

Design and Performance Evaluation of a Photovoltaic Solar Water Pumping System with Comparative Assessment of Different Motor–Pump Technologies

Koosha Emami¹ ; SeyedMohammad Mahdi Moosavi^{2*}

1. Division of Energy Systems Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

*2. Department of Electrical and Computer Engineering, Hamedan University of Technology, Hamedan, Iran

*Email Address: moosavi@hut.ac.ir

Article Info	ABSTRACT
Article Type: Research Paper	<p>The increasing water demand in agriculture and the limited access to electrical grids in remote areas have intensified the adoption of photovoltaic solar water pumping systems as a sustainable and off-grid solution. The performance of these systems is highly dependent on the design of key components, particularly the motor–pump unit, the photovoltaic array configuration, and local climatic conditions. In this study, a systematic approach based on theoretical analysis and detailed simulation is employed to assess the technical and economic performance of a solar photovoltaic water pumping system. Four different motor–pump technologies—brushless DC (BLDC), three-phase induction, conventional DC, and permanent magnet DC (PMDC)—are evaluated under identical climatic and hydraulic conditions. A real system located in Razan County, Hamedan Province, Iran, is selected as the case study. Simulations are carried out using PVsyst software with meteorological data extracted from the Meteonorm database. The results demonstrate that the BLDC-based system achieves the highest performance ratio, pumps the largest annual water volume, and exhibits the lowest energy losses and water deficit among the investigated scenarios. Furthermore, the economic analysis reveals that while the system is not financially viable under current local water prices in Iran, it becomes economically attractive when global water price benchmarks are considered. The findings highlight the critical role of motor–pump technology selection in improving energy efficiency, operational stability, and long-term feasibility of photovoltaic water pumping systems.</p>
Article History:	
Received Date: 2025/12/19	
Revised Date: 2026/02/12	
Accepted Date: 2026/06/27	
Published Date: 2026/06/28	
Keywords: Photovoltaic solar water pumping, Motor–pump technologies, BLDC motor, Performance ratio, PVsyst simulation, Techno-economic analysis.	

Cite this article: Koosha Emami ,SeyedMohammad Mahdi Moosavi (2026) Design and Performance Evaluation of a Photovoltaic Solar Water Pumping System with Comparative Assessment of Different Motor–Pump Technologies , Journal of Environmental Sciences Studies , 11(1) , Pages 11028-11042.

EXTENDED ABSTRACT

Introduction

Growing agricultural water demand and increasing limitations of conventional energy resources have intensified the need for sustainable water supply solutions. In many rural and remote areas, access to electrical grids remains limited or economically impractical, while diesel-powered pumping systems are still widely used despite high operating costs, maintenance requirements, and environmental impacts. Photovoltaic (PV) solar water pumping systems provide an effective alternative by directly converting solar energy into mechanical energy for water extraction and irrigation, offering low operating costs, reduced emissions, and reliable long-term operation. Iran, especially provinces such as Hamedan, possesses considerable solar energy potential while agriculture depends heavily on groundwater pumping. Unlike grid-connected pumps operating under stable electrical supply, PV-driven systems must function under continuously varying input power caused by fluctuations in solar irradiance and ambient temperature. Motor–pump selection therefore becomes a critical design parameter affecting efficiency, reliability, and water delivery. Although many studies have investigated photovoltaic water pumping systems, most focus on a single motor technology or use simplified assumptions, limiting direct comparison. This study presents a comparative evaluation of a photovoltaic solar water pumping system using four motor–pump technologies. A real deep-well pumping system located in Razan County, Hamedan Province, Iran, is selected as the case study. The objective is to determine the configuration that achieves higher energy efficiency, stable operation, and improved water delivery while assessing economic feasibility under different water pricing scenarios.

Materials and Methods

A combined analytical and simulation-based approach is adopted. Hydraulic power demand is calculated using flow rate, total dynamic head, and water properties while accounting for pipeline losses. Pump and motor power ratings are determined using efficiency-based relationships to ensure proper matching between hydraulic demand and electrical supply. The photovoltaic array is sized to meet system energy requirements while considering system losses and seasonal solar radiation variations. To ensure fair comparison, all scenarios employ the same PV array capacity, and only the motor–pump technology is varied. Motor efficiency characteristics and operational behavior under variable input power are incorporated into the model. Simulations are performed using PVsyst software, which models PV module performance, system losses, and load operation. Four independent simulations corresponding to BLDC, induction, brushed DC, and PMDC motor configurations are conducted under identical climatic and hydraulic conditions.

Results and Discussion

Results show that motor–pump technology significantly influences photovoltaic water pumping performance. Among the evaluated configurations, the BLDC motor–pump system achieves the highest technical performance. This configuration exhibits the greatest Performance Ratio, indicating more efficient utilization of available solar energy. High efficiency and a wide operating speed range allow stable operation under fluctuating solar conditions, resulting in consistent water delivery throughout the year. The BLDC system also produces the highest annual pumped water volume and closely satisfies irrigation demand, while unused photovoltaic energy is minimized, demonstrating improved matching between energy generation and hydraulic load.

Conclusion

The study confirms that motor–pump selection is a key factor affecting both technical and economic performance of photovoltaic solar water pumping systems. Among the evaluated technologies, BLDC motor–pump configurations provide superior energy efficiency, maximum water delivery, and improved operational stability under variable solar conditions. Although economic feasibility depends strongly on regional water pricing, the technical advantages demonstrated support the adoption of BLDC-based photovoltaic pumping systems as a sustainable solution for agricultural water supply in solar-rich off-grid regions.



طراحی و ارزیابی عملکرد سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک با رویکرد مقایسه

فناوری‌های مختلف موتور-پمپ

کوشا امامی^۱، سیدمحمد مهدی موسوی^{۲*}

۱- دانشجوی دکتری مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

۲- استادیار، گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه صنعتی همدان، همدان، ایران

