

Simulation and Techno-Economic Evaluation of the Performance of a Photovoltaic-PEM Electrolyzer Hybrid System for Green Hydrogen Production: A Case Study in Northern Iran

Pezhman Zabihi,¹ Jafar Nejadali^{2*}

¹Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, Pezhman.zabihi@yahoo.com

²Faculty of Engineering and Technology, University of Mazandaran, Babolsar, Iran, J.nejad@umz.ac.ir

Keywords:

green hydrogen, PEM electrolyzer, photovoltaic panel, economic analysis, hybrid system

Abstract: This paper simulates and investigates the technical and economic performance of a hybrid system of photovoltaic panels and proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production in the climatic conditions of Mazandaran province. The mathematical modeling of the photovoltaic panel, based on a five-parameter model and the electrolyzer, was performed using the voltage-current curve obtained from fitting experimental data. Solar radiation and temperature data of Ghaemshahr city were used as model inputs, and the system performance was investigated on a daily and seasonal scale. Every 10% increase in radiation leads to about 10% increase in hydrogen production rate. In the temperature range of 5 to 40 degrees Celsius, the average hydrogen production rate increased by less than 2%, indicating that it did not have a significant effect on system performance. Temperature had a dual effect on the system: increasing temperature reduced the efficiency of the photovoltaic panel but improved the conductivity of the electrolyte in the electrolyzer. Electrical matching analysis showed that in direct connection, the system operating point was near the maximum power point of the photovoltaic panel in most climatic conditions. An economic analysis of implementing a 5-kW system in Mazandaran Province showed that the project was economically justified assuming the current price of hydrogen. Also, as the price of hydrogen increases, the payback period will decrease significantly.

Original Research Article

Paper History:

Received: 09/02/2026

Revise: 05/04/2026

Accepted: 04/07/2026

How to cite this article: Zabihi, P., Nejadali, J., "Simulation and Techno-Economic Evaluation of the Performance of a Photovoltaic-PEM Electrolyzer Hybrid System for Green Hydrogen Production: A Case Study in Northern Iran", Energy Engineering and Management, Vol. 15, No. 2, PP. 70-85, 2025. <https://doi.org/10.22052/eem.2026.258348.1163>

© 2023 University of Kashan Press.

This is an open access article under the CC BY license. (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Extended Abstract

Introduction

Given the limited fossil fuel resources and the environmental consequences of greenhouse gas emissions, the development of clean energy production technologies is considered one of the necessities of the present era. Green hydrogen, as a clean and multifunctional energy carrier, has the potential to be a suitable replacement for fossil fuels in the industrial, transportation and energy storage sectors. In this regard, photovoltaic-proton exchange membrane electrolyzer (PV-PEM) hybrid systems have attracted the attention of researchers due to their simplicity of structure and the possibility of direct hydrogen production from solar energy. This research simulates and, comprehensively, evaluates the technical and economic performance of a hybrid green hydrogen production system in the unique climatic conditions of Mazandaran Province (Qaemshahr city), which has humid and temperate climate characteristics.

Materials and Methods

In this study, an integrated simulation framework was developed based on a five-parameter mathematical model for the photovoltaic panel and an empirical voltage–current model for the PEM electrolyzer. The input data included the actual values of solar radiation and ambient temperature measured in Qaemshahr city by a pyranometer at 48 daily time points. For the annual performance analysis, four representative seasonal days (spring, summer, autumn, and winter) were selected using the meteorological data of the region, and their radiation and temperature were estimated. The photovoltaic panel was modeled based on the five-parameter Lorenzo diode equation and the DeSoto method to adjust the parameters under different temperature and radiation conditions. The electrolyzer was modeled using the voltage–current curve obtained from the nonlinear fitting of the laboratory data. Economic analysis was performed based on the discounted cash flow (DCF) method, considering a discount rate of 23%, inflation of

30%, a project life of 20 years, and an initial investment cost of \$1,600 per kW.

Results

The simulation results showed that the direct-coupled system operated automatically near the maximum power point (MPP) of the panel without the need for a power electronic converter or MPPT controller. As a result, the average distance of the operating point from the MPP in the summer was measured to be less than 5%. This finding was of great importance because it maintained the simplicity of the system structure and reduced investment and maintenance costs. Seasonal analysis of hydrogen production indicated that the highest instantaneous production rate occurred in summer (0.035 ml/s) and the lowest in winter (0.015 ml/s), indicating a significant fluctuation in production throughout the year. Sensitivity analysis confirmed that solar radiation was the dominant factor affecting production; every 10% increase in radiation leads to about 10% increase in hydrogen production rate. In the temperature range of 5 to 40 degrees Celsius, the average hydrogen production rate increased by less than 2%, indicating that it did not have a significant effect on system performance. Temperature had a dual effect on the system: increasing temperature reduced the efficiency of the photovoltaic panel but improved the conductivity of the electrolyte in the electrolyzer. In low radiation conditions (less than 400 W/m²), temperature variations affected production by up to 15%, highlighting the importance of designing hybrid systems to reduce fluctuations.

An economic analysis of a 5-kW system showed that in the climatic conditions of Mazandaran, the system was capable of producing about 150 kg of hydrogen annually. Assuming the current hydrogen price (\$4.5/kg), the project's net present value (NPV) was positive and the economic breakeven point occurred at a price of \$3/kg, which was lower than the current market price. The discounted payback period under current conditions was estimated to be about 13 years,

which would decrease to less than 8 years if the hydrogen price increased to \$6 per kg.

Discussion and Conclusions

These findings confirm that given the rising trend of green hydrogen prices in global markets and the strategic importance of reducing dependence on fossil fuels in Iran, this project will be economically justified in the long term. In conclusion, direct photovoltaic-electrolyzer coupled systems are a viable option for green hydrogen production

in areas with medium to high radiation potential such as northern Iran. However, for widespread commercialization, it is suggested to use hybrid systems (combining photovoltaics, wind, and batteries) to reduce seasonal fluctuations as well as anti-dust technologies to maintain the efficiency of the panels in the long term. This research is considered a practical step towards developing hydrogen infrastructures in Iran and transitioning to a low-carbon economy.

مدل سازی و ارزیابی فنی - اقتصادی عملکرد سیستم هیبریدی فتوولتائیک - الکترو لایزر غشا تبادل پروتون برای تولید هیدروژن سبز: مطالعه موردی در شمال ایران

پژمان ذبیحی پایین افراکتی،^۱ جعفر نژادعلی^{*۲}

^۱ کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران، Pezhman.zabihi@yahoo.com

^۲ استادیار، دانشکده مهندسی و فناوری، دانشگاه مازندران، بابلسر، ایران، J.nejad@umz.ac.ir

واژه های کلیدی:

هیدروژن سبز، الکترو لایزر غشا تبادل پروتون، پنل
فتوولتائیک، تحلیل اقتصادی، سیستم هیبریدی.

چکیده: این مقاله به مدل سازی و بررسی عملکرد فنی و اقتصادی سامانه هیبریدی پنل فتوولتائیک و الکترو لایزر غشا تبادل پروتون برای تولید هیدروژن در شرایط آب و هوایی استان مازندران می پردازد. مدل سازی ریاضی پنل فتوولتائیک براساس مدل پنج پارامتری و الکترو لایزر با استفاده از منحنی ولتاژ - جریان حاصل از برازش داده های تجربی انجام شده است. داده های تابش خورشیدی و دمای شهرستان قائم شهر به عنوان ورودی مدل استفاده شده و عملکرد سامانه در مقیاس روزانه و فصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که هر ۱۰ درصد افزایش در تابش، حدود ۱۰ درصد افزایش در تولید هیدروژن به همراه دارد. با افزایش دما از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد، نرخ تولید هیدروژن کمتر از ۲ درصد افزایش یافت که نشان می دهد تأثیر قابل توجهی بر عملکرد سیستم ندارد. درحالی که دماهای بالاتر راندمان پنل را کاهش می دهند، رسانایی الکترولیت را در الکترو لایزر بهبود می بخشند. تحلیل تطبیق الکتریکی نشان داد که در اتصال مستقیم، نقطه کار سامانه در اغلب شرایط اقلیمی در نزدیکی نقطه بیشینه توان پنل فتوولتائیک قرار دارد. تحلیل اقتصادی اجرای یک سامانه ۵ کیلوواتی در استان مازندران نشان داد پروژه از نظر اقتصادی قابل توجیه است. همچنین با افزایش قیمت هیدروژن، دوره بازگشت سرمایه به طور قابل توجهی کاهش می یابد.

