



# Investigating the Performance of Hydroxy Gas Producing Electrolyzer Using Solar Cells

## ARTICLE INFO

### Article Type

Original Research

### Authors

Mirtabae S. M. <sup>1\*</sup>,  
Shahraki Shahdabadi R. <sup>2</sup>

### How to cite this article

Mirtabae S. M., Shahraki Shahdabadi R. Investigating the Performance of Hydroxy Gas Producing Electrolyzer Using Solar Cells. Modares Mechanical Engineering; 2024;24(01):41-52.

<sup>1</sup> Department of Imam Ali University, Tehran, Iran.

<sup>2</sup> Energy Systems, Khajeh Nasiruddin Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

### \*Correspondence

Address: Department of Imam Ali University, Tehran, Iran.

mirtabae@iamu.ac.ir

### Article History

Received: December 3, 2023

Accepted: February 28, 2024

ePublished: April 20, 2024

## ABSTRACT

Hydrogen is considered as a new source of energy. One of the most used methods of hydrogen gas production is water electrolysis. Electrolysis of water by an electrolyzer and by passing an electric current through water molecules, using an intercellular membrane causes the breakdown of water molecules into hydrogen and oxygen. If the intercellular membrane is removed, hydrogen gas and oxygen are mixed and hydroxy gas is produced. This gas, which includes hydrogen and oxygen molecules, has been considered as an auxiliary fuel. For this purpose, in this research, the design and construction of a multi-cell electrolyzer producing hydroxy gas without a membrane using 316 steel sheet has been discussed. To increase the conductivity of water, potassium hydroxide electrolyte was used, and solar panels with different powers were used to supply the required energy consumption of the electrolyzer. Then, by conducting various experiments, the application of this technology using solar energy has been investigated. The results of the tests show that each electrolyzer plate has a voltage of 2 to 3 volts and there must be a proper proportion between the number of electrolyzer plates and the voltage of the panels. The production per solar panel surface for the three studied conditions was obtained as 1919, 4542.5 and 6919 liters per square meter, respectively, which indicates that there are optimal values corresponding to the panel surface and the area of the electrolyzer plates, which leads to an optimal current passing. It becomes more appropriate from the device and its performance.

**Keywords** Multi-Cell Electrolyzer, Hydroxy Gas, Solar Panel, Intensity of Energy Consumption, Surface Density

## CITATION LINKS

1- Hydrogen and fuel cells ... 2- Research and development of ... 3- Alternative energy technologies. 4- The properties of hydrogen as ... 5- A comprehensive review on ... 6- A realizable renewable energy future. 7- Comparative assessment of hydrogen ... 8- Principle of generator HHO hybrid ... 9- Experimental comparison of pure ... 10- Hydrogen peroxide production by ... 11- Experimental validation of an HHO ... 12- Hydrogen evolution by plasma ... 13- A novel method of hydrogen ... 14- A Practical Guide to 'Free-Energy' Devices. 15- Effects of geometry of electrodes ... 16- Investigation of alkaline water ... 17- Design and performance evaluation of ... 18- Pulsed current water splitting ... 19- Karakteristik Performa Generator Oxyhydrogen ... 20- HHO gas generation in hydrogen ... 21- Experimental study, energy assessment ... 22- Analysis of onsite HHO gas generation system. 23- Novel hybrid system of pulsed ... 24- Parametric study and experimental ... 25- Design of HHO generators as producers of ... 26- PV integrated on-demand water ... 27- Educational electrolyzer prototype ... 28- Valorization of the waste heat given ...

## بررسی عملکرد الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با استفاده از سلول‌های خورشیدی

سید مصطفی میرطباطبایی<sup>۱\*</sup>، رضا شهرکی شهدآبادی<sup>۲</sup>

<sup>۱</sup> گروه مطالعات علوم مهندسی دانشگاه افسری امام علی (ع)، تهران، ایران  
<sup>۲</sup> سیستم‌های انرژی، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی، تهران، ایران

### چکیده

هیدروژن به‌عنوان یک منبع جدید انرژی به شمار می‌رود. یکی از روش‌های پرکاربرد تولید گاز هیدروژن، الکترولیز آب است. الکترولیز آب توسط الکترولایزر و با عبور جریان الکتریکی از میان مولکول‌های آب، با استفاده از یک غشا بین سلولی باعث تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن می‌شود. در صورتی‌که غشا بین سلولی حذف شود، گاز هیدروژن و اکسیژن مخلوط شده و گاز هیدروکسی تولید می‌شود. این گاز که شامل مولکول‌های هیدروژن و اکسیژن است به‌عنوان سوخت کمکی مورد توجه قرار گرفته است. به همین منظور در این پژوهش به طراحی و ساخت الکترولایزر چندسلولی تولیدکننده گاز هیدروکسی بدون غشا با استفاده از ورق استیل ۳۱۶ پرداخته شده است. برای افزایش رسانایی آب از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید استفاده شده و برای تأمین انرژی مصرفی مورد نیاز الکترولایزر از سلول خورشیدی با توان‌های مختلف استفاده گردید. سپس با انجام آزمایش‌های مختلف به‌کارگیری این فناوری با استفاده از انرژی خورشید مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که هر صفحه الکترولایزر دارای ولتاژ ۲ الی ۳ ولت است و باید تناسب لازم بین تعداد صفحات الکترولایزر و ولتاژ سلول وجود داشته باشد. تولید به‌ازای سطح سلول خورشیدی برای سه حالت مورد بررسی به ترتیب ۱۹۹، ۵۴۲/۵ و ۶۹۹ لیتر بر مترمربع به دست آمد که نشان‌دهنده این است که مقادیر بهینه‌ای متناسب با سطح سلول و مساحت صفحات الکترولایزر وجود دارد که منجر به عبور جریان بهینه‌ای از دستگاه و عملکرد مناسب‌تر آن می‌شود.

