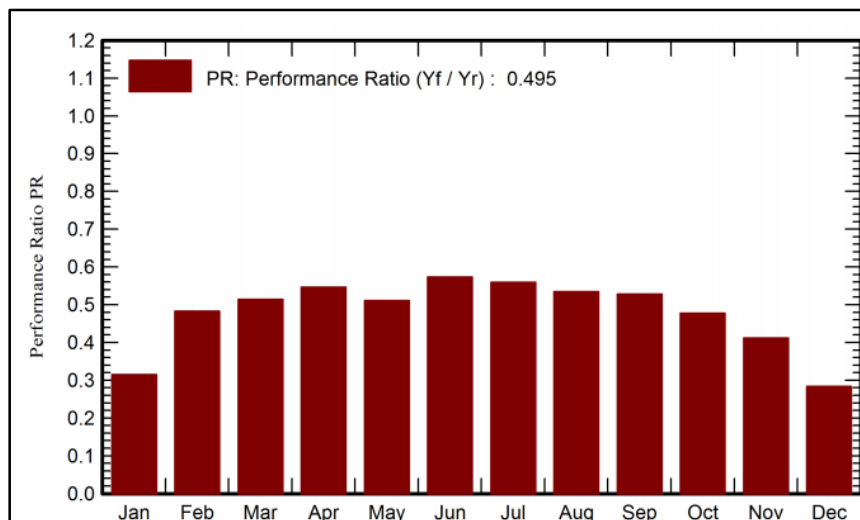
سیستم فتوولتائیک متصل به شبکه در ارومیه سالانه ۴۴۳۲۴ کیلووات‌ساعت انرژی با بازده ویژه ۱۱۱۹ کیلووات‌ساعت/کیلووات تولید می‌کند. بیشترین میزان تولید انرژی در ماه‌های ژوئن و ژوئیه (تابستان) با حدود ۵/۲۳ تا ۵/۳۹ کیلووات ساعت بر کیلووات در روز مشاهده می‌شود که مطابق با افزایش شدت تابش خورشیدی در این ماه‌هاست. کمترین میزان تولید مربوط به ماه‌های دسامبر و ژانویه (زمستان) با حدود ۱/۳۷ تا ۱/۶۴ کیلووات ساعت بر کیلووات در روز است (شکل ۳). نسبت عملکرد (PR) برابر با ۴۹/۵۴ درصد محاسبه شده است که به دلیل تلفات بالا، کمتر از بازه استاندارد (۷۵-۸۵ درصد) است (شکل ۴).



شکل ۳- تولید نرمال شده در شهر ارومیه (به ازای هر کیلووات نصب شده)
Fig. 3- Normalized energy production in Urmia (per kWp installed)