مقاله علمی پژوهشی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۴/۱۱/۲۰

تاریخ بازنگری: ۱۴۰۵/۰۱/۱۶

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۵/۰۴/۱۳

۱. مقدمه

منابع انرژی موجود در جهان به دو دسته تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر تقسیم می‌شوند. منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به معنای انرژی‌های پایدار شناخته می‌شوند، مانند خورشید که تمام نمی‌شود یا بی‌پایان است. وقتی اصطلاح «انرژی جایگزین» را می‌شنوید معمولاً به منابع انرژی تجدیدپذیر اشاره دارد و به این معناست که منابع انرژی تجدیدپذیر جایگزین پرکاربردترین منابع غیرپایدار مانند نفت خام و زغال سنگ شوند. سوخت‌های فسیلی منابع تجدیدناپذیرند. به علاوه، آن‌ها دی‌اکسید کربن را در جو کره زمین آزاد می‌کنند که سبب تغییرات آب‌وهوا و گرم شدن کره زمین می‌شود. معروف‌ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در حال حاضر عبارت‌اند از: انرژی خورشیدی، انرژی بادی، انرژی آبی، انرژی جزر و مد، انرژی زمین‌گرمایی، تولید هیدروژن سبز و

مانع اصلی توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر در دسترس بودن متناوب آن‌هاست؛ بنابراین برای ارتقای انرژی‌های تجدیدپذیر، یک حامل (حمل‌کننده) انرژی مناسب ضروری است. در طول دهه‌های گذشته، کاربردهای جدیدی از هیدروژن به عنوان حامل انرژی به دست آمده از منابع انرژی تجدیدپذیر، به منظور استفاده در آینده (ذخیره فصلی) یا انتقال به مکان‌های دورتر شناخته شده است. تولید هیدروژن در فرایند الکترولیز برای سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر (خورشیدی - بادی - موج - جزر و مد و ...) که در شبکه یکپارچه نیستند، مناسب است. با این حال هزینه ذخیره‌سازی مبتنی بر هیدروژن نسبت به سایر راه‌حل‌های جایگزین (باتری‌ها، ذخیره‌سازهای حرارتی و ...) بالاتر است؛ بنابراین لازم است تلاش‌هایی برای کاهش هزینه‌های تولید، ذخیره‌سازی و تحویل هیدروژن انجام شود تا بتوان آن را به عنوان یک حامل انرژی غالب در آینده ارتقا داد.

هیدروژن را می‌توان با استفاده از منابع انرژی اولیه الکتریکی، حرارتی، بیوشیمیایی، فتونیک، الکتروحرارتی، فتوالکتریک و فتوبیوشیمیایی تولید کرد. تولید هیدروژن مبتنی بر انرژی فتونیک (فتوکاتالیز، روش فتوالکتروشیمیایی و فتوسنتز مصنوعی) از نظر محیطی بی‌خطر است.

از فواید تولید هیدروژن حاصل از منابع تجدیدپذیر می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- استفاده از هیدروژن در آینده (ذخیره فصلی - یعنی در تابستان ذخیره شود و در زمستان مصرف شود).
- انتقال به مکان‌های دور (در نقاطی مثل کویر که تابش خورشید

- بیشتر است، تولید انجام شود و به مکان‌های دیگر منتقل شود)
- تولید هیدروژن توسط الکترولایزر، برای سیستم‌های مبتنی بر سایر انرژی‌های تجدیدپذیر غیر خورشیدی (جزر و مدی، بادی و ...) که در شبکه یکپارچه قرار ندارند، مناسب است.
- تولید هیدروژن مبتنی بر انرژی فتونیک، از نظر محیطی بی‌خطر است و تمیزترین راه برای تولید هیدروژن است.
- هیدروژن به دست آمده از الکترولایزر با غشا تبادل پروتون بسیار خالص است و برای استفاده در پیل‌های سوختی، نیاز به عملیات شیمیایی خاصی ندارد.

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های متعددی به موضوع تولید هیدروژن با استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر پرداخته‌اند. بررسی‌ها نشان می‌دهد که سیستم‌های کوپل مستقیم پیل خورشیدی الکترولایزر به دلیل سادگی، حذف تجهیزات میانی و بازدهی مناسب، توجه بسیاری از محققان را به خود جلب کرده است.

در کشورهای مختلف مانند الجزایر آزمایش‌های خوبی برای مدل‌سازی و بهینه‌سازی سیستم کوپل مستقیم پیل خورشیدی و الکترولایزر با غشا تبادل پروتون انجام شده است [۱]. سیستم کوپل مستقیم پیل فتوولتائیک و الکترولایزر غشا تبادل پروتون (PEM) تحت تأثیر کاراکترهای پنج‌گانه شرایط محیطی (شدت تابش خورشیدی، دمای محیط، دمای سطح مازول، سرعت باد، میزان رطوبت و گردوغبار موجود در هوا) قرار می‌گیرند.

بالا و همکاران در سال ۲۰۲۱ در الجزایر به مدل‌سازی و بهینه‌سازی یک سیستم کوپل مستقیم PV-PEM تحت شرایط اقلیمی مختلف پرداختند. آن‌ها گزارش کردند که پارامترهای محیطی نظیر شدت تابش، دمای محیط و میزان گردوغبار بیشترین تأثیر را بر راندمان تولید هیدروژن دارند [۲].

در حوزه ذخیره‌سازی، پارا و همکاران یک مرور جامع بر فناوری‌های مختلف ذخیره‌سازی انرژی از جمله هیدروژن ارائه دادند. یافته‌های آنان نشان داد که هزینه‌های بالای ذخیره‌سازی هیدروژن هنوز مانع اصلی در مسیر تجاری‌سازی محسوب می‌شود، هرچند مزایای زیست‌محیطی آن در بلندمدت برتری قابل توجهی نسبت به سایر گزینه‌ها دارد [۳].

مایا و همکاران به تحلیل متغیرهای کلیدی مؤثر بر عملکرد الکترولایزر غشای تبادل پروتون پرداختند [۴]. در کنار این تلاش‌ها، پژوهش‌های زنگ و ژانگ و به‌روزرسانی‌های بعدی آن‌ها نشان می‌دهد که فناوری‌های فتوالکتروشیمیایی (PEC) نیز به عنوان راهکاری نویدبخش برای تولید مستقیم هیدروژن سبز مطرح هستند. با وجود این، محدودیت‌هایی همچون بازده پایین و هزینه بالا، کاربرد

این فناوری‌ها را در مقیاس تجاری محدود کرده است [۵].

ون و همکاران مقایسه‌ای میان سیستم‌های کوپل مستقیم و سیستم‌های دارای مبدل توان انجام دادند. نتایج نشان داد که کوپل مستقیم ساده‌تر و ارزان‌تر است اما کنترل جریان در بار جزئی دشوار است. استفاده از کنترل‌کننده MPPT به همراه مدل‌های پیش‌بین توانست بازده انرژی را تا ۹۲ درصد برساند [۶].

دی کارو و همکاران نشان دادند که افزایش فشار کاری از ۱ به ۳ بار موجب افزایش ۶ درصدی در بازده تبدیل و افزایش خلوص هیدروژن تا ۹۹.۹ درصد شد. همچنین دمای بهینه الکترولایزر در حدود ۵۰ درجه سانتی‌گراد تعیین شد. استفاده از خنک‌کننده مایع باعث بهبود پایداری عملکرد در ساعات اوج تابش گردید [۷].

سعید و همکاران گزارش کردند که گردوغبار می‌تواند بازده PV را در برخی مناطق تا ۳۰ درصد کاهش دهد. در شرایط بیابانی، ذرات سیلیسی بیشترین اثر کاهنده را دارند. استفاده از پوشش‌های خودتمیزشونده و سیستم پاک‌سازی خودکار، بهبود بازده تا ۲۵ درصد را نشان داد [۸].

بررسی‌های قوش و همکاران، نشان داد که با پیشرفت در فناوری‌های فتوولتائیک (بازده ۲۵ درصد) و کاهش قیمت الکترولایزر، هزینه تولید هیدروژن سبز می‌تواند تا حدود ۳ دلار به‌ازای هر کیلوگرم کاهش یابد. تأکید شد که استفاده از سیستم‌های هیبریدی (فتوولتائیک - بادی - باتری) می‌تواند نوسانات را کاهش و پایداری تولید را تضمین کند [۹].

در مجموع، مرور کارهای گذشته بیانگر آن است که اگرچه سیستم‌های فتوولتائیک - الکترولایزر و فناوری‌های فوتونیک‌ی ظرفیت بالایی برای تولید هیدروژن سبز دارند، اما همچنان چالش‌هایی مانند نوسانات محیطی، هزینه‌های سرمایه‌گذاری و پایداری عملکرد باید برطرف شوند تا امکان تجاری‌سازی گسترده فراهم شود.