**کلیدواژه‌ها:** الکترولایزر چندسلولی، گاز هیدروکسی، سلول خورشیدی، شدت مصرف انرژی، چگالی سطحی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۹/۱۲

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۱۲/۰۹

\*نویسنده مسئول: mirtabae@iamu.ac.ir

### ۱- مقدمه

استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در چند سال گذشته به دلیل مصرف بیش از حد سوخت‌های فسیلی و آلودگی محیط‌زیست رو به افزایش بوده است [1]. همچنین بیشتر تحقیقات در چند سال گذشته در زمینه کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و یافتن جایگزینی مناسب برای آن بوده است [2]. هیدروژن یکی از بهترین سوخت‌هایی است که به دلیل بهره‌وری بالا و فراوانی زیاد می‌تواند جایگزین مناسبی سوخت‌های فسیلی باشد [3]. گاز هیدروژن به ندرت به‌عنوان یک عنصر در طبیعت یافت می‌شود اما به فراوانی در ترکیب کربن با هیدروکربن‌ها و آب یافت می‌شود و آسیبی به محیط زیست نیز وارد نمی‌کند [4, 5]. یکی از روش‌های تولید هیدروژن، الکترولیز آب است که هیچ گونه آلودگی منتشر نمی‌کند و به‌عنوان یک مسیر امیدوار کننده برای

تولید هیدروژن شناخته می‌شود [6]. از مزایای استفاده از هیدروژن به‌عنوان جایگزینی برای سوخت‌های فسیلی، می‌توان به بازدهی بالا، فراوانی، شکل‌های مختلف ذخیره‌سازی، حمل و نقل از راه دور و همچنین روش‌های مختلف برای تولید آن مانند گاززدایی زغال سنگ و بیومس، فرآیند ترموشیمیایی، فرآیند استخراج از گاز طبیعی و الکترولیز آب اشاره کرد [7]. تولید گاز هیدروژن توسط فرآیند تجزیه مولکول‌های آب به هیدروژن و اکسیژن به کمک انرژی الکتریکی انجام می‌شود. این فرآیند زمانی رخ می‌دهد که دو الکترود درون آب قرار گرفته و جریان مستقیم انرژی الکتریکی از بین دو الکترود عبور کند [8]. در الکترولایزرها از غشا نیمه تراوا برای جداسازی گاز هیدروژن و اکسیژن استفاده می‌شود، که در این صورت خروجی الکترولایزر هیدروژن خالص خواهد بود. اما با حذف غشا نیمه تراوا، جداسازی میان هیدروژن و اکسیژن انجام نمی‌شود و گاز هیدروکسی تولید می‌شود [9, 10]. در ادامه به بررسی پژوهش‌های دیگر محققان در زمینه تولید و استفاده از گاز هیدروکسی پرداخته خواهد شد.

تودور و همکارانش [11] در سال ۲۰۰۴ به اعتبار سنجی تجربی یک مدل CFD با مخلوط گاز هیدروکسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که شعله مخلوط گاز HHO در فشار اتمسفر رفتار خاصی دارد به دلیل سرعت اکسیداسیون عظیم هیدروژن که در نسبت استوکیومتری و بیشتر از قبل با اکسیژن مخلوط شده است. در کنار ناحیه اولیه، قابل مقایسه با طول با قطر نازل تزریق، این فرآیند در فضای ویژه‌ای برای تفکیک بخار آب با قطر نازل ۱۰ تا ۱۵ برابر ادامه می‌یابد. از یک منطقه احتراق ثانویه با طول بیشتر پیروی می‌کند که مقادیر دما حدود ۶۴۵ درجه سانتیگراد است. میزائو و همکارانش [12] در سال ۲۰۰۵ به بهینه‌سازی سطح الکترود، دمای الکترولیز پلاسما، دانسیته جریانی و ولتاژ ورودی با استفاده از الکترولیت  $K_2CO_3$  و استفاده از الکترولیز پلاسما پرداختند و به این نتیجه رسیدند که تولید هیدروژن با استفاده از فرآیند الکترولیز پلاسما به میزان ۸۰ برابر از الکترولیز معمولی بیشتر است. در تحقیقی دیگر که در سال ۲۰۰۶ توسط شیمیزو و همکارانش [13] با استفاده از روش پالسی انجام شد، به بررسی افزایش جریانی اعمالی به سلول، در زمان به کارگیری جریانی پالسی پرداخته شد که نتایج آن‌ها نشان داد افزایش جریانی اعمالی به سلول، باعث کاهش بازده سلول نخواهد شد. به علاوه، آنها به این نتیجه رسیدند که هرچه سیکل کاری پالس کوتاه‌تر باشد، بازده الکترولیز بالاتر خواهد بود و بیشترین راندمان به دست آمده توسط آنها ۴۴٪ بود. لائون [14] در سال ۲۰۱۰ با القای امواج مربعی DC با فرکانس حدود 40 کیلوهرتز، باعث افزایش بازده قابل توجه گاز هیدروکسی توسط الکترولایزر شد. وی به این نتیجه رسید که فرکانس رزونانس سلول‌های الکترولایزر بستگی به پارامترهای زیادی دارد و این فرکانس در هر الکترولایزر با

پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد بهینه ترین حالت برای تولید گاز هیدروکسی با غلظت ۵٪ و اعمال جریان ۱۵ آمپر است. همچنین با توجه به بهینه ترین حالت برای سیستم میزان تولید گاز هیدروکسی ۰/۱۰۲۸ لیتر بر دقیقه با بازده ۸۹/۱۳٪ است. سالک و همکارانش [21] در سال ۲۰۲۰ به بررسی اثرات شکل و فاصله الکترودها و تأثیرات فن آوری های بهبود امواج فراصوت، امواج پالس DC با فرکانس‌های مختلف و میدان مغناطیسی برای بهبود میزان تولید گاز هیدروکسی پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که با استفاده از روش پالس DC با فرکانس ۳۰۰ کیلو هرتز به سلول الکترولایزر، بالاترین میزان تولید گاز هیدروکسی، بازده انرژی و کمترین شدت انرژی در میان سایر فن آوری‌ها حاصل می شود. همچنین در تحقیقی دیگر که توسط سابرامانیان و همکارانش [22] در سال ۲۰۲۰ انجام شد، به محاسبه عددی و تجربی میزان تولید گاز هیدروکسی و تجزیه و تحلیل عملکرد الکترولایزر با القای جریان ۴۰ آمپر بر ساعت در دمای ۸۰ درجه سانتیگراد پرداخته شد. آنها با توجه به شرایط بیان شده به میزان تولید ۰/۷۵ لیتر در دقیقه دست یافتند و مدل عددی ارائه شده توسط آنها میزان تولید گاز هیدروکسی را با شرایط آزمایش اول میزان ۱/۳ لیتر بر دقیقه پیش‌بینی کردند. روند هر دو آزمایش و مدل برای تغییر در جریان و میزان تولید گاز هیدروکسی یکسان بود. همچنین تأثیر پارامترهایی مانند غلظت محلول الکترولیت بر پتانسیل، اثر زمان و تأثیر دما بر میزان تولید را ارائه دادند و انرژی مورد نیاز و تعداد ماژول‌ها یا واحدهای تولید گاز هیدروکسی مورد تجزیه و تحلیل قرار گرفته است. سالک و همکارانش [23] در سال ۲۰۲۰ یک سیستم هیبریدی جدید با استفاده از الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با روش پالسی و سپس تزریق گاز هیدروکسی تولیدی به موتور خودرو پرداختند. بررسی آن‌ها نشان داد که می‌توان انرژی مورد نیاز الکترولایزر را از خودرو تامین کرد. نتایج آن‌ها نشان داد که تزریق گاز هیدروکسی به موتور خودرو می‌تواند تا ۹۸٪ میزان مونوکسید کربن را کاهش دهد. کادی و همکارانش [24] در سال ۲۰۲۰ به بررسی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با صفحات استیل ۳۱۶ با ضخامت ۳ میلی‌متر و الکترولیت سدیم هیدروکساید و پتاسیم هیدروکساید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که افزایش ولتاژ از ۲ ولت به ۴ ولت باعث افزایش کارایی الکترولایزر تا ۵۱٪/۱۲ می‌شود اما در ولتاژهای بیشتر از ۴ کارایی الکترولایزر کاهش یافت. سپس با جریان ۶ آمپر میزان تولید گاز هیدروکسی را ۱۳۷ میلی لیتر در دقیقه و با شدت آمپر ۴۲ میزان تولید ۶۵۴ میلی لیتر در دقیقه است. همچنین آن‌ها بهینه ترین حالت را با غلظت ۵٪ و آمپر ۱۴ بیان کردند. جانا و همکارانش [25] در سال ۲۰۲۱ به بررسی الکترولایزر تولید کننده گاز هیدروکسی با جنس برنج و آلومینیوم با شدت جریان‌های ۲۰، ۳۰، ۴۰، ۵۰ آمپر پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که کمترین میزان تولید گاز

اندازه‌ها و مشخصات مختلف متفاوت است. در پژوهشی دیگر که توسط ماندال و همکارانش [15] در سال ۲۰۱۲ انجام شد، به آزمایش الکترواستوانه‌ای قلمی و صفحه‌ای و مقایسه راندمان مصرف انرژی و تولید هیدروژن در زمان بکارگیری هریک از الکترودها و همچنین مقایسه راندمان مصرف انرژی و تولید هیدروژن در زمان اعمال جریان پالسی پرداختند. نتایج آنها نشان داد که راندمان الکترولایزر به میزان ۲۵ تا ۳۰ درصد در هنگام استفاده از الکترودهای استوانه‌ای در مقایسه با الکترودهای صفحه‌ای افزایش می‌یابد و راندمان مصرف انرژی ۳۴٪ در زمان استفاده از تکنولوژی پالسی به جای جریان DC بیشتر می‌شود. کایا و همکارانش [16] در سال ۲۰۱۷ به بررسی یک الکترولایزر که از جنس استیل ۳۰۴ ساخته شده است، با استفاده از روش میدان مغناطیسی پرداختند. آن‌ها تأثیر غلظت میزان الکترولیت پتاسیم هیدروکساید را نیز مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که نیروی لورنتس اگر به سمت بالا باشد، تولید هیدروژن را برای ۵ درصد وزنی و ۱۵ درصد وزنی محلول پتاسیم هیدروکساید تقریباً ۱۷ درصد افزایش می‌دهد. افزایش چگالی جریان برای ۵٪ وزنی، ۱۰٪ وزنی و ۱۵٪ وزنی غلظت به ترتیب ۱۹٪، ۵٪، ۱۳٪ است اما اگر این نیرو به سمت پایین وارد شود، برای ۵ درصد وزنی، ۱۰ درصد وزنی و ۱۵ درصد وزنی غلظت پتاسیم هیدروکساید، تولید هیدروژن به ترتیب ۱۴ درصد، ۸ درصد و ۷ درصد کاهش می‌یابد. در تحقیقی دیگر که توسط چوی و همکارانش [17] در سال ۲۰۱۷ انجام شد، یک الکترولایزر ۲۰ سلولی با توان ۱ کیلووات که جنس صفحات مثبت از نیکل هیدروکسید و جنس صفحات منفی از فلزهایدراید است، ساخته شد. پس از انجام آزمایش‌ها، آنها به این نتیجه رسیدند که الکترودهای نازک و متخلخل شارژ الکتریکی بیشتری انتقال می‌دهند و تولید هیدروژن را ۲۵۹/۱ میلی لیتر به ازای هر وات ساعت گزارش کردند. امانوئل و همکارانش [18] در سال ۲۰۱۸ به استفاده از سیکل الکترو شیمیایی و تولید هیدروژن و اکسیژن در زمان‌های مختلف با اعمال جریان پالسی منقطع پرداختند و به این نتیجه رسیدند که بیشترین راندمان الکترولایزر با اعمال دانسیته جریانی ۰/۲ آمپر بر سانتی متر مربع رخ میدهد و زمان دستیابی به بیشترین راندمان، ولتاژ سلول برابر ۱/۶۹ ولت و دمای محلول ۲۵ درجه سانتی‌گراد در فرکانس ۵۰۰ هرتز اندازه گیری شده است. افندی و همکارانش [19] در سال ۲۰۱۹ به ساخت و بررسی یک الکترولایزر از جنس فولاد زنگ نزن با استفاده از کاتالیزور پتاسیم هیدروکساید پرداختند و به این نتیجه رسیدند که افزایش غلظت کاتالیزورهای پتاسیم هیدروکساید منجر به افزایش مصرف برق می‌شود و بالاترین راندمان تولید کننده گاز هیدروکسی ۵۴/۷۶٪ در غلظت ۷۰ گرم در لیتر کاتالیزور پتاسیم هیدروکساید است. روسدینساری و همکارانش [20] در سال ۲۰۱۹ به بررسی چگونگی تولید گاز هیدروکسی توسط الکترولایزر