* ایمیل نویسنده مسئول: moosavi@hut.ac.ir

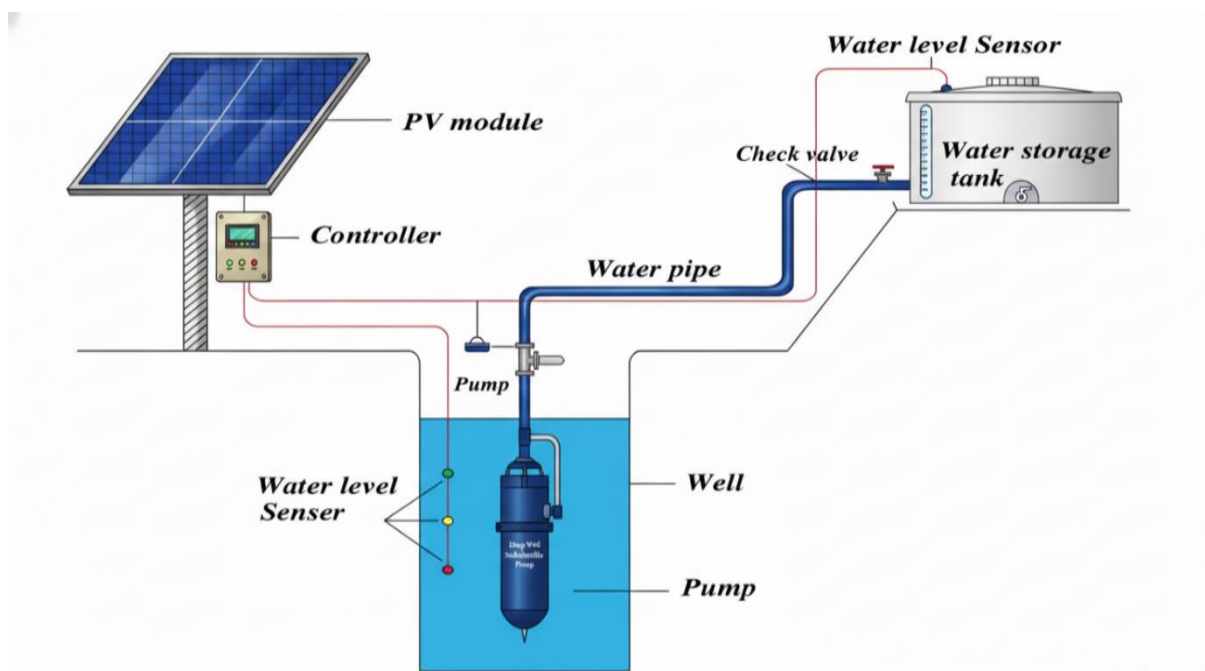
چکیده	اطلاعات مقاله
افزایش تقاضای آب در بخش کشاورزی و محدودیت دسترسی به شبکه برق، موجب توجه روزافزون به سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک به‌عنوان یک راهکار پایدار و مستقل از شبکه شده است. عملکرد این سیستم‌ها به‌طور مستقیم تحت تأثیر طراحی اجزای اصلی، به‌ویژه نوع موتور-پمپ، آرایش سامانه فتوولتائیک و شرایط اقلیمی محل نصب قرار دارد. در این پژوهش، یک چارچوب جامع برای تحلیل نظری، شبیه‌سازی و ارزیابی عملکرد یک سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک ارائه شده است که شامل محاسبه توان هیدرولیکی، تعیین اندازه آرایه فتوولتائیک، انتخاب موتور-پمپ و ارزیابی بازده کلی سیستم می‌باشد. چهار سناریوی مختلف با تفاوت در نوع موتور الکتریکی و پیکربندی پمپ‌ها شامل موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC)، موتور آسنکرون سه‌فاز، موتور جریان مستقیم معمولی و موتور جریان مستقیم آهنربای دائم (PMDC) مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. شبیه‌سازی‌ها با استفاده از نرم‌افزار PVSyst و بر اساس داده‌های واقعی اقلیمی و مشخصات منبع آب در استان همدان (شهرستان رزن) انجام شده است. نتایج نشان می‌دهد که سناریوی مبتنی بر موتور BLDC بالاترین نسبت عملکرد (PR)، بیشترین حجم آب پمپاژ شده و کمترین میزان آب از دست‌رفته را در میان سناریوهای بررسی شده ارائه می‌دهد. تطابق بهتر این فناوری با توان متغیر تولیدی آرایه فتوولتائیک، کاهش تلفات الکتریکی و پایداری عملکرد در شرایط تابش متوسط و پایین، از عوامل اصلی برتری این سناریو محسوب می‌شوند. تحلیل اقتصادی نشان می‌دهد که در شرایط قیمت واقعی آب در ایران، سیستم فاقد توجیه اقتصادی است، در حالی که با در نظر گرفتن قیمت‌های جهانی آب، پروژه از نظر اقتصادی سودآور بوده و دوره بازگشت سرمایه کوتاهی را نشان می‌دهد. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که انتخاب صحیح فناوری موتور-پمپ نقش کلیدی در بهبود عملکرد انرژی، پایداری بهره‌برداری و توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی دارد.	<p>نوع مقاله: مقاله علمی پژوهشی</p> <p>تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۰۹/۲۸</p> <p>تاریخ بازنگری: ۱۴۰۴/۱۱/۲۳</p> <p>تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۰۶</p> <p>تاریخ انتشار: ۱۴۰۵/۰۴/۰۷</p> <p>کلید واژه‌ها: پمپاژ آب خورشیدی، فتوولتائیک، فناوری‌های موتور-پمپ، موتور بدون جاروبک، نسبت عملکرد، تحلیل فنی-اقتصاد.</p>

کمیون دسترسی پایدار به منابع آب و انرژی، به‌ویژه در مناطق روستایی و دور از شبکه، یکی از چالش‌های اساسی توسعه کشاورزی، آبرسانی و امنیت غذایی در سطح جهانی محسوب می‌شود. در بسیاری از این مناطق، سیستم‌های پمپاژ آب متداول عمدتاً به الکتریسیته شبکه یا سوخت‌های فسیلی نظیر دیزل وابسته‌اند که با مشکلاتی همچون هزینه‌های بالای سوخت، دشواری تأمین، نیاز به تعمیر و نگهداری مکرر و اثرات زیست‌محیطی منفی همراه هستند (Chandel, Naik et al. 2015, Aliyu, Hassan et al. 2018). این محدودیت‌ها، همراه با نگرانی‌های فزاینده درباره تغییرات اقلیمی و انتشار گازهای گلخانه‌ای، موجب شده است که استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تأمین انرژی سیستم‌های پمپاژ آب به‌عنوان یک راهکار جایگزین پایدار مورد توجه گسترده پژوهشگران و سیاست‌گذاران قرار گیرد (Campana, Papic et al. 2022). در میان گزینه‌های انرژی تجدیدپذیر، سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک (PVWPS) به دلیل تطابق ذاتی الگوی تولید انرژی خورشیدی با تقاضای آبی، سهم غالبی در کاربردهای آبیاری، تأمین آب شرب روستایی، دامداری و احیای منابع طبیعی پیدا کرده‌اند (Periasamy, Jain et al. 2015, Campana, Papic et al. 2022). بیشترین نیاز آبی معمولاً در دوره‌هایی از سال رخ می‌دهد که شدت تابش خورشیدی نیز در بالاترین سطح قرار دارد، امری که منجر به هم‌افزایی طبیعی میان عرضه و تقاضا در این سیستم‌ها می‌شود. علاوه بر این، کاهش قابل توجه قیمت ماژول‌های فتوولتاییک طی دهه‌های اخیر، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری بسیار پایین و عدم نیاز به سوخت، موجب شده است که PVWPS ها نه تنها در مناطق فاقد شبکه، بلکه در برخی کاربردهای متصل به شبکه و سامانه‌های هیبریدی نیز از توجیه فنی و اقتصادی برخوردار باشند (Mirahmad and Parvaresh Rizi 2025). ایران به‌ویژه در استان‌های مرکزی و غربی، از پتانسیل قابل توجهی برای بهره‌برداری از انرژی خورشیدی برخوردار است و میانگین تابش خورشیدی روزانه به ۵/۵ کیلووات ساعت بر مترمربع گزارش شده است. استان همدان به دلیل برخورداری از شرایط تابشی مناسب (میانگین تابش روزانه در بعضی روزها به ۷/۶ کیلووات ساعت بر مترمربع هم می‌رسد)، ظرفیت مطلوبی برای توسعه سامانه‌های فتوولتاییک و کاربردهای وابسته به آن دارند (Shiravi and Firoozzadeh 2019). از سوی دیگر، فشار مصرف آب و انرژی در بخش کشاورزی، به‌ویژه در گلخانه‌ها و سامانه‌های آبیاری، وابستگی قابل توجهی به سوخت‌های فسیلی ایجاد کرده و هزینه‌های عملیاتی چشمگیری را به بهره‌برداران تحمیل می‌کند. در چنین شرایطی، پمپاژ آب خورشیدی می‌تواند راهکاری پایدار برای کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و محدودسازی پیامدهای اقتصادی و زیست‌محیطی باشد؛ نکته‌ای که مطالعات اقتصادی اخیر در دشت قزوین و سایر مناطق ایران نیز بر آن تأکید کرده‌اند (Mirahmad and Parvaresh Rizi 2025). از منظر ساختاری، یک سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک معمولاً از آرایه فتوولتاییک، واحد تنظیم توان شامل مبدل‌های DC-DC یا اینورتر DC-AC، موتور الکتریکی، پمپ آب و سامانه ذخیره، عمدتاً به‌صورت مخزن آب، تشکیل می‌شود (Aliyu, Hassan et al. 2018, Campana, Papic et al. 2022). عملکرد این سیستم‌ها به‌شدت تابع برهم‌کنش میان اجزای الکتریکی و هیدرولیکی، شرایط اقلیمی محل نصب و استراتژی‌های کنترلی به‌کاررفته است. پژوهش‌های مروری اخیر نشان می‌دهند که اگرچه اصول کلی طراحی PVWPS ها به‌خوبی شناخته شده است، اما انتخاب نادرست اجزای کلیدی، به‌ویژه موتور و پمپ، می‌تواند منجر به افت بازده، ناپایداری عملکرد و کاهش توجیه‌پذیری اقتصادی سیستم شود (Saady 2024). ساینینگ و بهینه‌سازی سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک در مطالعات پیشین عمدتاً به‌عنوان یک مسئله چندپارامتری معرفی شده است که مستلزم در نظر گرفتن هم‌زمان منابع انرژی خورشیدی، نیاز آبی، شرایط هیدرولیکی سامانه و شاخص‌های اقتصادی است (Bouzidi 2013, Campana, Li et al. 2013, Sharma, Sharma et al. 2020, Ahmed and Demirci 2022, Elnozahy, Abdel-Salam et al. 2024). در این چارچوب، ظرفیت آرایه فتوولتاییک، توان موتور-پمپ و حجم مخزن ذخیره آب به‌عنوان متغیرهای طراحی وابسته به یکدیگر تلقی شده‌اند و نشان داده شده است که طراحی جداگانه اجزا می‌تواند به کاهش قابلیت اطمینان یا افزایش هزینه‌های سرمایه‌گذاری و بهره‌برداری منجر شود (Bouzidi 2013, Ahmed and Demirci 2022). در اغلب مطالعات، قابلیت اطمینان تأمین آب به‌عنوان معیار محوری طراحی معرفی شده و با استفاده از شاخص‌های احتمالاتی نظیر احتمال عدم تأمین بار (LLP)، احتمال عدم تأمین توان (LPSP) یا احتمال عدم تأمین آب (LWSP) کمی‌سازی گردیده است (Bouzidi 2013, Ahmed and Demirci 2022, Elnozahy, Abdel-Salam et al. 2024). این شاخص‌ها چارچوبی کمی برای ارزیابی احتمال عدم تأمین نیاز آبی فراهم کرده‌اند و به‌طور گسترده به‌عنوان مبنای ایجاد مصالحه میان هزینه کل سیستم و سطح اطمینان عملکرد به‌کار رفته‌اند. نتایج نشان می‌دهد که افزایش سطح اطمینان همواره مستلزم افزایش ظرفیت نصب‌شده یا ذخیره‌سازی است که در صورت نبود طراحی بهینه، می‌تواند به رشد غیرضروری هزینه‌ها منجر شود. با وجود پیشرفت‌های حاصل‌شده، محدودیت‌های مشترکی همچنان در بسیاری از مطالعات دیده می‌شود. بخش قابل توجهی از پژوهش‌ها به داده‌های اقلیمی متوسط یا فرضیات ساده‌شده درباره هد و سطح آب زیرزمینی متکی هستند که این امر می‌تواند دقت نتایج را در شرایط واقعی کاهش دهد (Nasir 2019, Mahmoud, Ashraf et al. 2019).