1- Degradation
3- Auxiliaries

2- Soiling

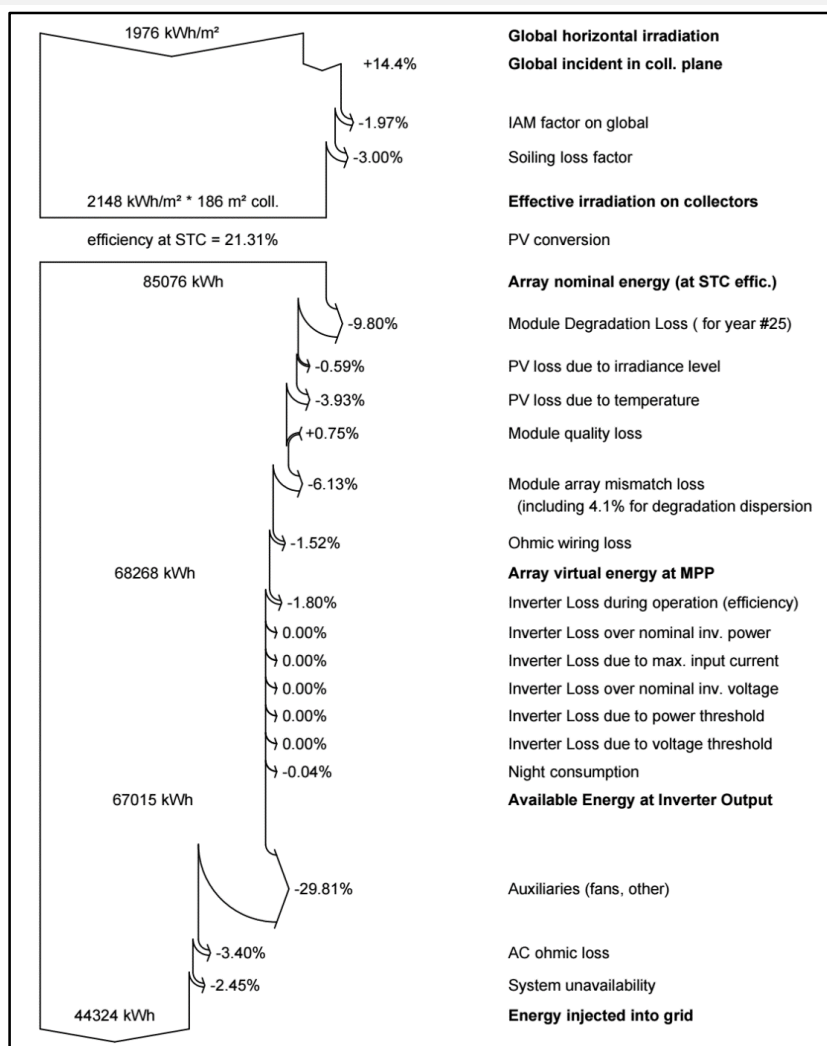


شکل ۴- نسبت عملکرد سایت در شهر ارومیه

Fig. 4- Performance ratio of the PV system in Urmia

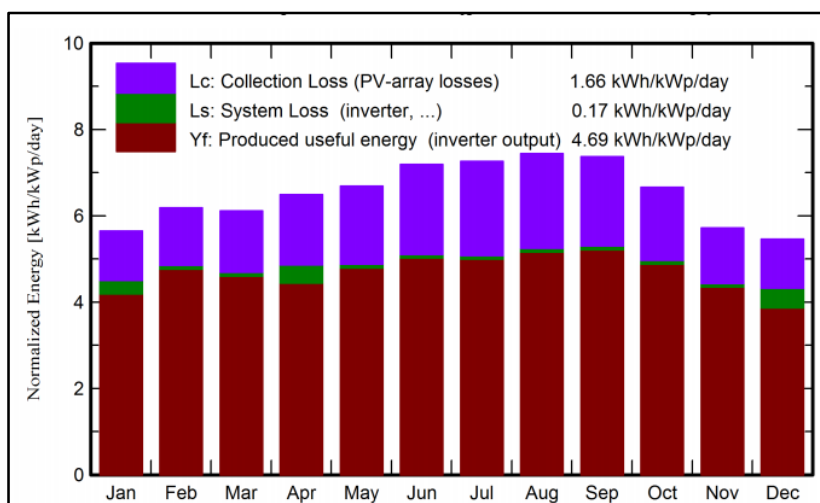
عملکرد سیستم متصل به شبکه در کاشان
سیستم در کاشان ۵۵۷۹۳ کیلووات-ساعت در سال با بازده ویژه ۱۴۰۹ کیلووات-ساعت بر کیلووات-پیک تولید می‌کند (شکل ۶). میانگین تولید روزانه سیستم در طول یک سال (Yf)، برابر با ۴/۶۹ کیلووات-ساعت بر کیلووات-پیک است. بازه تغییرات ماهانه تولید انرژی در فصل‌های مختلف متغیر است. بیشترین تولید در ماه‌های تابستان (مرداد) به حدود ۵/۲ کیلووات-ساعت بر کیلووات-پیک در روز می‌رسد. کمترین تولید در ماه‌های زمستان (مانند دی ماه) به حدود ۴/۲ کیلووات-ساعت بر کیلووات-پیک در روز کاهش می‌یابد (شکل ۶).

تحلیل نمودار تلفات (شکل ۵) نشان‌دهنده تلفات اصلی شامل کاهش راندمان ماژول در سال ۲۵ (۹/۸ درصد)، تلفات دمایی (۳/۹۳ درصد)، و به ویژه تلفات تجهیزات جانبی (۲۹/۸۱ درصد) ناشی از بار ثابت ۵ کیلوواتی شبانه است. این بار احتمالاً مرتبط با نیازهای گلخانه (مانند گرمایش یا روشنایی) تأثیر شدیدی بر PR دارد. تلفات دیگر شامل تطابق نداشتن ماژول (۶/۱۳ درصد) تلفات اهمی AC (۳/۴۰ درصد)، و تلفات اینورتر (۱/۸۰ درصد) است. این یافته نشان می‌دهند که مدیریت بارهای ثابت برای بهبود راندمان در مناطق با تابش کمتر حیاتی است.