تغذیه انرژی خورشیدی پرداخته شده است. برای افزایش رسانایی آب از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید با غلظت ۵٪ استفاده شده است و برای تأمین انرژی مصرفی مورد نیاز الکترولایزر از سه سلول خورشیدی که هر کدام دارای توان ۳۲۵ وات است، استفاده شده است. سپس گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولایزر اندازه‌گیری شده و تعداد صفحات بهینه، شدت مصرف انرژی، میزان تولید گاز هیدروکسی باتوجه به تابش روزانه، نمودار جریان ولتاژ و میزان تولید به‌ازای سطح گزارش شده است. همچنین الکترولایزر ساخته شده دارای ۲۱ صفحه است که مشخصات کامل‌تر آن در بخش بعد معرفی می‌گردد.

## ۲- توصیف سیستم

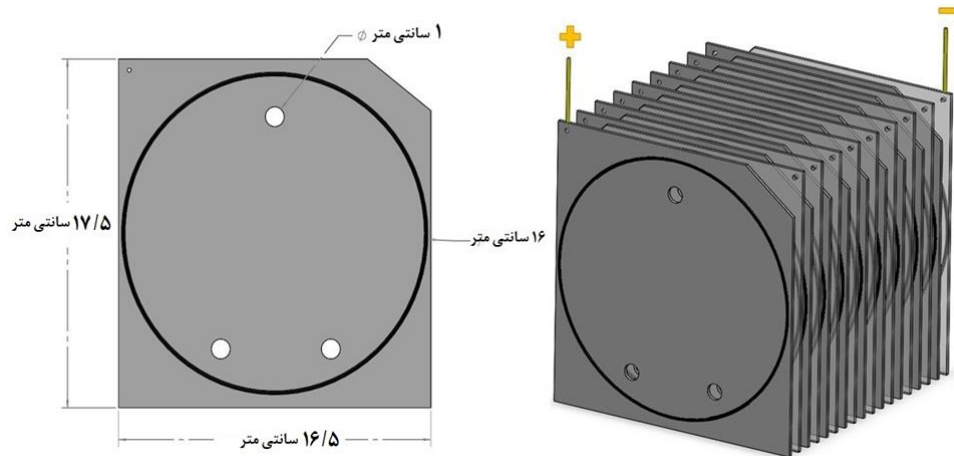
در شکل ۱ شماتیک الکترولایزر و صفحات آن نشان داده شده است. ابعاد صفحات الکترولایزر ۱۶/۵\*۱۷/۵ سانتی متر و صفحات آن از جنس استیل ۳۱۶ متخلخل با ضخامت ۲ میلی‌متر است که در شکل ۱ نشان داده شده است. این الکترولایزر از ۲۱ صفحه استیل تشکیل شده است که قابلیت تغییر تعداد صفحات از ۵ تا ۲۱ صفحه وجود دارد. برای جلوگیری از اتصال صفحات به یکدیگر، از اورینگ با ضخامت ۲ میلی‌متر به صورت دایره‌ای استفاده شده است. سپس توسط دو ورق ضخیم از جنس تفلون با ضخامت ۲ سانتی‌متر و با استفاده از پیچ‌های بلند طولی مجموعه صفحات به یکدیگر فشرده می‌شوند و الکترولایزر آب-بندی می‌شود. مطابق شکل ۲ نحوه عملکرد سیستم به این صورت است که مخلوط آب و پتاسیم هیدروکساید که در یک مخزن تهیه شده است از طریق اتصال به الکترولایزر از دو سوراخ پایینی در بین همه سلول‌ها پخش می‌شود و با برقراری جریان برق، گاز هیدروکسی تولید شده و از حفره بالایی صفحات خارج می‌شود. ورودی مخلوط آب و الکترولیت و همچنین خروجی گاز هیدروکسی هر دو وارد مخزن تعبیه شده در بالادست می‌شود. علت اتصال خروجی گاز به مخزن ورودی، احتمال برگشت الکترولیت همراه با گاز از خروجی بالا به ویژه در توان‌های بالا است. در بالای مخزن لوله خروجی گاز هیدروکسی تعبیه شده، که گاز از آنجا خارج و به سمت تجهیز اندازه‌گیری میزان تولید هدایت می‌شود. برای تأمین انرژی مورد نیاز الکترولایزر در این پژوهش از سلول‌های خورشیدی که مشخصات آنها در جدول ۱ ارائه شده است استفاده گردیده است. انرژی الکتریکی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی، با کابل به الکترولایزر منتقل می‌شود. برای اندازه‌گیری گاز هیدروکسی تولیدی از روش جمع کردن گاز استفاده شده است.