al. 2024). در همین راستا، پژوهش‌های مبتنی بر مدل‌سازی و اعتبارسنجی دینامیکی موتور-پمپ نشان داده‌اند که رفتار دینامیکی مجموعه موتور-پمپ و نحوه کوپل شدن آن با آرایه فتوولتاییک، نقش تعیین‌کننده‌ای در نقطه کار سیستم، بازده کلی و حجم آب پمپاژ شده ایفا می‌کند (Singh and Kumar 2016). این ملاحظات به‌ندرت در چارچوب‌های جامع سایزینگ و بهینه‌سازی چندهدفه ادغام شده‌اند (Sharma, Sharma et al. 2020, Kumar 2025). این شکاف پژوهشی به‌طور خاص در مقایسه فناوری‌های مختلف موتور-پمپ مشهود است. موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) به دلیل بازده بالا، دانسیته توان زیاد، نیاز اندک به تعمیر و نگهداری و عملکرد مناسب در بار جزئی، در بسیاری از مطالعات به‌عنوان گزینه‌ای کارآمد برای سامانه‌های پمپاژ خورشیدی معرفی شده‌اند (Kumar and Singh 2016, Kumar and Singh 2017). در عین حال، موتورهای آسنکرون سه‌فاز، موتورهای جریان مستقیم معمولی و موتورهای جریان مستقیم آهنربای دائم (PMDC) همچنان به‌طور گسترده در کاربردهای عملی استفاده می‌شوند و هر یک از منظر بازده، سادگی، هزینه و سازگاری با منبع PV مزایا و محدودیت‌های خاص خود را دارند (Periasamy, Jain et al. 2015, Djoudi and Gherbi, Hadj Arab et al. 2017). با این حال، بیشتر پژوهش‌های موجود یا بر یک فناوری خاص تمرکز داشته‌اند یا مقایسه‌هایی محدود و غیرسیستماتیک ارائه کرده‌اند، بدون آنکه این مقایسه در قالب یک چارچوب یکپارچه شامل سایزینگ، عملکرد انرژی و شرایط واقعی بهره‌برداری انجام شود. بر این اساس، مقایسه نظام‌مند فناوری‌های مختلف موتور-پمپ در سامانه‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک همچنان یک نیاز پژوهشی اساسی به‌شمار می‌رود. مقاله حاضر با تمرکز بر این خلأ، به مقایسه عملکرد پمپ‌های مبتنی بر موتورهای BLDC، آسنکرون سه‌فاز، جریان مستقیم معمولی و PMDC در چارچوبی یکپارچه می‌پردازد تا نقش انتخاب فناوری موتور-پمپ در عملکرد کلی و کارایی سامانه به‌طور شفاف تبیین شود. در ادامه این مقاله، ابتدا مبانی نظری سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک تشریح می‌شود. سپس مشخصات اقلیمی، هیدرولیکی و فنی سیستم مورد مطالعه در استان همدان ارائه شده و نحوه پیاده‌سازی شبیه‌سازی‌ها در نرم‌افزار PVsyst توضیح داده می‌شود. نتایج شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد انرژی، ساختار تلفات، نسبت عملکرد و میزان آب پمپاژ شده برای سناریوهای مختلف موتور-پمپ در بخش نتایج و بحث مورد بررسی و مقایسه قرار می‌گیرد. در نهایت، ارزیابی اقتصادی سیستم انجام شده و مهم‌ترین یافته‌ها و پیامدهای کاربردی آن‌ها برای طراحی و بهره‌برداری سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک در بخش نتیجه‌گیری جمع‌بندی می‌شود.

۲- روش تحلیل و مدل‌سازی سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتاییک

تحلیل نظری سیستم پمپاژ آب فتوولتاییک خورشیدی (PVWPS) (شکل ۱) شامل محاسبه توان هیدرولیکی، تعیین اندازه آرایه فتوولتاییک (PV)، تعیین اندازه موتور و محاسبه راندمان سیستم است.



شکل ۱ سیستم پمپاژ آب خورشیدی

• محاسبات توان هیدرولیک مورد نیاز

توان هیدرولیکی مورد نیاز پمپ از رابطه زیر بدست می آید.

$$P_H(KW) = \frac{\rho \times g \times Q \times H}{3.6 \times 10^6} \quad (1)$$

ρ = چگالی آب در واحد کیلوگرم بر متر مکعب

G = شتاب گرانش زمین

Q = دبی آب پمپ متر مکعب بر ساعت

H = اندازه هد که مجموع هد استاتیک و تلفات اصطکاک است.

• سایزینگ موتور پمپ

برای تعیین توان موتور-پمپ از رابطه توان پمپ مبتنی بر بازده آن استفاده می شود.

$$\text{توان هیدرولیکی مورد نیاز پمپ} = \frac{\text{توان هیدرولیکی مورد نیاز پمپ}}{\text{بازده پمپ}} = \text{قدرت مورد نیاز موتور} \quad (2)$$

• اندازه‌ی آرایه‌های خورشیدی

با محاسبه میزان توان مورد نیاز برای پمپاژ آب مورد نظر مقدار توان تولیدی پنل های خورشیدی نیز محاسبه می گردد. با توجه به بازده سیستم خورشیدی این محاسبه انجام می شود.

$$\text{کل توان تولیدی آرایه‌ها} = \frac{\text{قدرت مورد نیاز موتور}}{\text{بازده سیستم}} \quad (3)$$

• محاسبه اندازه سیستم

برای تعیین اندازه سامانه‌ی خورشیدی، ابتدا باید توان ورودی (P_i) به پنل ها را محاسبه کرد. این توان در واقع مقدار انرژی خورشیدی است که بر سطح موثر سلول های فتوولتاییک تابیده می شود.

$$P_i = G_i \times A_m \quad (4)$$

G_i = میزان انرژی خورشید که در هر متر مربع از سطح زمین تابیده می شود.

A_m = مساحت موثر سلول، یعنی بخشی از سطح پنل که واقعا در جذب نور خورشید و تولید برق موثر است.