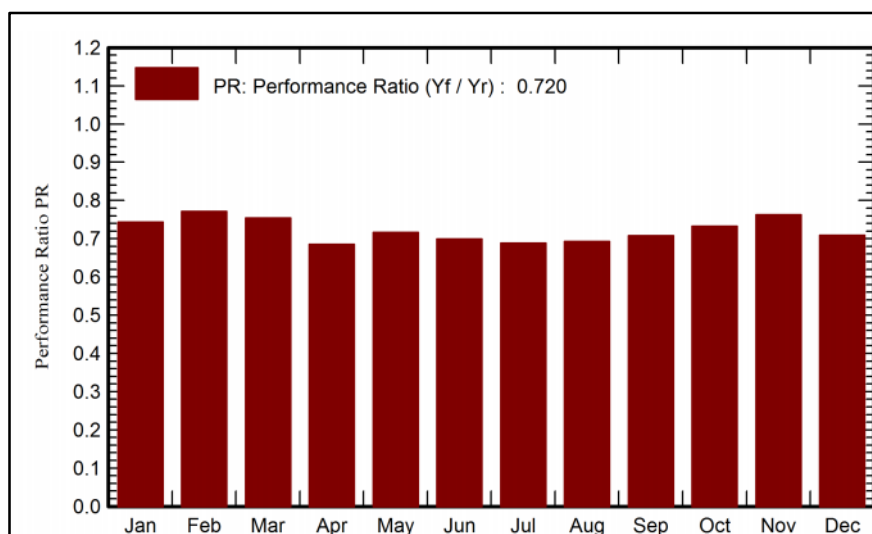
شکل ۵- نمودار تلفات سیستم متصل به شبکه در ارومیه

Fig. 5- Loss diagram of the grid-connected system in Urmia



شکل ۶- تولید نرمال شده در شهر کاشان (به ازای هر کیلووات نصب شده)

Fig. 6- Normalized energy production in Kashan (per kWp installed)



شکل ۷- نسبت عملکرد سایت در شهر کاشان

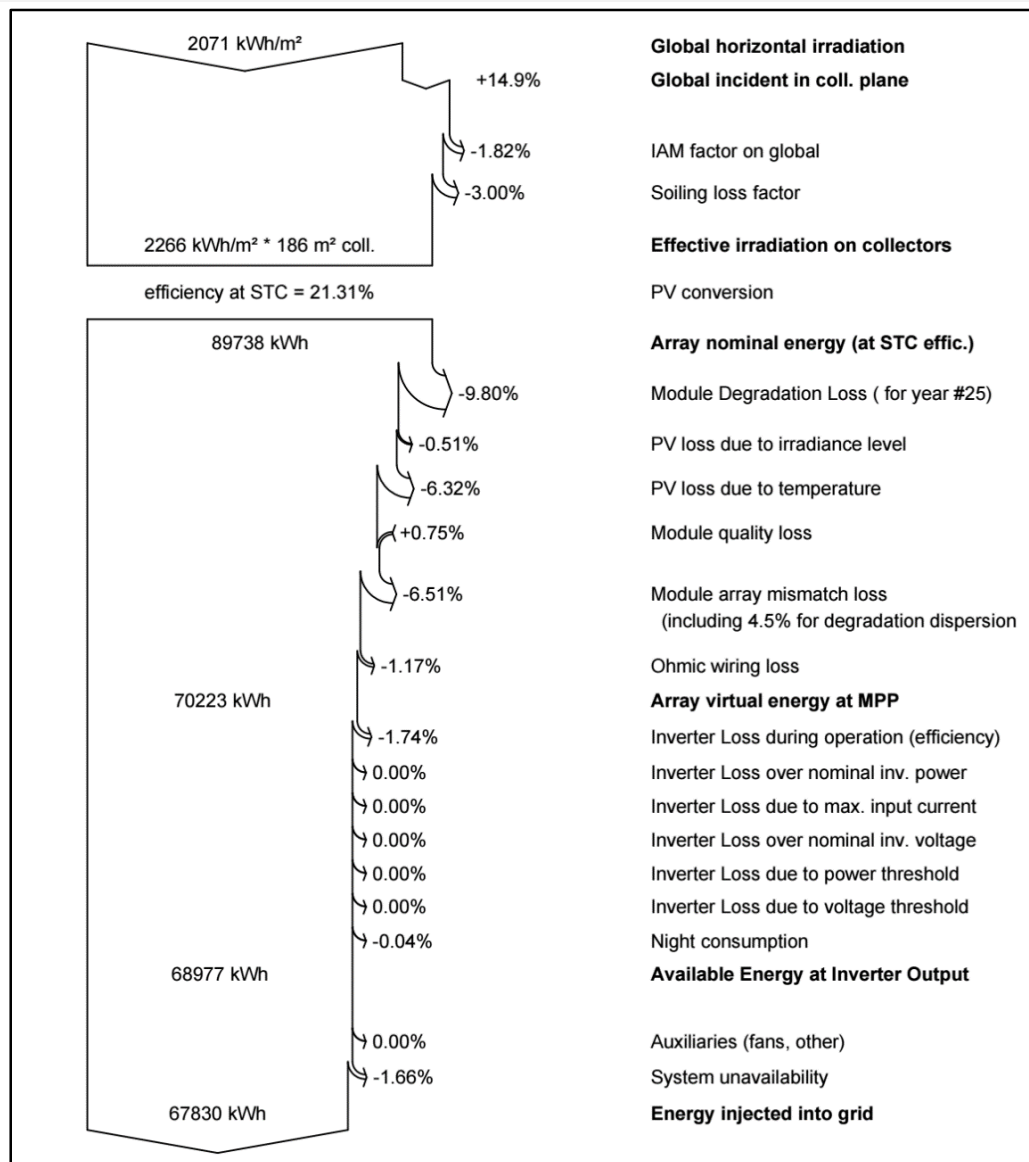
Fig. 7- Performance ratio of the PV system in Kashan