## ۳- شرایط انجام آزمایش

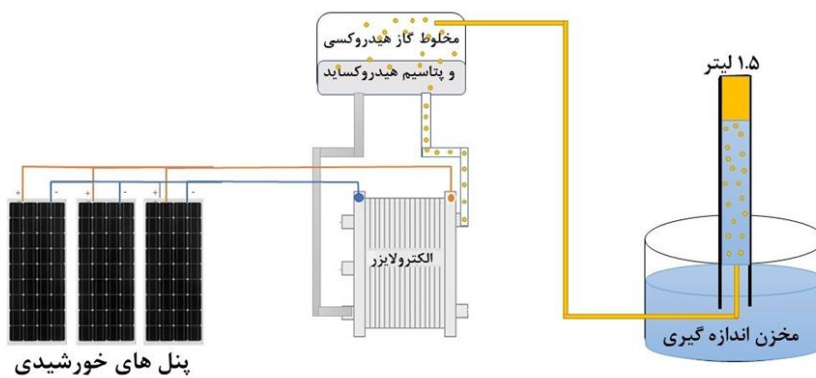
سلول‌های خورشیدی باتوجه به اینکه هیچ‌گونه آلودگی ندارند و

هیدروکسی با جریان ۲۰ آمپر و الکتروکود آلومینیومی 0/00033554 متر مکعب بر ثانیه است. از طرفی بیشترین میزان تولید مربوط به الکتروکود برنجی و جریان ۵۰ آمپر، 0/001657 متر مکعب بر ثانیه است. در تحقیقی دیگر که توسط احمد و همکارانش [26] در سال ۲۰۲۱ انجام شد، به ساخت الکترولایزر چند سلولی از جنس استیل ۳۱۶ پرداخته شد و با استفاده از سلول خورشیدی و کنترل شارژ توان مورد نیاز الکترولایزر تأمین گردید. نتایج نشان داد که به راحتی می‌توان از سلول خورشیدی برای فرآیند الکترولیز آب استفاده کرد و میزان تولید گاز هیدروکسی با جریان ۱۵ آمپر برابر ۳ لیتر در دقیقه خواهد بود. رزنده و همکارانش [27] در سال ۲۰۲۱ به ساخت یک الکترولایزر چند سلولی تولید کننده گاز هیدروکسی از جنس استیل ۳۱۶ پرداختند. آن‌ها تأثیر دو نوع الکترولیت پتاسیم هیدروکساید و سدیم هیدروکساید پرداختند. نتایج آن‌ها نشان داد که در شدت جریان‌های مساوی میزان تولید گاز هیدروکسی توسط الکترولیت پتاسیم هیدروکساید بیشتر از الکترولیت سدیم هیدروکساید است و همچنین دما صفحات الکترولایزر با استفاده از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید ۱۰ درجه سانتی‌گراد در شدت جریان‌های مساوی، بالاتر است. بیلپائو [28] در سال ۲۰۲۱ به بررسی یک الکترولایزر قلبی با استفاده از سیستم فتوولتائیک برای بهبود عملکرد در تولید هیدروژن در کشور شیلی پرداختند. هدف آن‌ها استفاده از پیش گرم کردن آب تغذیه ورودی به الکترولایزر توسط سلول‌های خورشیدی بود. نتایج آن‌ها نشان داد که با توجه به شرایط منطقه بررسی شده در کشور شیلی می‌توان دما آب ورودی برای الکترولایزر را در حدود ۸۰ درجه سانتی‌گراد حفظ کرد. عملکرد الکترولایزر در دمای ۸۰ درجه سانتی‌گراد در مقایسه با عملکرد در دمای متغیر باعث افزایش سالانه 0/22٪ تولید هیدروژن و به طور متوسط 0/33٪ در بازده الکترولایزر می‌شود. علاوه بر این، با در نظر گرفتن انرژی حرارتی به عنوان خروجی مفید سیستم که توسط الکترولایزر تولید می‌شود، بازده کلی انرژی به طور نسبی ۱۳ درصد افزایش می‌یابد.

بررسی پژوهش‌های دیگران در زمینه تولید گاز هیدروکسی با استفاده از فرآیند الکترولیز نشان می‌دهد که این فرآیند، روشی امیدوارکننده برای تولید گاز هیدروکسی و کاهش آلاینده‌ها و همچنین کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی خواهد بود. از طرفی تعداد کم پژوهش‌های انجام شده در زمینه تأمین انرژی مصرفی الکترولایزر با سلول‌های خورشیدی و عدم بررسی دقیق این نوع سیستم از طریق تناسب مشخصات سلول خورشیدی و سیستم الکترولایزر نشان از اهمیت این موضوع دارد که در این پژوهش به این موضوع مهم پرداخته خواهد شد. در همین راستا در این پژوهش به طراحی و ساخت الکترولایزر چندسلولی تولیدکننده گاز هیدروکسی با استفاده از ورق استیل ۳۱۶ ضدزنگ با منبع