در پژوهش پیش‌رو، یک چارچوب یکپارچه برای مدل‌سازی و ارزیابی عملکرد سیستم کوپل مستقیم فتوولتائیک - الکترولایزر غشا تبادل پروتون ارائه شده است. نوآوری اصلی این مطالعه در استخراج نقطه کار واقعی سیستم از طریق تقاطع منحنی‌های جریان - ولتاژ پیل فتوولتائیک و الکترولایزر، بدون استفاده از مبدل‌های الکترونیک قدرت و الگوریتم‌های ردیابی نقطه حداکثر توان است. از داده‌های واقعی تابش خورشیدی و دمای محیط در شمال ایران (منطقه قائم‌شهر) برای شبیه‌سازی استفاده شده است که منجر به افزایش دقت و قابلیت اتکای نتایج گردیده است. علاوه بر این، تحلیل حساسیت ترکیبی اثر دما و تابش بر نرخ تولید هیدروژن انجام شده و یک ارزیابی فنی - اقتصادی بومی‌سازی شده مبتنی بر شاخص‌های اقتصادی

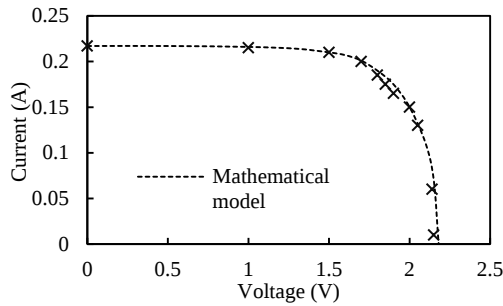
ایران ارائه گردیده است.

۲. تولید هیدروژن به روش الکترولیز

تولید هیدروژن از آب به‌عنوان یکی از عناصر تشکیل‌دهنده این مایع در دسترس یکی از گزینه‌های اصلی تولید گاز هیدروژن از دیرباز بوده است. الکترولیز نیز یکی از فرایندهای آزموده شده و موفق در این زمینه در مقیاس آزمایشگاهی بوده است. ولی از زمان تولید هیدروژن در مقیاس صنعتی به‌وسیله فرایند الکترولیز مدت زیادی نمی‌گذرد؛ زیرا فناوری تولید هیدروژن از طریق الکترولیز در قالب پکیج‌های صنعتی از پیچیدگی‌های فراوان برخوردار است. کنترل فرایند، انتخاب آلیاژهای مناسب و شناسایی شرایط بهینه عملیاتی تنها بخشی از دشواری‌های ساخت این واحدهاست.

الکترولیز آب با کیفیت مشخص‌شده با هدف تجزیه آب به عناصر سازنده آن یعنی اکسیژن و هیدروژن انجام می‌گیرد. در فرایند الکترولیز از یک جریان الکتریکی مستقیم و دو الکترود استفاده می‌شود. منبع جریان الکتریکی با جریان مستقیم به دو الکترود موجود در آب متصل می‌شود که طی این فرایند، آب تجزیه شده و گاز هیدروژن در کاتد و گاز اکسیژن در آنود تولید می‌گردند. گاز هیدروژن تولیدی، دو برابر میزان اکسیژن بوده و هر دو گاز متناسب با کل شارژ الکتریکی هستند که وارد آب می‌گردند. الکترولیز آب خالص، انرژی بسیار زیادی لازم دارد و بدون این انرژی زیاد، عمل الکترولیز بسیار آهسته صورت می‌گیرد. این عمل با افزودن یک افزودنی الکترولیت‌ساز (مانند نمک، اسید یا باز) سریع‌تر انجام می‌پذیرد و دارای مزایایی همچون بهتر شدن کیفیت آب به دلیل تولید اکسیژن پس از تصفیه آب است. الکترولیت نیز معمولاً با مقدار مشخص توسط پکیج تزریق مواد شیمیایی به آب افزوده می‌شود تا غلظت محلول با دقت بالایی کنترل شود.

آب موردنیاز پکیج‌های تولید هیدروژن به روش الکترولیز باید فاقد املاح محلول و هدایت الکتریکی بسیار پایین باشد. به همین دلیل آب ورودی قبل از ورودی به پکیج در دستگاه تصفیه آب صنعتی، خالص‌سازی می‌شود. در دستگاه‌های الکترولیز دو قطبی، جایی که آب فوق خالص به دو گاز H_2 و O_2 تبدیل می‌شود (هیدروژن در سمت کاتد و اکسیژن در سمت آنود تجمع می‌یابد). گازهای اکسیژن و هیدروژن انتقال یافته پس از خنک شدن توسط مبدل‌های حرارتی از الکترولیت جدا می‌شوند. هیدروژن حاصل از این مرحله حاوی مقداری رطوبت و ناخالصی اکسیژن (۱/۰-۲/۰ درصد) می‌باشد، بنابراین جهت دستیابی به خلوص بالاتر و کاهش غلظت اکسیژن می‌توان هیدروژن را از میان کاتالیست پلاتینیوم عبور



شکل (۲): مقایسه مدل سازی ریاضی با داده های تجربی مرجع [۱]

روش ارائه شده توسط دیستو [۱۱] برای ارزیابی عملکرد سیستم فتوولتائیک و انرژی الکتریکی تولید شده توسط ژنراتور فتوولتائیک استفاده می شود. با این روش می توان عملکرد پنل فتوولتائیک را در هر شرایط آب و هوایی از وضعیت مرجع محاسبه شده قبلی برون یابی کرد. ضریب ایدئال بودن، تابع خطی دمای پنل فتوولتائیک است و با معادله جریان داده می شود:

$$\frac{m}{m_{ref}} = \frac{T_c}{T_{c,ref}} \quad (2)$$

نسبت جریان اشباع معکوس دیود در دمای کاری جدید به دمای مرجع برابر است با:

$$\frac{I_o}{I_{o,ref}} = \left[\frac{T_c}{T_{c,ref}} \right]^3 \cdot \exp \left[\frac{1}{k} \left(\frac{E_g}{T_{c,ref}} - \frac{E_g}{T_c} \right) \right] \quad (3)$$

که در آن $E_{g,Tref} = 1.121$ الکترو ولت در نظر گرفته می شود. با توجه به مراجع موجود [۵]، E_g وابستگی کمی به دما نشان می دهد و سپس مدل به صورت معادله زیر خواهد شد.

$$\frac{E_g}{E_{g,Tref}} = 1 - 0.0002677 (T - T_{ref}) \quad (4)$$

جریان نور I_L در هر شرایط عملیاتی وابسته به نور در شرایط مرجع فرض می شود که با معادله زیر بیان می شود:

$$I_L = I_{L,ref} + \alpha I_{sc} (T_c - T_{c,ref}) \quad (5)$$

حداکثر نقطه توان پنل فتوولتائیک با حل مشتق توان نسبت به ولتاژ با استفاده از معادله (۱) محاسبه می شود. برای محاسبه ولتاژ و جریان در حداکثر توان، مجموعه ای از دو معادله (۶) و (۷) به طور همزمان حل می شوند:

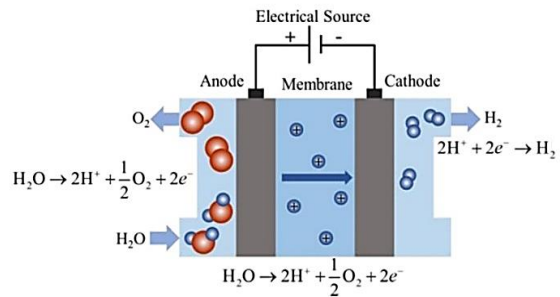
$$\frac{G}{G_{ref}} = \frac{\left(\frac{m_{ref}}{I_{o,ref}} \exp \left(-\frac{V_{mp,ref} + I_{mp,ref} \cdot R_{s,ref}}{m_{ref}} \right) + R_{s,ref} \right)}{\left(\frac{m}{I_o} \exp \left(-\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{m} \right) + R_s \right)} \quad (6)$$

$$I_{mp} = I_{L,ref} - I_{o,ref} \left(\exp \left(\frac{V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s}{m_{ref}} \right) - 1 \right) - \frac{(V_{mp} + I_{mp} \cdot R_s)}{R_{sh}} \quad (7)$$

۲.۳. معادلات الکترولایزر جهت شبیه سازی

الکترولایزر، آب را به گاز اکسیژن و هیدروژن تجزیه می کند. غشای

داده و اکسیژن آن را تا ۱ ppm کاهش داد. همچنین جهت حذف رطوبت گاز هیدروژن، می توان با عبور گاز از غربال های مولکولی، نقطه شبنم گاز را به حداقل مقدار ممکن رساند.