نسبی ناشی از بار ثابت کوچک‌تر است، در نتیجه تلفات دمایی و آلودگی به طور نسبی سهم بیشتری یافته‌اند و باعث تغییر رفتار الگو شده‌اند. با استفاده از رابطه ۱:

$$PR = (E_{usable} / E_{ref}) \times 100\% \quad (1)$$

در صورت افزایش انرژی مرجع (E_{ref}) حساسیت بار ثابت، کاهش می‌یابد و سهم دیگر تلفات بیشتر جلوه می‌کند.

سایت طراحی شده در کاشان با وجود تلفات دمایی بالاتر (۶/۳۲ درصد) به دلیل دمای بالاتر (تا ۳۴/۳۰ درجه سلسیوس) و تلفات آلودگی (۵ درصد) ناشی از محیط گردوغباری، از ارومیه بهتر است (شکل ۸). تلفات تجهیزات جانبی با وجود بار ۵ کیلوواتی مشابه، به دلیل تولید انرژی بیشتر درصد کمتری را تشکیل می‌دهد. در شکل ۳ (ارومیه) الگوی تلفات نسبتاً یکنواخت است زیرا تولید انرژی پایین‌تر است و بار ثابت ۵ کیلوواتی اثر غالب دارد. در شکل ۶ (کاشان) تولید بسیار بالاتر و تلفات



شکل ۸- نمودار تلفات در سایت کاشان

Fig. 8- Loss diagram of the PV system in Kashan

تحلیل تطبیقی؛ ارومیه و کاشان

درصد در مقابل ۴۹/۵۴ درصد) عمدتاً ناشی از تأثیر بیشتر بار ثابت ۵ کیلوواتی در ارومیه است که به دلیل تولید کمتر، ۲۹/۸۱ درصد از انرژی را مصرف می‌کند. این یافته کلیدی نشان می‌دهد که بارهای ثابت در مناطق با تابش کمتر اثرهای مخرب‌تری دارند و بهینه‌سازی بار (مانند انتقال مصارف به روز یا استفاده از ذخیره‌ساز) برای بهبود PR ضروری است. از نظر اقتصادی، کاشان با LCOE ۲۲/۶ درصد

کاشان با ۲۶ درصد تولید انرژی بیشتر (۵۵۷۹۳ در مقابل ۴۴۳۲۴ کیلووات‌ساعت) به دلیل ۲۳ درصد تابش افقی بالاتر (۲۳۲۷ در مقابل ۱۹۷۶ کیلووات‌ساعت/مترمربع در سال) و ۲۸ درصد تابش برخوردی بالاتر (۲۷۷۴ در مقابل ۲۱۷۶ کیلووات‌ساعت/مترمربع در سال) نسبت به ارومیه عملکرد بهتری دارد. اختلاف PR در شکل ۷ (۷۲)