شکل ۱) شماتیک الکترولایزر و صفحات آن



شکل ۲) شماتیک کلی سیستم

جدول ۱) مشخصات سلول‌های خورشیدی مورد استفاده

عنوان	نوع یا مقدار
نوع سلول‌ها	مونوکریستال
ابعاد سلول	۱*۲ متر
شرایط استاندارد تست	STC
بیشینه توان تولیدی	۳۲۵ وات
ولتاژ در نقطه بیشینه توان	۳۹/۶ ولت
جریان در نقطه بیشینه توان	۸/۲۵ آمپر
بازده مرجع	۱۸/۲٪
ولتاژ مدار باز	۴۵/۵
جریان مدار بسته	۸

#### ۴- پارامترهای عملکردی دستگاه

نحوه محاسبه توان سلول خورشیدی در رابطه ۱ نشان داده شده است.

$$P = V \times I \quad (1)$$

که در این رابطه  $v$  نشان‌دهنده ولتاژ سلول و  $I$  نشان دهنده آمپر سلول خورشیدی است. در رابطه ۲ نحوه محاسبه پارامتر تولید به ازای سطح نشان داده شده است.

$$PRA = \frac{GP}{A_{HHO, cell}} \quad (2)$$

که در این رابطه  $GP$  نشان‌دهنده میزان تولید گاز هیدروکسی و  $A_{HHO, cell}$  سطح صفحات به‌کاررفته در الکترولیزر است. در رابطه ۳ نحوه محاسبه چگالی توان نشان داده شده است.

$$PD = \frac{V \times I}{A_{Plate} \times Np} \quad (3)$$

در این رابطه  $V$  نشان‌دهنده ولتاژ مصرفی الکترولیزر،  $I$  نشان‌دهنده شدت جریان مصرفی الکترولیزر،  $A_{Plate}$  نشان‌دهنده مساحت هر یک از صفحات الکترولیزر و  $Np$  نشان‌دهنده تعداد صفحات الکترولیزر است. در رابطه ۴ نحوه محاسبه شدت مصرف انرژی الکترولیزر نشان داده شده است.

$$EI = \frac{I \times V}{GP \times 60} \quad (4)$$

در رابطه ۵ نحوه محاسبه راندمان سیستم خورشیدی استفاده شده در این پژوهش نشان داده شده است.

$$\eta = \frac{I \times V}{S \times A_{pv}} \quad (5)$$

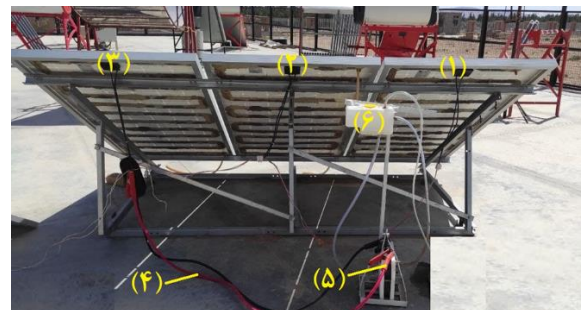
که  $S$  میزان شدت تابش خورشیدی و  $A_{pv}$  سطح سلول خورشیدی را نشان می‌دهد.

#### ۵- نتایج

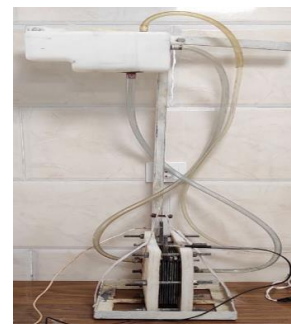
در این پژوهش جهت ارزیابی الکترولیزر و تأمین توان آن، از سلول‌های خورشیدی ۳۲۵ وات به‌صورت موازی استفاده شده است و همچنین جهت اطمینان از صحت نتایج، هر آزمایش ۳ بار تکرار شده و نتایج آن ثبت گردیده است. آزمایش‌ها در دو حالت انجام شده است. دسته اول آزمایش‌ها با تابش تقریباً ثابت خورشید و در ساعات میانی روز بوده و دسته دوم آزمایش‌ها به‌صورت روزانه انجام شده است که در ادامه نتایج در دو بخش جداگانه ارائه می‌گردد.

۵-۱- نتایج تست‌های با تابش ثابت (  $1000 \pm 25$  وات بر متر مربع) این آزمایش‌ها در ساعات میانی روز که تابش خورشید بر روی سطح سلول‌ها تقریباً ثابت بوده است (نوسان کمتر از ۲/۵٪) انجام شده است. متغیر اصلی در این آزمایش‌ها تعداد صفحات الکترولیزر و تعداد سلول‌های خورشیدی بوده است. بدین صورت که تعداد صفحات الکترولیزر از ۵ تا ۲۱ صفحه و تعداد سلول‌ها نیز یک، دو و سه سلول (در حالت موازی) مورد آزمایش قرار گرفته است.