شکل (۱): شماتیک عملکرد یک الکترولایزر [۱۰]

۳. مدل سازی ریاضی

۱.۳. معادلات پنل فتوولتائیک جهت شبیه سازی

پنل فتوولتائیک فوتون های خورشیدی را مستقیماً به انرژی الکتریکی تبدیل می کند. برای محاسبه توان خروجی برق فتوولتائیک لحظه ای، از مدار معادل پنج پارامتری استفاده شده است. با مدل مورد استفاده در این مطالعه، می توان یک ماژول فتوولتائیک یا یک آرایش متشکل از چندین ماژول را مدل کرد. یکی از ویژگی های این مدل پنج پارامتری این است که پارامترهای آن را می توان با استفاده از داده هایی که معمولاً توسط سازندگان ارائه می شوند، به دست آورد. این مدل قادر به پیش بینی عملکرد ماژول های سیلیکونی تک کریستالی و چندکریستالی با خطای ریشه میانگین حدود ۶ درصد است [۱]. این مدل براساس مدل ارائه شده توسط لورنزو است که با معادله (۱) بیان شده است:

$$I = I_L - I_o \left(\frac{V + I R_s}{e m + 1} \right) - \left(\frac{V + I R_s}{R_{sh}} \right) \quad (1)$$

پارامترهای مدل (معادله ۱) که در جدول (۱) ارائه شده است، از نتایج آزمایشگاهی مرجع [۱] استخراج شده است. این آزمایش در تابش خورشیدی ۷۰۰ وات بر مترمربع و دمای ۲۲ درجه سانتی گراد انجام شد. همان طور که در شکل (۲) مشاهده می شود، جهت اعتبارسنجی، مدل عددی (منحنی ولتاژ-جریان) با داده های تجربی مرجع [۱] مقایسه شده اند. خطای جذر میانگین مربعات (RMSE) بین مدل ریاضی و نقاط تجربی کمتر از ۲ درصد می باشد.

جدول (۱): پارامترهای مدل [۱]

پارامتر	مقدار
R_s	$6 * 10^{-7} \Omega$
R_{sh}	$10^5 \Omega$
I_o	$3.3159 * 10^{-6} A$
I_L	0.217969 A
m	1.9705

در اینجا α ، ضریب انتقال بار در الکترودهای مربوطه و i_0 ، چگالی جریان تبادل در الکترودها است. تلفات ناشی از انتقال جرم (V_{trans}) به دلیل محدودیت جریان به مکان های کاتالیزور، مانند مورفولوژی جمع کننده جریان و صفحه جداکننده و همچنین حباب های گاز تشکیل شده از محصولات واکنش ایجاد می شود. برای پیش بینی این افت ولتاژ، معادله نرنست^۲ را می توان با قانون فیک^۳ ترکیب کرد [۱۳]:

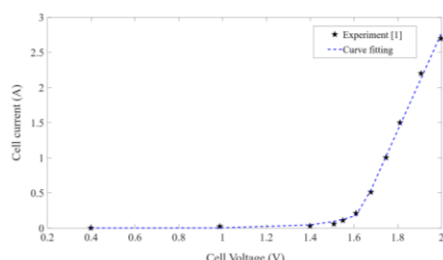
$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,cat} = \frac{RT_{an}}{nF} \ln \frac{C_{O_2,mem}}{C_{O_2,mem,o}} + \frac{RT_{cat}}{nF} \ln \frac{C_{H_2,mem}}{C_{H_2,mem,o}} \quad (10)$$

$C_{i,mem}$ ، غلظت گونه i در سطح مشترک الکترود غشایی است و $C_{i,mem,o}$ ، یک شرایط کاری است که به عنوان مرجع در نظر گرفته می شود. در نهایت، تلفات اهمی (V_{ohm}) وجود دارد که توسط مقاومت در برابر جریان الکترودها از طریق کلکتورهای جریان و صفحات جداکننده معمولاً با استفاده از یک مدل مقاومت معادل قانون اهم، مدل سازی می شود:

$$V_{ohm} = R_{tot,I} + \delta_{mem} \frac{I}{A \cdot \sigma_{mem}} \quad (11)$$

در اینجا R_{total} ، مقاومت کل سلول (سمت کاتالیزور و سمت آند)، I ، جریان سلول، δ_{mem} ، ضخامت غشا و A مساحت سطح غشا و σ_{mem} رسانایی غشا است. آنچه بین مدل های موجود در بیانات تفاوت دارد این است که این افت ها چگونه تعیین می شوند. باین وجود، عملکرد یک الکترولایزر را می توان با منحنی ولتاژ-جریان که با برازش چندجمله ای با استفاده از داده های آزمایش به دست می آید، توصیف کرد. معادله ولتاژ-جریان زیر را می توان بدون تلفات زیاد استفاده کرد [۱۴]:

$$\begin{cases} I_{cell} = bV_{cell}^c & V_{cell} < a \\ I_{cell} = dV_{cell} + e & V_{cell} > a \end{cases} \quad (12)$$



شکل (۳): نمودار ولتاژ-جریان الکترولایزر حاصل از برازش منحنی بر روی داده های تجربی مرجع [۱]

پلیمری الکترولیت الکترولایزر غشا تبادل پروتون، یک سلول مجهز به غشای الکترولیت پلیمری جامد است که امکان هدایت پروتون ها، جداسازی گازهای محصول و عایق الکتریکی الکترودها را فراهم می کند. الکترولایزر غشا تبادل پروتون طوری طراحی شده است که در محدوده وسیعی از توان ورودی کار می کند تا تنوع انرژی خورشیدی را برآورده کند. با اعمال یک جریان الکتریکی مستقیم به الکترولایزر غشا تبادل پروتون یک واکنش الکتروشیمیایی در هر دو الکترود القا می شود. آب در آند وارد می شود و به اکسیژن، پروتون و الکترون تفکیک می شود. پروتون ها از طریق الکترولایزر غشا تبادل پروتون به کاتد تحت یک میدان الکتریکی هدایت می شوند و در آنجا با الکترون هایی که از مدار خارجی می آیند ترکیب شده و گاز هیدروژن را تشکیل می دهند.

در این پژوهش، اتصال پل و الکترولایزر به صورت مستقیم و بدون استفاده از مبدل توان انجام شده است. همچنین فرض شده است که آب ورودی به الکترولایزر از نوع دیونیزه^۱ بوده و توسط سیستم های متداول تصفیه صنعتی تأمین می شود.

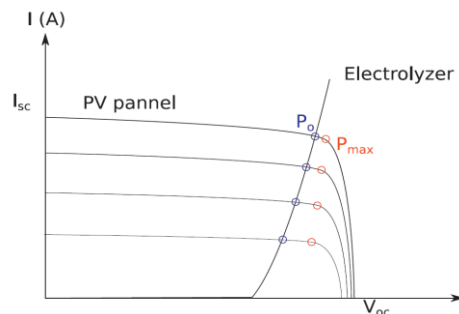
از نقطه نظر ترمودینامیکی، حداقل ولتاژ برای شروع واکنش الکترولیز آب با مجموع پتانسیل برگشت پذیر برای هر نیمه واکنش در هر دو الکترود مطابقت دارد. برای آب تجزیه شده به هیدروژن و اکسیژن، این پتانسیل برابر است با (ولت) $V_{rev} = 1/229$. این حداقل پتانسیل، تحت تأثیر شرایط فشار و دمای واکنش ها قرار می گیرد. علاوه بر این، در سیستم های واقعی باید پتانسیل بالاتری به دلیل تلفات سینتیکی در صفحات دو قطبی، الکترودها و مقاومت های داخلی در سلول الکترولایزر اعمال شود؛ بنابراین، هنگامی که جریان از طریق الکترودها جریان دارد، ولتاژ کاری برای یک سلول واحد (V_{cell}) با ولتاژ برگشت پذیر و مجموع پتانسیل های مختلف داده می شود که با معادله (۸) بیان می شود:

$$V_{cell} = V_{rev} + V_{act} + V_{trans} + V_{ohm} \quad (8)$$

اضافه ولتاژ فعال سازی (V_{act})، افت ولتاژی است که به محرک واکنش الکتروشیمیایی نسبت داده می شود و برای غلبه بر پیوندهای مولکولی ضروری است. این مازاد پتانسیل را می توان برحسب چگالی جریان با استفاده از معادله بوتلر-ولمر برای آند و کاتد به صورت زیر توصیف کرد [۱۲].

$$V_{act} = V_{act,an} + V_{act,cat} = \frac{RT_{cat}}{\alpha_{cat} \cdot F} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{i_{o,cat}} \right) + \frac{RT_{an}}{\alpha_{an} \cdot F} \operatorname{arcsinh} \left(\frac{i}{i_{o,an}} \right) \quad (9)$$

وجود دارد، پارامترهای معادلات تعیین خواهند شد. این روش را می‌توان به هر عنصری با ویژگی‌های یکسان تعمیم داد. با استفاده از معادلات، مدل یک شبیه‌سازی دقیق برای بهینه‌سازی سیستم انجام شد.