قابل توجه است. با این حال، کاشان همچنان به دلیل پتانسیل تابشی بالاتر عملکرد بهتری خواهد داشت، اما اختلاف نسبی بازدهی بین دو سایت کاهش می‌یابد. افزایش تعداد پنل‌ها یا ظرفیت نصب‌شده موجب افزایش انرژی تولیدی کل می‌شود، اما لزوماً راندمان یا نسبت عملکرد سیستم را بهبود نمی‌بخشد. در واقع، اگر ظرفیت اینورتر ثابت بماند، افزایش بیش از حد پنل‌ها می‌تواند به دلیل پدیده‌ای به نام clipping (که در آن اینورتر توان مازاد را هدر می‌دهد)، باعث کاهش جزئی راندمان شود. بنابراین، صرفاً افزایش تعداد پنل‌ها، اختلاف راندمان اقلیمی بین دو سایت را تغییر نمی‌دهد و کاشان همچنان برتر خواهد بود.

پس‌این‌تر (۲،۰۸۹،۴۵۴ در مقابل ۲،۶۹۸،۸۱۸ ریال/کیلووات‌ساعت)، دوره بازگشت سرمایه کوتاه‌تر و IRR بالاتر (۹۳/۱۵ درصد در مقابل ۷۱/۹۹ درصد) برتری دارد (جدول ۲). تحلیل حساسیت نشان می‌دهد که فرض تورم ۴۰ درصد تأثیر زیادی بر نتایج اقتصادی دارد. استفاده از ردیاب خورشیدی (Solar Tracker)، میزان تولید انرژی ویژه (کیلووات‌ساعت/کیلووات‌پیک) را برای هر دو سایت به طور قابل توجهی (۱۵ تا ۲۵ درصد) افزایش می‌دهد. این کار باعث افزایش درآمد و کاهش دوره بازگشت سرمایه در هر دو منطقه می‌شود. اگرچه هزینه اولیه سیستم با افزایش تعداد پنل‌ها بیشتر می‌شود، اما این افزایش با توجه به رشد تولید انرژی

جدول ۲- مقایسه شاخص‌های کلیدی سیستم‌ها در ارومیه و کاشان

Table 2. Comparison of Key Performance Indicators of the Systems in Urmia and Kashan