توان خروجی هر پنل به روش زیر محاسبه می گردد:

$$P_0 = V_{dc} \times I_{dc} \quad (5)$$

V_{dc} = ولتاژ DC خروجی

I_{dc} = جریان DC خروجی

تعداد ماژول های مورد نیاز نیز از روش زیر محاسبه می گردد:

$$\text{تعداد ماژول های مورد نیاز} = \frac{\text{توان خروجی مورد نیاز از آرایه‌ها}}{\text{توان یک واحد ماژول}} \quad (6)$$

• محاسبه بازده سیستم

بازده سیستم موتور-پمپ به صورت زیر داده می شود:

$$\eta_{ds} = \frac{P_H}{\text{توان الکتریکی ورودی}} \quad (7)$$

بازده آرایه خورشیدی نیز از روش زیر محاسبه می گردد:

$$\eta_P = \frac{\text{کل توان استفاده شده از آرایه}}{\text{ظرفیت آرایه فتوولتاییک}} \quad (8)$$

• نسبت عملکرد

نسبت عملکرد بر اساس رابطه زیر ارزیابی می‌گردد:

$$PR = \frac{Y_a}{Y_r} \quad (9)$$

نسبت عملکرد (PR) به‌عنوان یکی از شاخص‌های کلیدی ارزیابی سیستم‌های فتوولتاییک، از نسبت انرژی مفید خروجی سیستم Y_a به انرژی مرجع Y_r تعریف می‌شود. این شاخص بیانگر میزان تطابق عملکرد واقعی سیستم با عملکرد ایده‌آل آن تحت شرایط تابشی موجود است و اثر تلفات مختلف ناشی از اجزای سیستم، از جمله آرایه فتوولتاییک، واحد تبدیل انرژی و مجموعه موتور-پمپ را به‌صورت تجمیعی منعکس می‌کند. مقادیر بالاتر PR نشان‌دهنده کارایی بالاتر و بهره‌برداری مؤثرتر سیستم از انرژی خورشیدی در شرایط واقعی عملیاتی هستند. نرم افزار PVsyst بر اساس روابط فوق تحلیل دقیقی برای سیستم انجام خواهد داد. که البته در این مقاله سناریوهای مختلف موتور-پمپ مد نظر قرار خواهد گرفت.

۳- اطلاعات سیستم شبیه‌سازی شده

در این بخش، اطلاعات مکانی و ویژگی‌های منبع آب به‌عنوان داده‌های پایه در نرم‌افزار شبیه‌سازی وارد می‌شوند تا شرایط واقعی محل پروژه بازسازی گردد. این داده‌ها شامل موقعیت جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و مشخصات فیزیکی منبع آب هستند که نقش تعیین‌کننده‌ای در محاسبه هد کل پمپ و نیاز انرژی سیستم دارند. ورود دقیق این اطلاعات باعث می‌شود نرم‌افزار بتواند افت ارتفاع، فشار موردنیاز و ظرفیت پمپاژ را به‌درستی محاسبه کند. همچنین، این داده‌ها مبنای ارتباط بین طراحی سیستم فتوولتاییک و شرایط واقعی بهره‌برداری از پمپ در محل نصب خواهند بود. موقعیت مکانی سیستم پمپاژ خورشیدی مورد مطالعه در استان همدان، ایران، قرار دارد و مشخصات جغرافیایی، ارتفاع از سطح دریا و پارامترهای اصلی منبع آب آن در جدول ۱ ارائه شده است. این اطلاعات به‌عنوان ورودی‌های پایه برای تحلیل هیدرولیکی، تعیین هد کل پمپاژ و شبیه‌سازی عملکرد سیستم مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

جدول ۱ اطلاعات مربوط به موقعیت مکانی و منابع آب

نام محل نصب سیستم	رزن، همدان، ایران
عرض جغرافیایی	۳۴/۴۷ درجه
طول جغرافیایی	۴۸/۳۵ درجه
ارتفاع	۱۷۴۱ متر
نام سیستم منبع آب	پمپ شناور در چاه عمیق
کاربرد سیستم	آبیاری گلخانه
عمق سطح استاتیک	۵۰ متر
عمق پمپ	۶۰ متر
حداکثر عمق پمپاژ	۵۵ متر

همان‌طور که در جدول ۱ مشاهده می‌شود، سیستم پمپاژ آب از نوع پمپ شناور چاه عمیق است که برای آبیاری گلخانه‌ای به‌کار گرفته شده است. عمق استاتیک ۵۰ متر و عمق نصب پمپ ۶۰ متر نشان‌دهنده شرایط هیدرولیکی نسبتاً دشوار بوده و موجب می‌شود انتخاب مناسب مجموعه موتور-پمپ نقش تعیین‌کننده‌ای در راندمان انرژی و پایداری عملکرد سیستم ایفا کند. داده‌های ماهانه تابش خورشیدی و دمای محیط برای محل مطالعه در استان همدان در جدول ۲ ارائه شده است. این داده‌ها شامل تابش افقی جهانی، تابش دریافتی بر سطح، تابش پراکنده و دمای متوسط محیط بوده و به‌عنوان ورودی‌های اصلی برای شبیه‌سازی عملکرد سیستم پمپاژ آب خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته‌اند. همان‌طور که در این جدول مشاهده می‌شود، بیشترین مقادیر تابش خورشیدی در ماه‌های گرم سال، به‌ویژه از خرداد تا مرداد، ثبت شده است که هم‌زمانی مناسبی با دوره اوج نیاز آبی در بخش کشاورزی منطقه دارد. این هم‌پوشانی، شرایط مناسبی را برای بهره‌برداری مؤثر از سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فراهم می‌کند. تغییرات ماهانه تابش خورشیدی و دمای محیط ارائه‌شده در جدول ۲ باعث می‌شود سیستم پمپاژ در طول سال تحت شرایط کاری متغیری عمل کند؛ بنابراین، ارزیابی و مقایسه عملکرد فناوری‌های مختلف موتور-پمپ، به‌ویژه از منظر بازده در بار جزئی و پایداری عملکرد، اهمیت ویژه‌ای پیدا می‌کند.

جدول ۲ داده های آب و هوایی همدان، رزن

ماه	تابش افقی جهانی (کیلو وات ساعت / متر مربع)	پرتو تابش دریافتی (کیلو وات ساعت / متر مربع)	تابش پراکنده (کیلووات ساعت / متر مربع)	دمای محیط (سانتی گراد)
ژانویه	۱۴۸/۸	۹۲/۶	۳۰/۶۸	۲/۷۸-
فوریه	۱۵۱/۴	۱۰۷/۱	۳۴/۶۴	۰/۶۱
مارس	۱۷۵	۱۴۶/۹	۵۵/۱۲	۷/۱۹
آوریل	۱۸۶/۹	۱۸۰	۷۰/۲۸	۱۱/۵۶
مه	۲۰۷/۵	۲۲۰/۶	۶۶/۸۷	۱۶/۴۴
ژوئن	۲۱۴	۲۴۳/۳	۵۵/۷۳	۲۱/۹۵
جولای	۲۱۳/۳	۲۳۵/۵	۶۰/۹۸	۲۵/۹۸
اگوست	۲۱۹/۷	۲۱۷/۷	۵۲/۲۰	۲۵/۱۶
سپتامبر	۲۱۸/۹	۱۸۸/۳	۴۴/۸۸	۱۹/۷۶
اکتبر	۱۹۱/۴	۱۴۱/۲	۴۱/۴۸	۱۳/۷۸
نوامبر	۱۵۰/۶	۹۷/۹	۳۳/۹۱	۵/۷۴
دسامبر	۱۳۶/۲	۸۳/۴	۳۱/۸۶	۰/۷۳
کل سال	۲۲۱۳/۷	۱۹۵۴/۴	۵۷۸/۶۴	۱۲/۲۴

مشخصات فیزیکی و هیدرولیکی سیستم پمپاژ آب خورشیدی مورد مطالعه، شامل حجم مخزن ذخیره، میزان مصرف روزانه آب و پارامترهای اصلی چاه و مسیر لوله کشی، در جدول ۳ ارائه شده است. این مقادیر به عنوان ورودی های پایه برای تحلیل عملکرد و سایننگ سیستم در نظر گرفته شده اند و در تعیین هد دینامیکی کل (TDH) و دبی واقعی پمپاژ نقش اساسی دارند. این داده ها امکان محاسبه افت هد ناشی از اصطکاک و اختلاف ارتفاع انتقال را فراهم کرده و مبنای برآورد توان مورد نیاز پمپ و تعیین ظرفیت مناسب آرایه فتوولتاییک قرار می گیرند؛ از این رو، اطلاعات ارائه شده پیوندی منسجم میان طراحی هیدرولیکی و فرآیند طراحی انرژی سیستم ایجاد می کنند.