شکل (۵): نمودار پنل فتوولتائیک و الکترولایزر با نقطه کار و ماکزیمم توان در شرایط کاری مختلف [۱]



شکل (۶): شماتیک؛ الگوریتم شبیه‌سازی سیستم هیبریدی فتوولتائیک-الکترولایزر

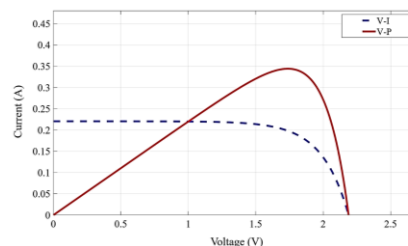
به منظور شفاف‌سازی روند محاسبات و مراحل پیاده‌سازی مدل شبیه‌سازی، نمودار کلی الگوریتم مورد استفاده در این پژوهش در شکل (۶) ارائه شده است. فرایند شبیه‌سازی از دریافت داده‌های

پارامترهای معادله (۱۲)، با استفاده از برازش غیرخطی بر روی داده‌های آزمایشگاهی مرجع [۱] به کمک نرم‌افزار متلب به دست آمد. شکل (۳)، نمودار ولتاژ-جریان الکترولایزر حاصل از برازش منحنی بر روی داده‌های تجربی را نشان می‌دهد. ضرایب به دست آمده حاصل از برازش منحنی به صورت $a=1/61$, $b=0/0106$, $c=4/903$, $d=-10/516$ هستند.

۳.۳. منحنی‌های مشخصه

یک پنل فتوولتائیک دارای منحنی مشخصه‌ای متفاوت از سایر انواع ژنراتورهای الکتریکی است. منحنی‌های ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان رایج یک ماژول فتوولتائیک در شکل (۴) نشان داده شده است. منحنی فتوولتائیک تنها یک نقطه اوج دارد که به آن نقطه حداکثر توان می‌گویند.

برای به حداکثر رساندن راندمان پنل فتوولتائیک باید با حداکثر نقطه توان کار کند. ولتاژ کاری باید همیشه با ولتاژ حداکثر توان مطابقت داشته باشد. باین حال، این حداکثر نقطه توان به شدت به تابش خورشید و دما بستگی دارد که با توجه به شرایط آب‌وهوایی محلی متفاوت است.



شکل (۴): منحنی‌های ولتاژ-جریان و ولتاژ-توان رایج یک ماژول فتوولتائیک [۱]

شکل (۵) تطبیق مستقیم الکتریکی بین پنل فتوولتائیک و الکترولایزر را براساس منحنی‌های جریان-ولتاژ نشان می‌دهد. منحنی‌های PV بیانگر شرایط مختلف تابش خورشیدی هستند که با افزایش تابش، جریان خروجی افزایش می‌یابد. منحنی مشخصه الکترولایزر نیز رفتار غیرخطی سیستم را به ویژه در ناحیه جریان‌های کم نشان می‌دهد.

در حالت اتصال مستقیم، نقطه کار سیستم از تقاطع منحنی I-V پنل و الکترولایزر به دست می‌آید که عموماً با نقطه پیشینه توان پنل فتوولتائیک متفاوت است. این اختلاف منجر به تلفات عدم تطبیق می‌شود، اما در عوض ساختار سیستم را ساده کرده و نیاز به مبدل‌های الکترونیک قدرت و کنترل MPPT را حذف می‌کند. جریان الکترولایزر در این نقطه کار، به طور مستقیم نرخ تولید هیدروژن را تعیین می‌کند. از روی منحنی مشخصه‌ای که در هر مرحله از سیستم

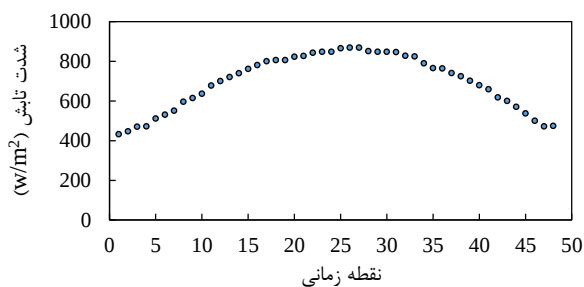
بررسی حساسیت شاخص های اقتصادی به تغییرات در پارامترهای کلیدی سیستم انجام شده است [۱۹ و ۲۰].

۵. بحث و تحلیل نتایج

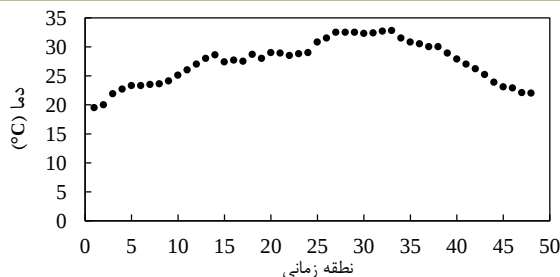
۱.۵. داده های تابش و دمای به دست آمده از طریق

آزمایش در منطقه جغرافیایی هدف (شهرستان قائم شهر)

با توجه به اهمیت داده های اقلیمی در طراحی، شبیه سازی و بهره برداری از سامانه های انرژی خورشیدی، دسترسی به اطلاعات دقیق تابش خورشیدی و دمای محیط ضروری است. در این پژوهش، داده های تابش خورشیدی و دمای محیط در منطقه جغرافیایی قائم شهر از طریق اندازه گیری های میدانی جمع آوری شده اند. در شکل (۷) میزان شدت تابش اندازه گیری شده در قائم شهر توسط دستگاه پیرانومتر (در یک روز تابستانی از ساعت ۸:۳۰ تا ۱۶:۳۰) ارائه شده است. همچنین نمودار دمای پنل فتوولتائیک در ۴۸ نقطه زمانی (بازه های زمانی ۱۰ دقیقه) در شکل (۸) نشان داده شده است. در این مطالعه، یک روز به عنوان نماینده برای فصل در نظر گرفته شده و اثرات کوتاه مدت ابرناکی و بارش لحاظ نشده است.



شکل (۷): میزان شدت تابش اندازه گیری شده در قائم شهر توسط دستگاه پیرانومتر بر حسب وات بر مترمربع در ۴۸ نقطه زمانی



شکل (۸): دمای پنل بر حسب °C در قائم شهر در روز آزمایش در ۴۸ نقطه زمانی

۳.۵. تولید هیدروژن و آنالیز حساسیت نسبت به دما و تابش

در این پژوهش، یک چارچوب یکپارچه برای شبیه سازی سامانه فتوولتائیک-الکترولایزر به منظور تولید هیدروژن در شرایط اقلیمی استان مازندران توسعه داده شده است. همان طور که پیش تر ذکر شد

اقلیمی آغاز شده و پس از مدل سازی پنل فتوولتائیک، تعیین نقطه کار مشترک با الکترولایزر و محاسبه نرخ تولید هیدروژن، به تحلیل سالانه و در نهایت ارزیابی اقتصادی ختم می شود.

۴. تحلیل اقتصادی

برای بررسی امکان پذیری این پروژه یک تحلیل اقتصادی مبتنی بر شاخص های اقتصادی ایران انجام شده است.

روش تحلیل اقتصادی این مطالعه مبتنی بر ارزیابی جریان نقدی تنزیل شده^۱ با تطبیق بر شرایط اقتصاد تورمی ایران است. مبنای تحلیل، روش جریان نقدی تنزیل شده است.

یکی از مهم ترین معیارها برای ارزیابی مالی و اقتصادی پروژه های سرمایه گذاری NPV^2 است. این شاخص، ارزش خالص یک سرمایه گذاری را با محاسبه تفاوت بین ارزش فعلی جریان های نقدی ورودی و خروجی در طول زمان نشان می دهد. NPV را می توان از معادله ۱۴ محاسبه کرد.

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (13)$$

که در آن NPV ارزش فعلی خالص، CF_t جریان نقدی در سال t ، r نرخ تنزیل و n عمر پروژه است. در صورتی که مقدار ارزش فعلی خالص عددی بزرگ تر از صفر باشد، آنگاه آن پروژه از نظر اقتصادی توجیه پذیر است [۱۵ و ۱۶].

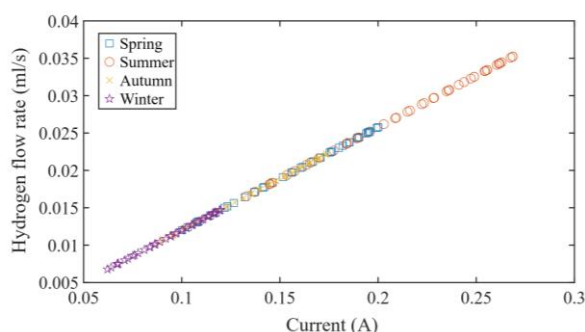
دوره بازگشت سرمایه^۳ یکی از ساده ترین معیارهای ارزیابی سرمایه گذاری است که نشان می دهد چه مدت طول می کشد تا سرمایه گذاری اولیه از طریق جریان های نقدی ورودی بازیابی شود. فرمول کلی برای یک پروژه با جریان نقدی سالانه یکنواخت به شرح زیر است:

$$PBP = \frac{C_{inv}}{R_{year} - C_{O\&M}} \quad (14)$$

که در آن C_{inv} هزینه سرمایه گذاری اولیه، R_{year} درآمد سالانه حاصل از تولید برق و $C_{O\&M}$ هزینه های بهره برداری و نگهداری است.