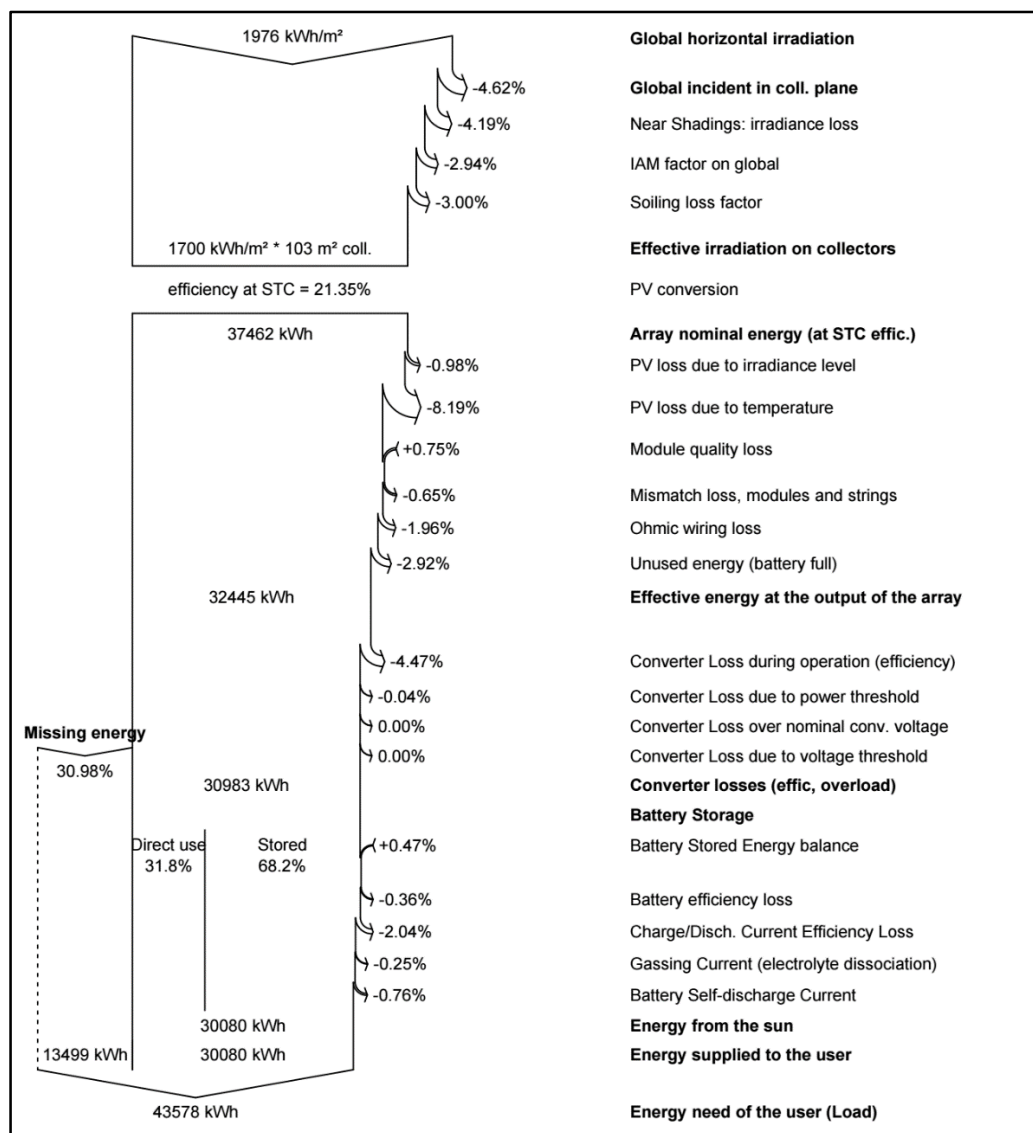
پارامتر Parameter	ارومیه (Urmia)	کاشان (Kashan)
تابش افقی Global Horizontal Irradiance (kWh/m ² /year)	1976	2327
تابش برخوردی Global Incident Irradiance (kWh/m ² /year)	2176	2774
بازده انرژی Annual Energy Yield (kWh/year)	44324	55793
بازده ویژه Specific Yield (kWh/kWp/year)	1119	1409
نسبت Performance Ratio PR (%)	49.54	72
هزینه تراز شده انرژی (ریال به کیلووات ساعت) LCOE (IRR/kWh)	2698818	2089454
دوره بازگشت (سال) Payback Period (years)	3	3
نرخ بازده داخلی (درصد) Internal Rate of Return (IRR %)	71.99	93.15

نیاز ۴۳۵۷۸ کیلووات‌ساعتی را تأمین می‌کند و ۳۱ درصد کمبود دارد (شکل ۹). تلفات شامل ناکارآمدی باتری (۲/۰۴ درصد شارژ/دشارژ، ۷۶ درصد

عملکرد سیستم منفصل از شبکه در ارومیه سیستم منفصل از شبکه در ارومیه ۳۰۰۸۰ کیلووات ساعت در سال تولید می‌کند، که تنها ۶۹ درصد از

راندمان پایین، غیراقتصادی است. کمبود انرژی آن را برای گلخانه‌های نیازمند تأمین مداوم نامناسب می‌کند، اما در مناطق بدون شبکه ممکن است توجیه‌پذیر باشد.

خودتخلیه)، انرژی استفاده نشده (۲/۹۲ درصد) در ماه‌های پرتابش به دلیل باتری‌های پر، و تلفات دمایی (۸/۱۹ درصد) است (شکل ۹). این سیستم با LCOE بالا، به دلیل هزینه‌های سنگین باتری و



شکل ۹- نمودار تلفات در سیستم مستقل از شبکه شهر ارومیه

Fig. 9- Loss diagram of the off-grid system in Urmia

گلخانه‌های فتوولتائیک است. PR پایین‌تر ارومیه ناشی از تأثیر نسبی بیشتر بار ثابت ۵ کیلوواتی بر تولید کمتر است، که نشان‌دهنده اهمیت بهینه‌سازی بار در مناطق کم‌تابش است. این یافته کلیدی است

کاشان به دلیل داشتن پتانسیل تابشی بالاتر (۲۳ درصد GHI و ۲۸ درصد GII بیشتر)، تولید انرژی ۲۶ درصد بیشتر و PR بهتر (۷۲ درصد در مقابل ۴۹/۵۴ درصد)، گزینه‌ای ایده‌آل برای