جدول ۳ مشخصات چاه، مخزن و لوله کشی

حجم مخزن ذخیره سازی	۳۰ متر مکعب
میزان مصرف آب (روزانه)	۳۰ متر مکعب
ارتفاع	۳/۷ متر
قطر	۳/۲ متر
ارتفاع تغذیه مخزن	۴ متر
طول لوله ها	۸۰ متر
سایز لوله	۲ اینچ
تعداد زانویی	۱

جدول ۴ مشخصات فنی ماژول های فتوولتاییک به کاررفته در سیستم پمپاژ آب خورشیدی مورد مطالعه را ارائه می کند. ماژول های انتخاب شده از نوع سیلیکون تک بلور با توان نامی ۴۰۰ وات بوده و مقادیر ولتاژ و جریان در نقطه بیشینه توان آن ها مبنای تعیین ظرفیت آرایه فتوولتاییک و انجام شبیه سازی های عملکرد سیستم قرار گرفته است. استفاده از این پارامترها امکان برآورد دقیق انرژی الکتریکی قابل تولید و ارزیابی تطابق آن با توان مورد نیاز پمپ را در شرایط واقعی بهره برداری فراهم می کند و نقش مهمی در تضمین کارایی و پایداری عملکرد سامانه ایفا می نماید. داده های جدول ۴ مبنای اصلی برای طراحی آرایه فتوولتاییک، انتخاب نحوه آرایش ماژول ها و تعیین توان کل مورد نیاز جهت تأمین انرژی پمپ در شرایط واقعی بهره برداری هستند.

جدول ۴ جزئیات آرایه فتوولتاییک

Aleo solar	نام شرکت سازنده
Aleo LEO/400	مدل
Si- mono	نوع سلول خورشیدی
۲۰۲۲	سال ساخت
۴۰۰ وات	توان تولیدی هر ماژول
۳۱/۱ ولت	ولتاژ در نقطه توان بیشینه
۱۲/۸ آمپر	جریان در نقطه توان بیشینه

جدول ۵ مشخصات فنی موتور-پمپ‌های به‌کاررفته در چهار سناریوی شبیه‌سازی شده این پژوهش را ارائه می‌کند. در این سناریوها، نوع موتور الکتریکی و پیکربندی مجموعه موتور-پمپ متفاوت بوده، در حالی که تعداد ماژول‌های فتوولتاییک در تمامی حالت‌ها یکسان در نظر گرفته شده است. این ساختار امکان مقایسه منصفانه و مستقیم فناوری‌های مختلف موتور-پمپ شامل BLDC، آسنکرون سه‌فاز، DC معمولی و PMDC را تحت شرایط اقلیمی و طراحی یکسان فراهم می‌سازد و اثر واقعی انتخاب فناوری موتور-پمپ را بر عملکرد انرژی، حجم آب پمپ‌شده و پایداری سیستم پمپ‌آب خورشیدی فتوولتاییک به‌روشنی نمایان می‌کند.

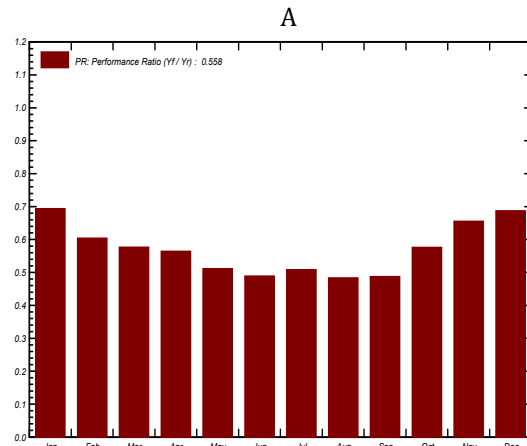
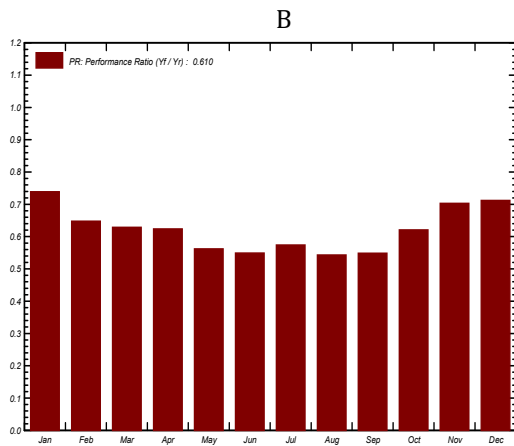
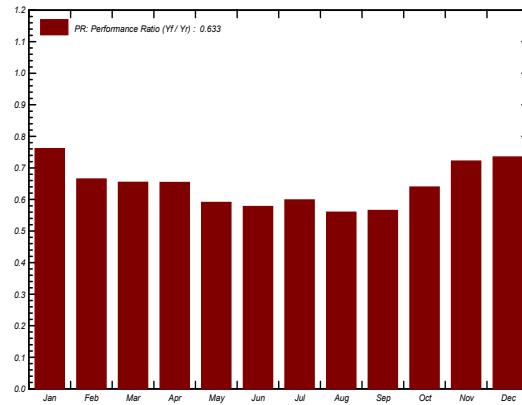
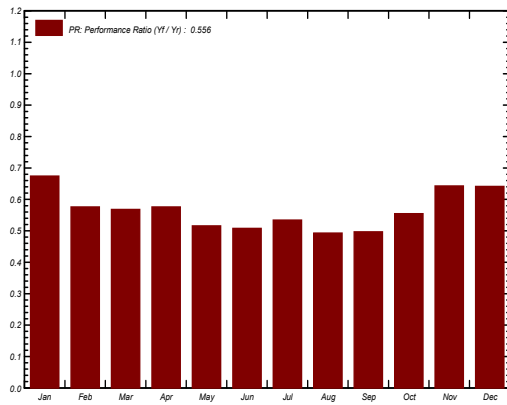
جدول ۵ مشخصات فنی موتور-پمپ‌ها

سناریو	شرکت سازنده	تعداد	نوع موتور	توان نامی هر واحد موتور-پمپ	کل توان موتور-پمپ	تعداد پنل فتوولتاییک
A	Watermax pa	۳	BLDC	۵۷۰ وات	۱۷۱۰ وات	۷
B	Shakti	۱	3Phase Induction Motor	۲۲۰۰ وات	۲۲۰۰ وات	۷
C	Nastec	۲	DC Motor	۱۳۰۰ وات	۲۶۰۰ وات	۷
D	Dankoff	۵	PMDC	۴۶۰ وات	۲۳۰۰ وات	۷

۴- نتایج و بحث

• تحلیل نسبت عملکرد سناریوها

بر اساس مقادیر نسبت عملکرد (PR) ارائه‌شده در شکل ۲، سناریوی A بالاترین PR را در میان سناریوهای مورد بررسی نشان می‌دهد که بیانگر کارایی انرژی بالاتر سیستم است. این برتری عمدتاً به استفاده از موتور DC بدون جاروبک نسبت داده می‌شود که با کاهش تلفات الکتریکی و تطابق بهتر با توان متغیر تولیدشده توسط آرایه فتوولتاییک، بهره‌برداری مؤثرتری از انرژی خورشیدی فراهم می‌کند. در نتیجه، سهم انرژی مفید منتقل‌شده به پمپ در این سناریو افزایش یافته و عملکرد پایدارتر سیستم حاصل شده است. بنابراین، با استناد مستقیم به مقادیر PR، سناریوی A به‌عنوان گزینه برتر از منظر کارایی انرژی شناسایی می‌شود.