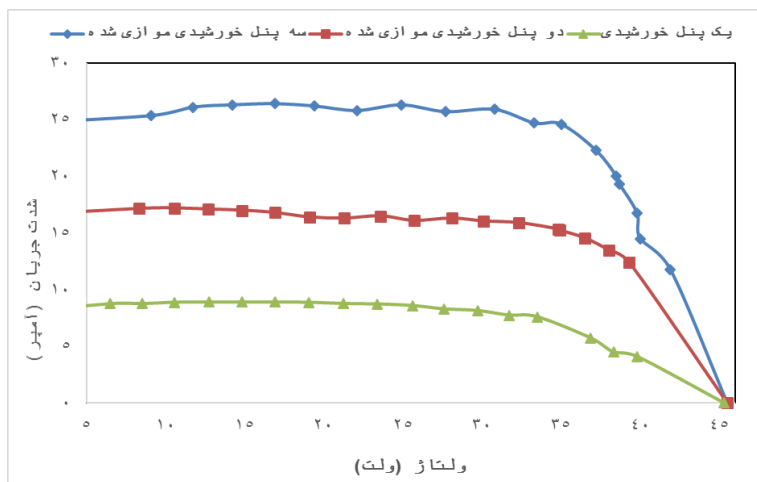
مصرف سوخت ندارند، می‌توانند در جهت تولید گاز هیدروکسی پاک مورد استفاده قرار گیرند. به همین منظور در این پژوهش برای تأمین انرژی الکتریکی موردنیاز الکترولیزر از سلول‌های خورشیدی با استفاده شده است. بیشترین توان تأمین شده توسط سلول‌های خورشیدی حدود ۱ کیلووات است که با استفاده از سه سلول تأمین می‌شود. در شکل ۳ تصویری از سیستم آزمایشگاهی نصب شده نشان داده شده است. در این شکل سلول خورشیدی با شماره‌های ۱، ۲ و ۳ نشان داده شده است. سپس انرژی الکتریکی تولید شده توسط سلول‌های خورشیدی توسط کابل‌های مخصوص (شماره ۴) نشان داده است، به الکترولیزر (شماره ۵) منتقل می‌شود. الکترولیزر با مصرف انرژی الکتریکی می‌تواند پیوند بین مولکول‌های آب را شکسته و سپس گاز هیدروکسی تولید می‌شود. این گاز وارد مخزن پتاسیم هیدروکساید که در شکل ۳ با شماره ۶ نشان داده شده، می‌شود و توسط لوله‌ای که در بالا مخزن تعبیه شده گاز هیدروکسی خارج خواهد شد. همچنین مطابق شکل ۲ در این پژوهش برای اندازه‌گیری گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولیزر، از یک استوانه مدرج پرازآب که این استوانه مدرج، داخل یک مخزن آب قرار دارد، استفاده شده است. گاز هیدروکسی تولیدی توسط الکترولیزر با استفاده از شلنگ به درون بشر پرازآب منتقل می‌شود و با گذشت زمان گاز هیدروکسی جایگزین آب درون بشر خواهد شد و مدت زمان پر شدن بشر توسط گاز هیدروکسی اندازه‌گیری می‌شود.



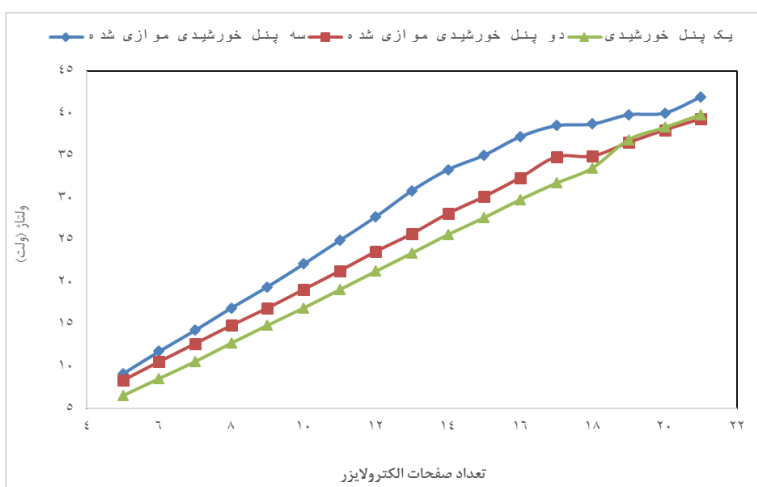
شکل ۳) تصویری از الکترولیزر تولیدکننده گاز هیدروکسی متصل به سلول‌های خورشیدی