برای طراحی سیستم‌های فتوولتائیک در کشاورزی پایدار زیرا بارهای ثابت می‌توانند راندمان را به شدت کاهش دهند. از نظر اقتصادی، کاشان با LCOE پایین‌تر، دوره بازگشت کوتاه‌تر، و IRR بالاتر برتری مطلق دارد که مستقیماً از تولید انرژی بالاتر ناشی می‌شود. سیستم منفصل از شبکه به دلیل کمبود ۳۱ درصد انرژی و LCOE بالا، تنها در مناطق بدون شبکه توجیه‌پذیر است. پیشنهادها شامل: (۱) کاهش بارهای ثابت گلخانه با تجهیزات کم‌مصرف، (۲) استفاده از باتری‌های پیشرفته‌تر برای کاهش تلفات، (۳) تحلیل حساسیت اقتصادی (مانند میزان تورم و تعرفه‌های برق)، (۴) بررسی دقیق‌تر بارهای جانبی برای شفاف‌سازی تأثیرات بر PR است، (۵) استفاده از سیستم‌های هیبریدی، این سیستم‌ها دارای باتری برای زمان قطعی برق هستند اما در حالت عادی به شبکه متصل‌اند تا بتوانند برق مازاد را بفروشند و در صورت نیاز از شبکه برق دریافت کنند. این رویکرد پیشنهادی است کلیدی برای تحقیقات آتی زیرا هم اطمینان سیستم منفصل و هم مزایای اقتصادی سیستم متصل به شبکه را فراهم می‌کند. این نتایج بر پتانسیل انرژی خورشیدی در کشاورزی پایدار ایران، به ویژه در مناطقی مانند کاشان، تأکید دارند.

نتیجه‌گیری

در این پژوهش، عملکرد فنی و اقتصادی سیستم‌های فتوولتائیک متصل و منفصل از شبکه برای تأمین انرژی یک گلخانه با پروفایل مصرف مشخص در دو اقلیم متفاوت ایران (کاشان و ارومیه) ارزیابی شد. بر اساس تحلیل بار الکتریکی در نرم‌افزار PVsyst، نیاز روزانه انرژی گلخانه در فصل زمستان ۱۲۹/۴ کیلووات‌ساعت تعیین گردید که عمده‌تأ شامل

بارهای روشنایی (۱۲۰ لامپ)، پمپ‌ها، هیت‌ر، فن‌ها و تجهیزات کنترلی بود. نتایج تحلیل به وضوح نشان داد که شرایط اقلیمی و پتانسیل تابشی، نقشی کلیدی در عملکرد و توجیه‌پذیری سیستم‌ها دارند. سایت کاشان به دلیل دریافت تابش خورشیدی بالاتر، نه تنها تولید انرژی بیشتری داشت، بلکه از منظر اقتصادی نیز بازدهی بهتری ارائه داد. یکی از یافته‌های مهم این پژوهش، تأثیر چشمگیر بارهای ثابت و شبانه‌روزی (مانند پمپ‌ها و کنترلرها) بر نسبت عملکرد سیستم بود. این تلفات ثابت در سایت ارومیه که تابش کمتری دریافت می‌کرد اثر منفی شدیدتری داشت و بخش قابل‌توجهی از انرژی تولیدی را هدر می‌داد، که این امر اهمیت مدیریت هوشمندانه مصرف را در مناطق کم‌تابش برجسته می‌سازد. مقایسه دو سناریو نشان داد که سیستم متصل به شبکه برتری فنی و اقتصادی قاطعی دارد. این سیستم با قابلیت تزریق انرژی مازاد به شبکه در روزهای آفتابی و تأمین کمبود انرژی در شرایط نامساعد، پایداری و سودآوری طرح را تضمین می‌کند. در مقابل، سیستم منفصل از شبکه برای تأمین بار نیازمند سرمایه‌گذاری سنگین برای بانک باتری و تجهیزات ذخیره‌سازی است که علاوه بر هزینه بالا، با ریسک کمبود انرژی در روزهای ابری متوالی مواجه است و کارایی عملیاتی پایینی دارد. این تحقیق تأکید می‌کند که طراحی سیستم خورشیدی موفق برای کاربردهای کشاورزی مستلزم تحلیل دقیق پروفایل مصرف انرژی گلخانه و انتخاب سیستم متناسب با شرایط اقلیمی و اقتصادی منطقه است. نتایج حاضر نشان می‌دهد که راهکار متصل به شبکه، گزینه‌ای پایدار و اقتصادی‌تر برای توسعه کشاورزی خورشیدی در ایران محسوب می‌شود.