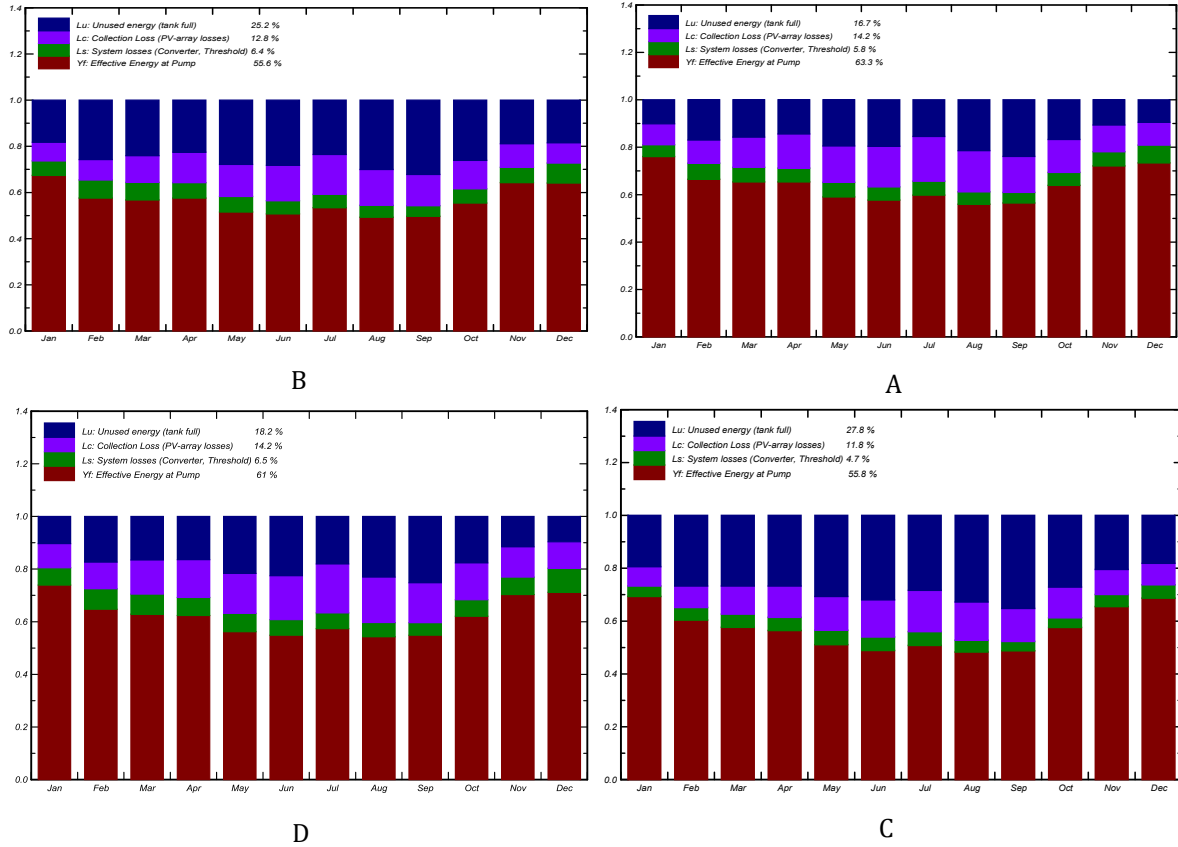
D

C

شکل ۲ نمودار نسبت عملکرد (PR)

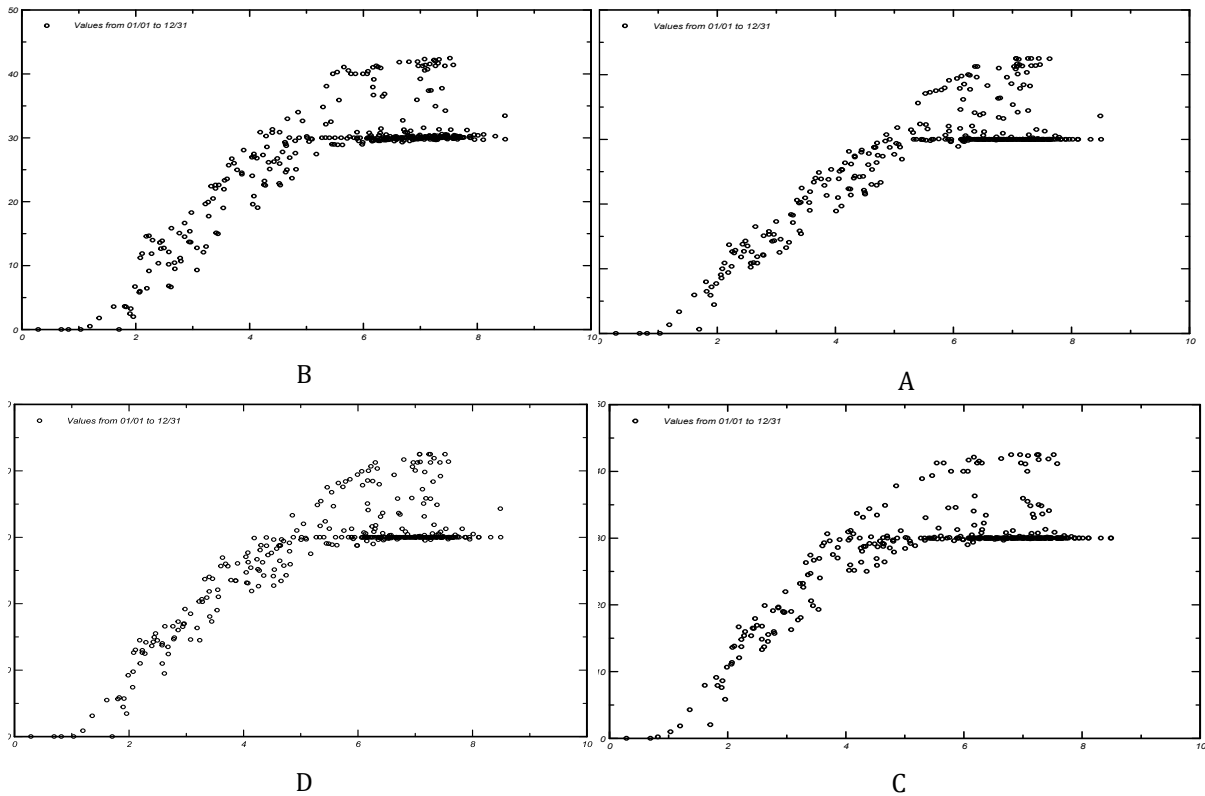
• تحلیل نمودار توزیع نرمال‌سازی شده ماهانه تراز انرژی و ساختار تلفات سیستم

شکل ۳ تحلیل تراز انرژی ماهانه را برای چهار سناریوی مختلف موتور-پمپ در طول یک سال کامل نشان می‌دهد. در هر نمودار، انرژی تولیدی آرایه فتوولتاییک به چهار مؤلفه اصلی تقسیم شده است: انرژی مؤثر تحویلی به پمپ (Yf)، تلفات جمع‌آوری ناشی از آرایه فتوولتاییک (Lc)، تلفات سیستم شامل مبدل و آستانه راه‌اندازی (Ls) و انرژی استفاده‌نشده ناشی از پر بودن مخزن (Lu). همان‌طور که در شکل ۳ مشهود است، سناریوی A که از موتور BLDC استفاده می‌کند، با ۶۳.۳ درصد انرژی مؤثر تحویلی به پمپ (Yf)، بالاترین سهم را در میان تمامی سناریوها به خود اختصاص داده است. این برتری به دلیل تطابق بهتر مشخصه کاری موتور BLDC با توان متغیر آرایه فتوولتاییک و کاهش تلفات تبدیل انرژی در درایور آن است. در مقابل، سناریوهای B و C (موتور آسنکرون سه‌فاز و موتورهای DC معمولی) با ۵۵/۶ و ۵۵/۸ درصد انرژی مؤثر، و سناریوی D (PMDC) با ۶۱/۰ درصد، عملکرد پایین‌تری را نشان می‌دهند. همچنین، مقایسه بخش انرژی استفاده‌نشده (Lu) نشان می‌دهد که سناریوی A با ۱۰/۷ درصد، کمترین میزان انرژی هدررفته را دارد، در حالی که سناریوهای B، C و D به ترتیب ۲۵/۲، ۲۷/۸ و ۱۸/۲ درصد انرژی استفاده‌نشده را تجربه می‌کنند. این تفاوت قابل توجه در انرژی استفاده‌نشده، به‌ویژه در ماه‌های با تابش خورشید بالا (مانند تابستان)، بر اهمیت انتخاب موتور مناسب برای بهره‌برداری بهینه از سیستم و کاهش هدررفت انرژی تأکید دارد. کاهش تلفات سیستم و افزایش سهم انرژی مؤثر در پمپ، مستقیماً به افزایش حجم آب پمپ‌آز شده و بهبود نسبت عملکرد کلی سیستم منجر می‌شود که با نتایج گزارش‌شده در چکیده مقاله هم‌خوانی کامل دارد.



شکل ۳ توزیع نرمال‌سازی شده ماهانه تراز انرژی و ساختار تلفات سیستم

• تحلیل نمودار روزانه آب تولیدی سیستم در مقابل تابش خورشیدی



شکل ۴ تولید روزانه آب در مقابل تابش

نتایج ارائه شده در شکل ۴ رابطه مستقیم بین تابش خورشیدی دریافتی و حجم آب پمپاژ شده روزانه را برای سناریوهای مختلف سیستم نشان می‌دهد. مطابق این شکل، با افزایش تابش، مقدار آب تولیدی در تمامی سناریوها افزایش می‌یابد، با این حال شیب این افزایش و میزان بهره‌برداری از تابش در سناریوها متفاوت است. سناریوی A در اکثر سطوح تابش، حجم آب پمپاژ شده بیشتری نسبت به سایر سناریوها تولید کرده و پاسخ یکنواخت‌تر و پایدارتری به تغییرات تابش نشان می‌دهد. این رفتار نشان‌دهنده توانایی بالاتر این سناریو در تبدیل تابش خورشیدی به انرژی هیدرولیکی مفید، به‌ویژه در شرایط تابش متوسط است. در مقابل، سایر سناریوها در تابش‌های پایین و میانی با افت محسوس در تولید آب مواجه بوده‌اند که بیانگر تطابق کمتر آن‌ها با نوسانات تابش خورشیدی است. بنابراین، تحلیل شکل ۴ تأیید می‌کند که سناریوی A از نظر بهره‌برداری مؤثر از تابش خورشیدی و تولید پایدار آب روزانه، عملکرد برتری نسبت به سایر سناریوها دارد.