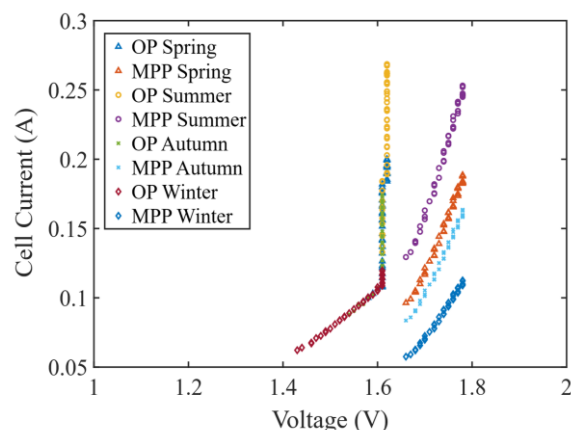
دوره بازگشت سرمایه با تنزیلی [۱۷ و ۱۸] نسخه پیشرفته تری از «دوره بازگشت سرمایه» است که ارزش زمانی پول را در محاسبات خود در نظر می گیرد. در این روش، ابتدا جریان های نقدی آتی با استفاده از نرخ تنزیل به ارزش فعلی تبدیل می شوند و سپس دوره بازگشت سرمایه محاسبه می شود. با توجه به تغییرات نرخ ارز در ایران، در این پروژه از این روش استفاده شد. تحلیل حساسیت برای

1. Discounted
2. Net Present Value
3. Payback period



شکل (۱۱): نرخ تولید هیدروژن برحسب جریان الکترولایزر در فصول مختلف

شکل (۱۱) رابطه خطی بین جریان الکترولایزر و نرخ تولید هیدروژن را تأیید می‌کند. شیب خط، در تمام فصول ثابت بوده و تنها نقطه کار سیستم تغییر می‌کند. جریان کارکرد در تابستان به ۰/۲۷ آمپر می‌رسد، درحالی‌که در زمستان به ۰/۱۲ آمپر کاهش می‌یابد.



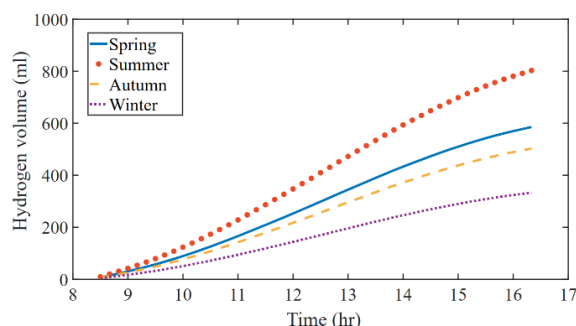
شکل (۱۲): مقایسه منحنی ولتاژ-جریان در حالت مدل‌سازی و حالت حداکثر توان کاری

در شکل (۱۲)، تغییرات جریان-ولتاژ (I-V) سیستم فتوولتائیک، همراه با نقاط کار عملیاتی الکترولایزر، به همراه نقاط حداکثر توان پنل فتوولتائیک (MPP) برای هریک از شرایط فصول ترسیم شده است. در اکثر موارد، نقطه کار بسیار نزدیک به نقطه حداکثر توان پنل فتوولتائیک قرار دارد که نشان‌دهنده بهره‌وری قابل قبول سیستم است. مهم‌ترین یافته این تحلیل آن است که سیستم الکترولایزر بدون نیاز به مدارهای الکترونیک قدرت پیچیده DC-DC، به‌طور خودکار در مجاورت نقطه حداکثر توان پنل‌ها عمل می‌کند. متوسط فاصله نقطه کار از MPP در فصل تابستان کمتر از ۵ درصد است.

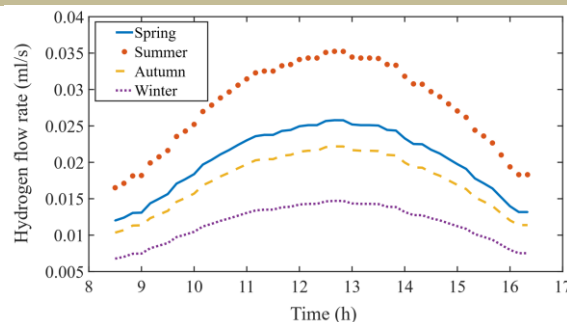
به‌منظور بررسی حساسیت عملکرد سیستم نسبت به پارامترها، تحلیل حساسیت پارامتریک بر روی دو متغیر کلیدی شامل شدت تابش خورشیدی و دمای پنل فتوولتائیک انجام شد. در این تحلیل، هریک از پارامترها در بازه مشخصی تغییر داده شده و سایر پارامترها

اطلاعات مربوط به دما و تابش خورشید برای یک روز تابستانی در شهرستان قائم‌شهر اندازه‌گیری شده است. برای بررسی عملکرد سامانه در مقیاس سالانه، چهار روز نماینده فصلی (بهار، تابستان، پاییز، زمستان) در نظر گرفته شده است. برای محاسبه دما و تابش خورشید در فصل‌های بهار، پاییز و زمستان از اطلاعات هواشناسی منطقه استفاده شده (نرم‌افزار کلاسیکیت کانسلنت^۱) و مقادیر تابش و دما تخمین زده شده است. بر این اساس محاسبات انجام شده است.

شکل (۹) روند تجمعی تولید هیدروژن را در طول روز نشان می‌دهد. همان‌طور که ملاحظه می‌گردد، بیشترین تولید مربوط به فصل تابستان و کمترین تولید مربوط به زمستان است. شیب منحنی‌ها که نشان‌دهنده نرخ تولید لحظه‌ای است، در میانه روز به حداکثر می‌رسد. تولید در بهار و پاییز تقریباً مشابه می‌باشد.



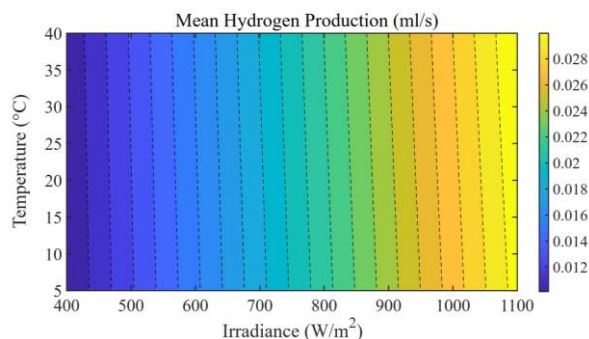
شکل (۹): تولید هیدروژن انباشته در روز (در چهارفصل)



شکل (۱۰): نرخ تولید هیدروژن در روز (در چهارفصل)

شکل (۱۰) نرخ لحظه‌ای تولید هیدروژن در طول روز را برای چهارفصل مختلف نشان می‌دهد. بیشترین نرخ تولید در تابستان به ۰/۳۵ میلی‌لیتر بر ثانیه و در زمستان به حدود ۰/۱۵ میلی‌لیتر بر ثانیه می‌رسد. زمان اوج تولید در همه فصول حدود ظهر است، اما دامنه تغییرات در فصل‌های مختلف تفاوت قابل توجهی دارد. این تغییرات فصلی تأثیر مستقیم بر طراحی سیستم ذخیره‌سازی و مدیریت انرژی دارد.

نقشه کانتوری حساسیت ترکیبی در شکل (۱۵) نشان می دهد که تابش عامل غالب در تعیین تولید هیدروژن است. همچنین در شرایط تابش بالا (حدود ۱۰۰۰ وات بر مترمربع) تغییرات دما تأثیر محدودی دارد.



شکل (۱۵): کانتور تحلیل حساسیت به صورت ترکیبی بر تولید متوسط هیدروژن سبز

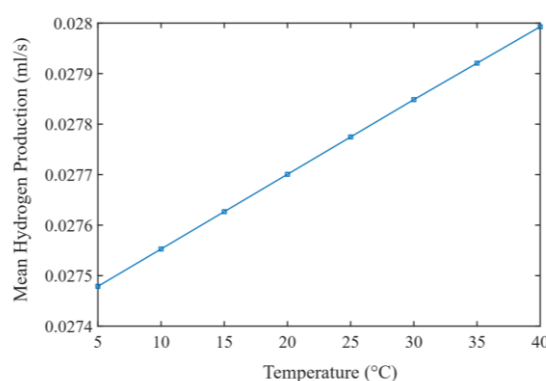
۴.۵. تحلیل اقتصادی اجرای سامانه ۵ کیلوواتی تولید هیدروژن سبز در شمال ایران

به منظور امکان سنجی اجرای سامانه پیل فتوولتائیک- الکترولایزر PEM برای تولید هیدروژن سبز در منطقه شمال کشور یک تحلیل اقتصادی بر مبنای شرایط اقتصادی ایران انجام پذیرفت. در این تحلیل نرخ تنزیل ۲۳ درصد، تورم ۳۰ درصد، عمر پروژه ۲۰ سال و قیمت هیدروژن ۴۵ دلار به ازای هر کیلوگرم در نظر گرفته شد. هزینه اولیه پروژه ۸۰۰۰ دلار (به ازای هر کیلووات ۱۶۰۰ دلار) در نظر گرفته شد. این هزینه شامل قیمت الکترولایزر، پیل فتوولتائیک و هزینه های نصب می باشد. هزینه تعمیرات و نگهداری ۳ درصد هزینه اولیه در نظر گرفته شد [۱۶]. با توجه به شرایط متغیر اقتصادی و نیز افزایش توجه به تولید هیدروژن در سال های آینده به عنوان سوخت جایگزین برای سوخت های فسیلی و پیش بینی واقع بینانه افزایش قیمت هیدروژن سبز، اثر این پارامترها به صورت متغیر در نظر گرفته شده است.