تعارض منافع

نویسندگان در خصوص انتشار مقاله ارائه شده به طور کامل از سوء اخلاق نشر، از جمله سرقت ادبی، سوء رفتار، جعل داده‌ها و یا ارسال و انتشار دوگانه، پرهیز نموده‌اند و منافعی تجاری در این راستا وجود ندارد.

مراجع

- Ali Abaker Omer, A., Li, M., Zhang, F., El Kolaly, W., Zhang, X., Saad, A., & Liu, W. (2025). Enhancing cultivation environment and increasing productivity in greenhouse rooftop with novel spectrum-splitting technology. *Heliyon*, 11(13), e43740. doi:<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2025.e43740>.
- Gorjian, S., Ebadi, H., Najafi, G., Singh Chandel, S., & Yildizhan, H. (2021). Recent advances in net-zero energy greenhouses and adapted thermal energy storage systems. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 43, 100940. doi:<https://doi.org/10.1016/j.seta.2020.100940>.
- Lepley, K., Fields, H., Choi, C. S., Hickey, T., Towner, B., Staie, B., McCall, J., Chamberland, J., & Macknick, J. (2025). Comprehensive evaluation of agrivoltaics research: Breadth, depth, and insights for future research. *Energies*, 18(17), 4776. <https://doi.org/10.3390/en18174776>.
- Masriadi, M., Fauziah, L., Rasyid, G., & Parandy, L. M. (2024). Addressing the global food security crisis and energy shortages: innovative solutions and policy interventions for sustainable development. *International Journal of Science and Society*. <http://doi.org/10.54783/ijssoc.v6i1.1060>.
- Mazzeo, D., Di Zio, A., Pesenti, C., & Leva, S. (2025). Optimizing agrivoltaic systems: A comprehensive analysis of design, crop productivity and energy performance in open-field configurations. *Applied Energy*, 390, 125750. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125750>.
- Soussi, A., Zero, E., Ouammi, A., Zejli, D., Zahmoun, S., & Sacile, R. (2025). Smart greenhouse farming: A review towards near zero energy consumption. *Discover Cities*, 2. doi:10.1007/s44327-025-00096-w
- Zahrawi, A., & Aly, A. (2024). A Review of agrivoltaic sstems: Addressing challenges and enhancing sustainability. *Sustainability*, 16(18), 8271. <https://doi.org/10.3390/su16188271>.

Original Paper

Comparative Techno-Economic Analysis of On-Grid and Off-Grid Photovoltaic Systems for Greenhouse Energy Supply in Different Climates of Iran (Case Studies: Urmia and Kashan)

N. Tabrizi* and M. Moravej

*Corresponding Author: Agricultural Engineering Research Department, West Azerbaijan Agricultural and Natural Resources Research and Education Center, AREEO, Urmia, Iran. Email: narin.tabrizii@gmail.com.
<https://orcid.org/0000-0002-8544-9741>

Received: 21 June 2025, Accepted: 6 December 2025

<https://doi.org/10.22092/amsr.2025.369845.1519>

Abstract

This study comprehensively evaluates the technical and economic performance of grid-connected pvsyst in Urmia and Kashan, comparing them with an off-grid system in pvsyst. The results indicate that the grid-connected system in Kashan, benefiting from higher solar irradiation, achieves superior performance compared to Urmia. High energy consumption by auxiliary equipment, particularly a constant 5 kW nighttime load, was a major challenge for both systems, with a more pronounced impact in Urmia due to lower energy production. Thermal losses and long-term module efficiency degradation also affected performance. Economically, grid-connected systems demonstrate high investment attractiveness, with a payback period of 3 years, an internal rate of return of 71.99%, and a levelized cost of energy (LCOE) of approximately 2,700 IRR/kWh, assuming accurate input data. These systems also offer significant environmental benefits by reducing greenhouse gas emissions. Conversely, the off-grid system faced a 31% energy shortage, compromising its reliability for critical applications, with energy wastage during battery saturation periods indicating suboptimal capacity design. The off-grid system's LCOE is substantially higher due to high initial battery costs, periodic replacement expenses, and lower efficiency. The analysis confirms that grid-connected systems, when supported by reliable grid infrastructure, provide superior technical and economic performance compared to off-grid systems, which are primarily viable in remote areas without grid access. However, the sustainability and economic viability of grid-connected systems heavily depend on supportive policies and stable regulatory frameworks.

Keywords: Greenhouse, Grid-Connected, Off-Grid Connection, Module, Pvsyst



© 2024 Agricultural Mechanization and Systems Research, Karaj, Iran. This is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0 license)