• مقایسه سناریوها باهم با پارامترهای تاثیر گذار

جدول ۶ نتایج کلیدی شبیه‌سازی عملکرد چهار سناریوی مختلف موتور-پمپ را در سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک، در مقیاس سالانه مقایسه می‌کند. این جدول شاخص‌هایی نظیر حجم آب پمپ شده، انرژی تولیدی استفاده نشده و درصد آب از دست رفته را در کنار نیاز آبی ثابت ۱۰۹۵۰ متر مکعب در سال و محدوده هد عملیاتی هر سناریو ارائه می‌دهد، که امکان ارزیابی جامع کارایی هر فناوری را فراهم می‌آورد. همان‌طور که نتایج جدول نشان می‌دهد، سناریوی A (مبتنی بر موتور BLDC) با پمپاژ ۱۰۲۱۱ متر مکعب آب در سال، بالاترین حجم آب را در مقایسه با سایر سناریوها تأمین می‌کند. این عملکرد برتر با کمترین میزان آب از دست رفته، معادل ۶/۸ درصد، همراه است که نشان‌دهنده توانایی بالای این فناوری در تأمین بهینه تقاضای آب می‌باشد. در مقابل، سناریوی C (موتور جریان مستقیم معمولی) با پمپاژ ۱۰۰۴۸ متر مکعب و ۸/۴ درصد آب از دست رفته، کمترین کارایی را در برآورده کردن نیاز آبی از خود نشان می‌دهد. مقادیر انرژی تولیدی استفاده نشده نیز برتری سناریوی A را تأیید می‌کند. با تنها ۴۷۸ کیلووات ساعت بر سال، این سناریو کمترین میزان انرژی تولیدی را که به دلیل عدم تطابق یا پر شدن مخزن استفاده نشده است، تجربه می‌کند. این در حالی است که سایر سناریوها اتلاف انرژی قابل توجهی را نشان می‌دهند. در مجموع، داده‌های جدول ۶ به‌وضوح برتری فناوری BLDC را در بهره‌وری انرژی، کاهش هدررفت آب و پایداری عملکرد در سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک تأیید می‌کند.

جدول ۶ مقایسه نتایج شبیه‌سازی عملکرد آب و انرژی در چهار سناریوی مختلف سیستم پمپاژ آب خورشیدی

سناریو	هد	آب پمپ شده (متر مکعب بر سال)	آب مورد نیاز (متر مکعب بر سال)	انرژی تولیدی استفاده نشده (کیلو وات ساعت بر سال)	درصد آب از دست رفته
A	۱۰-۸۰	۱۰۲۱۱	۱۰۹۵۰	۴۷۸	۶/۸٪
B	۴۰-۱۲۰	۱۰۰۹۲	۱۰۹۵۰	۱۲۰۷	۷/۸٪
C	۲۰-۱۰۰	۱۰۰۴۸	۱۰۹۵۰	۷۰۷	۸/۴٪
D	۵۴-۱۰۸	۱۰۱۹۳	۱۰۹۵۰	۸۹۱	۶/۹٪

• مقایسه فناوری‌های موتور الکتریکی مورد استفاده

در سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک، انتخاب نوع موتور الکتریکی نقش تعیین‌کننده‌ای در راندمان انرژی، قابلیت اطمینان و هزینه چرخه عمر سیستم دارد. موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) به دلیل بازده بالا (معمولاً بیش از ۹۰٪)، چگالی توان زیاد، وزن و ابعاد کوچک‌تر و قابلیت عملکرد مناسب در سرعت‌های متغیر، بهترین تطابق را با ماهیت ناپایدار توان خروجی آرایه فتوولتائیک نشان می‌دهند. حذف جاروبک‌ها باعث افزایش طول عمر، کاهش نیاز به نگهداری و بهبود قابلیت اطمینان این موتورها در کاربردهای دور از شبکه می‌شود. در مقابل، موتورهای آسنکرون سه‌فاز از استحکام مکانیکی و هزینه اولیه پایین‌تری برخوردارند، اما به دلیل راندمان کمتر در بارهای جزئی و نیاز به درایو فرکانس متغیر، معمولاً وزن بالاتر، ابعاد بزرگ‌تر و مصرف انرژی بیشتری را در کاربردهای پمپاژ خورشیدی به سیستم تحمیل می‌کنند. این موضوع به‌ویژه در توان‌های پایین و متوسط، استفاده از آن‌ها را از نظر بهره‌وری انرژی محدود می‌سازد (Boldea and Nasar 2016). موتورهای جریان مستقیم معمولی و موتورهای جریان مستقیم آهنربای دائم (PMDC) به دلیل سادگی ساختار و امکان تغذیه مستقیم از منبع DC، همچنان در سیستم‌های کوچک و کم‌هزینه مورد استفاده قرار می‌گیرند. با این حال، وجود جاروبک‌ها منجر به تلفات مکانیکی، کاهش راندمان، افزایش نیاز به نگهداری و طول عمر کمتر در مقایسه با BLDC می‌شود. موتورهای PMDC نسبت به موتورهای DC معمولی، به دلیل حذف سیم‌پیچ تحریک، راندمان و چگالی توان بالاتری دارند، اما همچنان از نظر دوام و قابلیت اطمینان در شرایط کاری طولانی‌مدت ضعیف‌تر از BLDC هستند. بر اساس منابع کلاسیک و مرجع حوزه ماشین‌های الکتریکی، در کاربردهایی مانند پمپاژ خورشیدی که وزن، ابعاد، راندمان در بار جزئی و عمر مفید بالا اهمیت دارند، موتورهای BLDC گزینه بهینه مهندسی محسوب می‌شوند، در حالی که موتورهای آسنکرون و DC بیشتر به دلیل هزینه اولیه کمتر یا دسترسی آسان انتخاب می‌شوند (Krishnan, 2017).

• تحلیل اقتصادی سیستم خورشیدی

تحلیل اقتصادی ارائه شده در جدول (۷) نشان می‌دهد که هزینه واقعی آب نقش تعیین‌کننده‌ای در توجیه‌پذیری مالی سیستم پمپاژ خورشیدی دارد. مقایسه قیمت آب در ایران با قیمت جهانی بیانگر یک اختلاف چشمگیر است؛ در حالی که بهای آب مصرفی در گلخانه‌های ایران بسیار پایین بوده و در پیک مصرف تنها ۰/۰۱۵ دلار بر مترمکعب و در شرایط عادی ۰/۰۰۵ دلار بر مترمکعب است، قیمت جهانی آب به مراتب بالاتر بوده و در پیک مصرف ۰/۳ دلار بر مترمکعب و در زمان عادی ۰/۲ دلار بر مترمکعب گزارش می‌شود. همین تفاوت بنیادی باعث می‌شود که تحلیل اقتصادی سیستم بر اساس قیمت آب در ایران فاقد توجیه مالی باشد؛ زیرا درآمد یا صرفه‌جویی حاصل از جلوگیری از خرید آب بسیار ناچیز است و در نتیجه محاسبات نرم‌افزار PVSyst نشان می‌دهد که نرخ بازگشت سرمایه منفی شده و سرمایه‌گذاری اولیه هرگز بازیابی نمی‌شود. با این حال، هنگامی که تحلیل اقتصادی بر اساس قیمت جهانی آب انجام می‌شود، وضعیت کاملاً متفاوت است. در این حالت، ارزش خالص فعلی پروژه (NPV) مثبت و برابر با ۳۲۱۸ دلار، نرخ بازده داخلی ۴۳٪/۸ و دوره بازگشت سرمایه حدود ۴/۴ سال محاسبه شده است که همگی بیانگر سودآوری و توجیه‌پذیری مالی قوی این سیستم هستند. بنابراین، نتایج نشان می‌دهند که راه‌اندازی سیستم پمپاژ خورشیدی برای مناطقی که قیمت آب در آن‌ها مشابه قیمت‌های جهانی است، کاملاً منطقی و اقتصادی بوده و می‌تواند در بلندمدت موجب افزایش بهره‌وری انرژی و کاهش هزینه‌های عملیاتی گردد.