بر اساس محاسبات انجام شده یک سامانه ۵ کیلوواتی قادر است حدود ۱۵۰ کیلوگرم هیدروژن در سال تولید کند. شایان ذکر است که عدد محاسبه شده مربوط به شرایط اقلیمی مازندران می باشد و بدیهی است در نقاطی از کشور با میزان تابش بیشتر، میزان تولید هیدروژن افزایش خواهد یافت.

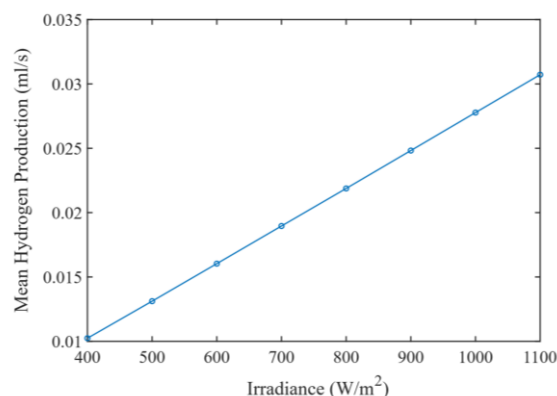
شکل (۱۶) تغییرات ارزش فعلی خالص (NPV) که یکی از مهم ترین شاخص های اقتصادی برای توجیه پذیر بودن یک پروژه می باشد را برحسب قیمت هیدروژن نشان می دهد. همان طور که ملاحظه می گردد، شیب منحنی NPV نشان دهنده حساسیت بالا به قیمت هیدروژن است. نقطه NPV صفر در قیمت ۳ دلار اتفاق

ثابت در نظر گرفته شدند. شدت تابش خورشیدی از ۲۰۰ تا 1000 W/m^2 و دمای پیل از ۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد به صورت متغیر در مدل سازی وارد شد. برای هر ترکیب از این پارامترها، نقطه کار سیستم از تقاطع منحنی های جریان- ولتاژ پیل فتوولتائیک و الکترولایزر تعیین شده و نرخ تولید هیدروژن متناظر محاسبه گردید. همان طور که در شکل (۱۳) مشاهده می گردد، در محدوده دمایی ۵ تا ۴۰ درجه سانتی گراد، میانگین نرخ تولید هیدروژن کمتر از ۲ درصد رشد داشته است که نشان می دهد اثر قابل توجهی بر عملکرد سیستم ندارد. افزایش دما تأثیر دوگانه بر عملکرد سیستم دارد. از یک طرف بازده سلول های خورشیدی کاهش می یابد، از طرف دیگر هدایت الکترولیت در الکترولایزر بهبود می یابد.



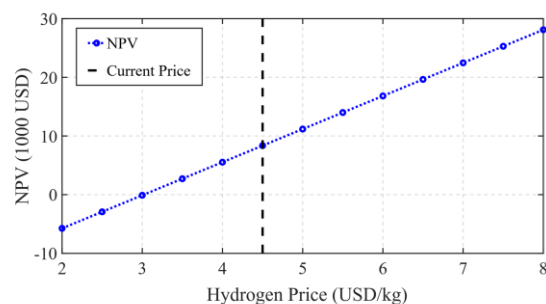
شکل (۱۳): تغییرات میانگین نرخ تولید هیدروژن نسبت به دما

نتایج نشان می دهد که افزایش تابش خورشیدی مستقیماً منجر به افزایش تولید هیدروژن می شود. همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می شود، به طور میانگین هر ۱۰ درصد افزایش در تابش، منجر به حدود ۱۰ درصد افزایش در نرخ تولید هیدروژن می شود. این حساسیت در تابش های پایین (زیر ۷۰۰ وات بر مترمربع) و بالا کاهش می یابد که ناشی از تغییر منطقه کاری الکترولایزر است.

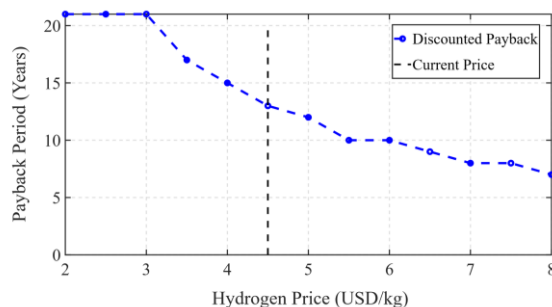


شکل (۱۴): تغییرات میانگین نرخ تولید هیدروژن نسبت به تابش

می‌افتد که پایین‌تر از قیمت فعلی بازار است. این امر نشان‌دهنده توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه در شرایط فعلی است.



شکل (۱۶): تغییرات NPV برحسب قیمت هیدروژن



شکل (۱۷): تغییرات بازگشت سرمایه برحسب قیمت هیدروژن

شکل (۱۷) نشان می‌دهد که با افزایش قیمت فروش هیدروژن، دوره بازگشت سرمایه (تنزیل‌شده) به‌طور قابل توجهی کاهش می‌یابد. این نتیجه بیانگر وابستگی شدید توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه به قیمت بازار هیدروژن است. با فرض قیمت فعلی هیدروژن (۴٫۵ دلار) دوره بازگشت سرمایه تنزیل شده حدود ۱۳ سال است. در این شرایط پروژه از نظر اقتصادی با احتیاط قابل توجیه است؛ اما همان‌طور که پیش‌ازاین ذکر شد با توجه به تجدیدپذیر بودن سیستم و نیاز به سوخت پاک برای کاهش آلودگی در کشور و نیز افزایش قیمت در سال‌های آتی، پروژه کاملاً اقتصادی خواهد بود. همان‌طور که در شکل (۱۷) ملاحظه می‌شود با افزایش قیمت، دوره بازگشت سرمایه سریعاً در حال کاهش است.

۶. نتیجه‌گیری

در این پژوهش، سیستم تولید هیدروژن سبز از منابع انرژی تجدیدپذیر، به‌طور خاص از طریق ترکیب پیل‌های فتوولتائیک و الکترولایزر غشا تبادل پروتون (PEM)، در شرایط اقلیمی منطقه شمال ایران (شهرستان قائم‌شهر) مدل‌سازی، شبیه‌سازی و از منظر اقتصادی مورد ارزیابی قرار گرفته است. مدل‌سازی ریاضی پیل فتوولتائیک براساس مدل پنج‌پارامتری و الکترولایزر PEM با استفاده از منحنی ولتاژ-جریان حاصل از برازش داده‌های تجربی انجام شده

است. داده‌های واقعی تابش خورشیدی و دمای محیط شهرستان قائم‌شهر به‌عنوان ورودی مدل استفاده شده و عملکرد سامانه در مقیاس روزانه و فصلی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داد که:

(۱) افزایش تابش خورشیدی به‌صورت مستقیم موجب افزایش نرخ تولید هیدروژن می‌شود، به‌طوری‌که هر ۱۰ درصد افزایش در تابش، حدود ۱۰ درصد افزایش در نرخ تولید هیدروژن را به همراه دارد.

(۲) در محدوده دمایی ۵ تا ۴۰ درجه سانتی‌گراد، میانگین نرخ تولید هیدروژن کمتر از ۲ درصد رشد داشته است که نشان می‌دهد اثر قابل توجهی بر عملکرد سیستم ندارد. افزایش دما تأثیر دوگانه بر عملکرد سیستم دارد. از یک طرف بازده سلول‌های خورشیدی کاهش می‌یابد، از طرف دیگر هدایت الکترولیت در الکترولایزر بهبود می‌یابد.

(۳) تحلیل تطبیق الکتریکی نشان داد که در اتصال مستقیم، نقطه کار سامانه در اغلب شرایط اقلیمی در نزدیکی نقطه بیشینه توان پیل فتوولتائیک قرار دارد و فاصله متوسط آن در فصل تابستان کمتر از ۵ درصد است. این موضوع امکان حذف مبدل‌های الکترونیک قدرت را فراهم کرده و به‌سادگی و کاهش هزینه‌های سامانه منجر می‌شود.