جدول ۷ تحلیل اقتصادی پروژه

۳۰٪	تورم	تحلیل اقتصادی با قیمت ایران
۳۰٪	نرخ تعدیل	
۰/۰۱۵ دلار بر متر مکعب	قیمت آب در پیک مصرف (قیمت ایران)	
۰/۰۰۵ دلار بر متر مکعب	قیمت آب در زمان عادی (قیمت ایران)	
۷۲۳۹ دلار	کل هزینه پروژه	
۷۴۷۷ - دلار	ارزش خالص فعلی	
صفر	نرخ بازده داخلی	
زیان ده	دوره بازگشت سرمایه	
۱۰۳/۳٪ -	بازده سرمایه گذاری	
۳۰٪	تورم	تحلیل اقتصادی با قیمت جهانی
۳۰٪	نرخ تعدیل	
۰/۳ دلار بر متر مکعب	قیمت آب در پیک مصرف (قیمت جهانی)	
۰/۲ دلار بر متر مکعب	قیمت آب در زمان عادی (قیمت جهانی)	
۷۲۳۹ دلار	کل هزینه پروژه	
۳۲۱۸ دلار	ارزش خالص فعلی	
۴۳/۸٪	نرخ بازده داخلی	
۴/۴ سال	دوره بازگشت سرمایه	
۴۴/۵٪	بازده سرمایه گذاری	

۵- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد فنی و اقتصادی چهار فناوری متفاوت موتور-پمپ در یک سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک، تحت شرایط اقلیمی و هیدرولیکی واقعی شهرستان رزن در استان همدان، با استفاده از محاسبات نظری و شبیه‌سازی دقیق در نرم‌افزار PVSyst مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج شبیه‌سازی نشان داد که انتخاب نوع موتور الکتریکی تأثیر مستقیم و تعیین‌کننده‌ای بر بهره‌برداری از انرژی خورشیدی، حجم آب پمپاژ شده، میزان تلفات انرژی و پایداری عملکرد سیستم دارد. بر اساس تحلیل نسبت عملکرد (PR)، تراز انرژی ماهانه، نمودارهای آب تولیدی در برابر تابش خورشیدی و نتایج سالانه ارائه شده، سناریوی A مبتنی بر موتور جریان مستقیم بدون جاروبک (BLDC) بهترین عملکرد را در میان گزینه‌های بررسی شده ارائه داد. این سناریو بالاترین PR، بیشترین حجم آب پمپاژ شده سالانه، کمترین میزان انرژی استفاده نشده و درصد آب از دست‌رفته کمتر را نشان داد. تطابق مناسب مشخصه کاری موتور BLDC با توان متغیر خروجی آرایه فتوولتائیک، کاهش تلفات الکتریکی و عملکرد مطلوب در شرایط تابش متوسط و پایین، از عوامل اصلی برتری این فناوری محسوب می‌شوند. در مقابل، سایر سناریوها به دلیل تلفات بیشتر یا سازگاری کمتر با نوسانات توان خورشیدی، کارایی و پایداری پایین‌تری

از خود نشان دادند. نتایج تحلیل اقتصادی نیز بیانگر آن است که توجیه‌پذیری مالی سیستم پمپاژ خورشیدی وابستگی شدیدی به قیمت آب دارد. در شرایط قیمت واقعی آب در ایران، پروژه فاقد توجیه اقتصادی بوده و ارزش خالص فعلی منفی به دست می‌آید؛ در حالی که با در نظر گرفتن قیمت‌های جهانی آب، سیستم از نظر اقتصادی سودآور بوده و شاخص‌هایی نظیر NPV مثبت، نرخ بازده داخلی بالا و دوره بازگشت سرمایه نسبتاً کوتاه (حدود ۴.۴ سال) حاصل می‌شود. این یافته نشان می‌دهد که مزایای اقتصادی سیستم‌های پمپاژ خورشیدی در کنار مزایای زیست‌محیطی و فنی، به شدت به سیاست‌گذاری قیمت آب و شرایط محلی بهره‌برداری وابسته است. در مجموع، نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که استفاده از موتورهای BLDC می‌تواند گزینه‌ای کارآمد برای افزایش بهره‌وری انرژی، کاهش تلفات و بهبود پایداری عملکرد سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک، به‌ویژه در مناطق دور از شبکه و دارای نوسانات تابشی، باشد. همچنین، ترکیب شبیه‌سازی دقیق با داده‌های واقعی اقلیمی و هیدرولیکی می‌تواند ابزار مؤثری برای تصمیم‌گیری مهندسی و کاهش ریسک طراحی در پروژه‌های پمپاژ خورشیدی مشابه فراهم آورد.

منابع

- Ahmed, E. E. E. and A. Demirci (2022). "Multi-stage and multi-objective optimization for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems." *Energy* 252.
- Aliyu, M., G. Hassan, S. A. Said, M. U. Siddiqui, A. T. Alawami and I. M. Elamin (2018). "A review of solar-powered water pumping systems." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 87: 61-76.
- Boldea, I. and S. A. Nasar (2016). *Electric Drives*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- Bouzidi, B. (2013). "New sizing method of PV water pumping systems." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 4: 1-10.
- Campana, P. E., H. Li and J. Yan (2013). "Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand." *Applied Energy* 112: 635-645.
- Campana, P. E., I. Papic, S. Jakobsson and J. Yan (2022). *Photovoltaic water pumping systems for irrigation: principles and advances*. Solar Energy Advancements in Agriculture and Food Production Systems, Elsevier: 113-157.
- Chandel, S., M. N. Naik and R. Chandel (2015). "Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 49: 1084-1099.
- Djoudi Gherbi, A., A. Hadj Arab and H. Salhi (2017). "Improvement and validation of PV motor-pump model for PV pumping system performance analysis." *Solar Energy* 144: 310-320.
- Elnozahy, A., M. Abdel-Salam and F. K. Abo-Elyousr (2024). "Optimal techno-economic energy coordination of solar PV water pumping irrigation systems." *Energy* 288.
- Krishnan, R. (2017). *Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor Drives*. Boca Raton, FL, USA, CRC Press.
- Kumar, M. (2025). "Optimal sizing of solar photovoltaic water pumping systems by synergizing irrigation patterns and static heads: A comprehensive study in the Indian context." *Sustainable Energy Technologies and Assessments* 77.
- Kumar, R. and B. Singh (2016). "BLDC motor-driven solar PV array-fed water pumping system employing Zeta converter." *IEEE Transactions on Industry Applications* 52(3): 2315-2322.
- Kumar, R. and B. Singh (2017). "Solar PV powered BLDC motor drive for water pumping using Cuk converter." *IET Electric Power Applications* 11(2): 222-232.
- Mahmoud, I. M., A. Ashraf, A. Hatem, S. O. Abdellatif and H. A. Ghali (2024). "Pre-sizing online tool for photovoltaic water pumping system: development, testing, validation, and evaluation." *Discover Sustainability* 5(1).
- Mirahmad, M. R. and A. Parvaresh Rizi (2025). "Economic viability of crop-specific solar irrigation designs under diverse agricultural management and grid-connected conditions: Insights from Qazvin Plain, Iran." *Energy Nexus* 20.

- Nasir, A. (2019). "Design and simulation of photovoltaic water pumping system for irrigation." *Advances in Applied Sciences* 4(2).
- Periasamy, P., N. K. Jain and I. P. Singh (2015). "A review on development of photovoltaic water pumping system." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 43: 918-925.
- Saady, I. (2024). "Soft computing approaches for photovoltaic water pumping systems: A review." *Cleaner Engineering and Technology* 22.
- Sharma, R., S. Sharma and S. Tiwari (2020). "Design optimization of solar PV water pumping system." *Materials Today: Proceedings* 21: 1673-1679.
- Shiravi, A. H. and M. Firoozzadeh (2019). "Energy payback time and environmental assessment on a 7 MW photovoltaic power plant in Hamedan Province, Iran." *Journal of Solar Energy Research* 4(4): 280-286.
- Singh, B. and R. Kumar (2016). "Simple brushless DC motor drive for solar photovoltaic array fed water pumping system." *IET Power Electronics* 9(7): 1487-1495.