(۴) تحلیل اقتصادی اجرای یک سامانه ۵ کیلوواتی در استان مازندران انجام شد که نتایج آن نشان می‌دهد با قیمت فعلی هیدروژن (۴٫۵ دلار به‌ازای هر کیلوگرم)، پروژه از نظر اقتصادی با احتیاط قابل توجیه بوده و دوره بازگشت سرمایه تنزیل‌شده حدود ۱۳ سال است.

(۵) نتایج آنالیز حساسیت نشان داد که با افزایش قیمت هیدروژن، دوره بازگشت سرمایه سریعاً در حال کاهش است. با توجه به تجدیدپذیر بودن سیستم و نیاز به سوخت پاک برای کاهش آلودگی و نیز افزایش قیمت در سال‌های آتی، پروژه کاملاً اقتصادی خواهد بود.

فهرست علائم

نماد	شرح	واحد
P_{sys}	توان نامی سیستم	W
PBP	دوره بازگشت سرمایه	-
R	ثابت گازها	$J/mol \cdot K$
R_{year}	درآمد سالانه	$\$/year$
R_s	مقاومت سری	Ω
R_{sh}	مقاومت شنت	Ω
R_{tot}	مقاومت کل سلول	Ω
r	نرخ تنزیل	-
t	زمان	s
T_c	دمای سلول	K
$T_{c,ref}$	دمای مرجع سلول	K
T_{an}	دمای آند	K
T_{cat}	دمای کاتد	K
V	ولتاژ خروجی پیل	V
V_{act}	افت ولتاژ فعال سازی	V
V_{mp}	ولتاژ نقطه بیشینه توان	V
V_{ohm}	افت اهمی	V
V_{rev}	ولتاژ برگشت پذیر	V
V_{trans}	افت انتقال جرم	V
V_{cell}	ولتاژ سلول الکترولایزر	V
$\dot{V}_{H_2}$	نرخ تولید حجمی هیدروژن	ml/s
α_{an}	ضریب انتقال بار	-
α_{cat}	ضریب انتقال بار	-
α_{isc}	ضریب دمایی جریان اتصال کوتاه	A/K
η_{el}	بازده الکترولایزر	-
η_{pv}	بازده پنل فتوولتائیک	-
η_{sys}	بازده کل سیستم	-
σ_{mem}	رسانایی غشا	S/m
δ_{mem}	ضخامت غشا	m

نماد	شرح	واحد
A	سطح غشا	m^2
a	ولتاژ مرزی مدل	V
b	ضرایب ناحیه غیرخطی	-
C_{inv}	هزینه سرمایه گذاری	$\$$
$C_{O\&M}$	هزینه نگهداری	$\$/year$
$C_{i,mem}$	غلظت گونه i در غشا	mol/m^3
$C_{i,mem,0}$	غلظت مرجع گونه i	mol/m^3
CF_t	جریان نقدی	$\$$
c	ضرایب ناحیه غیرخطی	--
d	ضرایب ناحیه غیرخطی	--
E_g	انرژی نیمه رسانا	eV
e	ضرایب ناحیه غیرخطی	--
F	ثابت فارادی	C/mol
G	شدت تابش خورشیدی	W/m^2
G_{ref}	تابش مرجع	W/m^2
H_{year}	تولید سالانه هیدروژن	$kg/year$
I	جریان خروجی پیل	A
I_{cell}	جریان الکترولایزر	A
I_{mp}	جریان در نقطه بیشینه توان	A
I_L	جریان نوری	A
I_0	جریان اشباع دیود	A
i	چگالی جریان	A/m^2
i_0	چگالی جریان تبادلی	A/m^2
k	ثابت بولتزمن	J/K
m	ضریب ایدئال بودن	-
$\dot{m}_{H_2}$	نرخ تولید جرمی هیدروژن	kg/s
N	تعداد نقاط زمانی	-
NPV	ارزش فعلی خالص	$\$$
n	تعداد الکترون های انتقالی	-
P	توان خروجی پیل	W

- [1] Mraoui, A., Benyoucef, B., Hassaine, L. "Experiment and simulation of electrolytic hydrogen production: case study of photovoltaic-electrolyzer direct connection", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 6, pp. 3441-3450, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2017.11.035>
- [2] Blal, M., Belasri, A., Benatillah, A., Hamouda, M., Lachtar, S., Sahouane, N., Laribi, S., Mostefaoui, M. "Assessment of solar and wind energy as motive for potential hydrogen production of Algeria country; development of a methodology for uses hydrogen-based fuel cells", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 43, No. 19, pp. 9192-9210, 2018, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2018.03.200>
- [3] Parra, D., Swierczynski, M., Stroe, D. I., Norman, S. A., Abdon, A., Worlitschek, J., O'Doherty, T., Rodrigues, L., Gillott, M., Zhang, X., Bauer, C., Patel, M. K. "An interdisciplinary review of energy storage for communities: Challenges and perspectives", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 79, pp. 730-749, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.003>
- [4] Maya, J. C., Chejne, F., Gomez, C. A., Montoya, J., Chaquea, H., Pecha, B. "Analysis of the performance of a PEM-type electrolyzer in variable energy supply conditions", Chemical Engineering Research and Design, Vol. 196, pp. 526-541, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2023.07.002>
- [5] Zeng, K., Zhang, D. "Recent progress in alkaline water electrolysis for hydrogen production and applications", Progress in Energy and Combustion Science, Vol. 36, No. 3, pp. 307-326, 2010, <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2009.11.002>
- [6] Van, L. P., Hoang, L. H., Duc, T. N. "A comprehensive review of direct coupled photovoltaic-electrolyser system: Sizing techniques, operating strategies, research progress, current challenges, and future recommendations", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 48, No. 65, pp. 25231-25249, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2023.03.257>
- [7] Di Caro, A., Vitale, G. "Direct-coupled improvement of a solar-powered proton exchange membrane electrolyzer by a reconfigurable source", Clean Technologies, Vol. 6, No. 3, pp. 1203-1228, 2024, <https://doi.org/10.3390/cleantechnol6030059>
- [8] Said, Z. S., Islam, S. Z., Radzi, N. H., Wekesa, C. W., Altimania, M., Uddin, J. "Dust impact on solar PV performance: A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions", Energy Reports, Vol. 12, pp. 1121-1141, 2024, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.06.024>
- [9] Ghosh, A. "Solar-powered green hydrogen from electrolyzer (PV-H2): a review", Solar RRL, Vol. 9, Art. No. 202500150, 2025, <https://doi.org/10.1002/solr.202500150>
- [10] Jing, K., Liu, C. "Online observer of the voltage components of the PEM electrolyzer based on the time-varying linearization of the semi-empirical model", Energy Reports, Vol. 9, pp. 299-307, 2023, <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2023.04.096>
- [11] De Soto, W., Klein, S. A., Beckman, W. A. "Improvement and validation of a model for photovoltaic array performance", Solar Energy, Vol. 80, No. 1, pp. 78-88, 2006, <https://doi.org/10.1016/j.solener.2005.06.010>
- [12] Awasthi, A., Scott, K., Basu, S. "Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 36, No. 22, pp. 14779-14786, 2011, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2011.03.045>
- [13] Carmo, M., Fritz, D. L., Mergel, J., Stolten, D. "A comprehensive review on PEM water electrolysis", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 12, pp. 4901-4934, 2013, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2013.01.151>
- [14] Tani, T., Sekiguchi, N., Sakai, M., Ohta, D. "Optimization of solar hydrogen systems based on hydrogen production cost", Solar Energy, Vol. 68, No. 2, pp. 143-149, 2000, [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(99\)00061-4](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(99)00061-4)
- [15] Brealey, R. A., Myers, S. C., Allen, F. *Principles of Corporate Finance*, 13th ed., New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2020.
- [16] Sullivan, W. G., Wicks, E. M., Luxhoj, J. T. *Engineering Economy*, 13th ed., Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2003.
- [17] Berk, J., DeMarzo, P., Harford, J., Ford, G., Mollica, V., Finch, N. *Fundamentals of Corporate Finance*, 3rd ed., Frenchs Forest, NSW, Australia, 2013.
- [18] Pike, R., Neale, B. *Corporate Finance and Investment: Decisions & Strategies*, 7th ed., Harlow, Essex, UK, 2006.

- [19] Lee, J. M., Lee, S. H., Baik, J. H., Park, K. "Techno-economic analysis of hydrogen production electrically coupled to a hybrid desalination process", Desalination, Vol. 539, p. 115949, 2022, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2022.115949>
- [20] Borgonovo, E., Plischke, E. "Sensitivity analysis: A review of recent advances", European Journal of Operational Research, Vol. 248, No. 3, pp. 869-887, 2016, <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.06.032>