شکل ۴) نمای نزدیک الکترولیزر



شکل ۵) نمودار شدت جریان مصرفی بر حسب ولتاژ برای حالت های مختلف

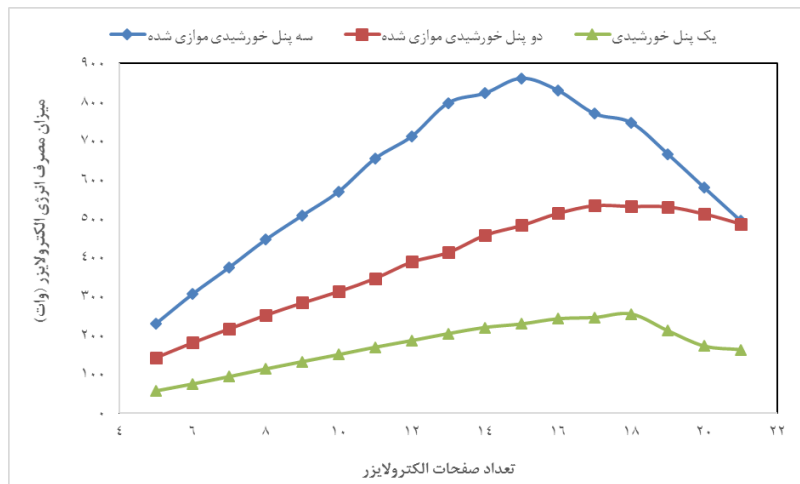


شکل ۶) نمودار ولتاژ مصرفی الکترولایزر بر حسب تعداد صفحات

به صورت سری، ولتاژ سلول‌ها با هم جمع می‌شود. در شکل ۶ نمودار ولتاژ مصرفی الکترولایزر بر حسب تعداد صفحات الکترولایزر نشان داده شده است. نتایج آزمایش‌ها نشان می‌دهد که افزایش تعداد صفحات الکترولایزر به طور تقریباً خطی باعث افزایش ولتاژ مصرفی الکترولایزر می‌شود. همچنین مشاهده می‌شود که در تعداد صفحات ۲۱، ولتاژ مصرفی الکترولایزر در حدود ۴۰ الی ۴۲ ولت است. با توجه به تحلیل ارائه شده برای شکل ۵، باید توان تولیدی سلول‌ها که برابر با توان مصرفی الکترولایزر است را مورد بررسی قرار داد. لازم به ذکر است که هر سلول دارای توان بیشینه نامی ۳۲۵ وات است که شدت جریان مدار باز آن ۷/۹ آمپر و ولتاژ مدار باز آن نیز ۴۵/۳ ولت است. در شکل ۷ نمودار توان مصرفی الکترولایزر که حاصل ضرب جریان در ولتاژ است، بر حسب تعداد صفحات به کار رفته در الکترولایزر برای تعداد سلول‌های خورشیدی مختلف نشان داده شده است. همانطور که پیش بینی می‌شد توان بدست آمده دارای نقطه بیشینه ای می‌باشد.

در شکل ۵ نمودار شدت جریان مصرفی الکترولایزر بر حسب ولتاژ (که در واقع همان ولتاژ و جریان تولیدی سلول‌ها است) برای سه حالت شامل یک سلول خورشیدی، دو سلول خورشیدی موازی و سه سلول خورشیدی موازی نشان داده شده است. الکترولایزر همانند یک مقاومت متغیر عمل می‌کند. یعنی هر نقطه بر روی نمودار متناسب با تعداد صفحات مشخصی برای الکترولایزر است. لذا الکترولایزر در نقش یک مقاومت متغیر در مدار خورشیدی عمل می‌کند. لذا مشاهده می‌شود که نمودار شکل ۵ شباهت زیادی به نمودارهای ولتاژ-آمپر سلول‌های خورشیدی دارد. به عبارت دیگر با تغییر تعداد صفحات الکترولایزر نمودارهای ولتاژ-آمپر سلول‌ها در حالت تست واقعی بدست آمده است. لذا انتظار می‌رود که مقدار بهینه ای برای تعداد صفحات وجود داشته باشد که توان بیشینه از سلول‌ها بدست آید.

اختلاف ولتاژ دو صفحه هر یک از سلول‌های الکترولایزر بین 1/9 الی ۳ ولت متغیر است و سلول‌ها به صورت سری نسبت به یکدیگر قرار دارند؛ لذا با افزایش تعداد صفحات الکترولایزر



شکل ۷) نمودار توان مصرفی کاتولایزر بر حسب تعداد صفحات به کار رفته در کاتولایزر

### ۵-۲- نتایج تست‌های روزانه

باتوجه به نتایج تست‌های با تابش ثابت، تعداد صفحات بهینه کاتولایزر برای داشتن بیشترین تولید گاز هیدروکسی در سه حالت به‌کارگیری سه، دو و یک سلول خورشیدی به ترتیب ۱۵، ۱۷ و ۱۸ صفحه است. در همین راستا جهت بررسی سیستم کاتولایزر خورشیدی به‌صورت روزانه، از تعداد صفحات بهینه فوق استفاده شده است.

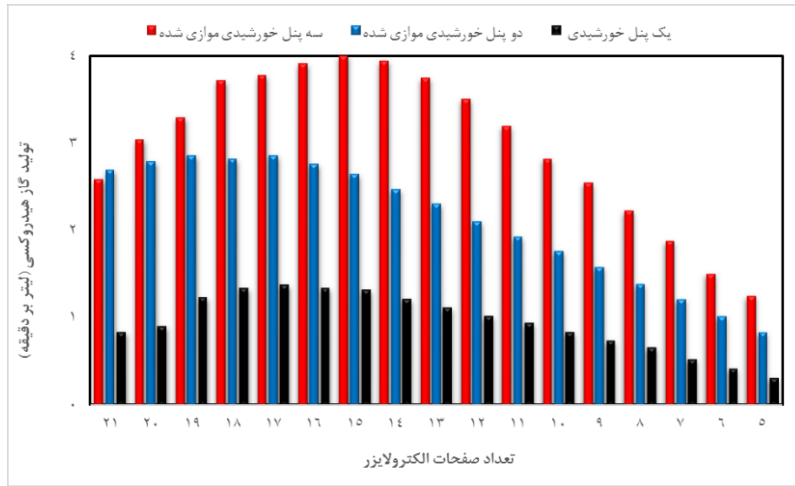
در جدول ۲ پارامترهای مختلف مانند تعداد صفحات بهینه، توان ماکزیمم خروجی از سلول‌های خورشیدی، میزان تولید گاز هیدروکسی و راندمان نشان داده شده است. همچنین شدت تابش خورشیدی در هر سه حالت برابر با  $1000 \pm 25$  وات است. در این جدول علاوه بر پارامترهای ذکر شده در بخش‌های قبل بازده سیستم خورشیدی نیز ارائه شده است.

تست‌های روزانه در تابستان و در اواسط خردادماه انجام شده است. در شکل ۹ نمودار تابش روزانه و دمای محیط در شهر شاهرود با طول جغرافیایی  $36/1467$  و ارتفاع از سطح دریا  $1345$  متر در کشور ایران نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که بیشینه تابش در این روز برابر  $1030$  وات بر متر مربع بوده است. همچنین دمای محیط نیز با توجه به مدت زمان انجام آزمایش، قبل از ظهر روندی صعودی داشته بعد از ظهر تقریباً ثابت بوده است. لازم به ذکر است که این اطلاعات با استفاده از پیرانومتر و دماسنج جهت ثبت تابش خورشید و دما محیط مورد استفاده قرار گرفته است.

در شکل ۱۰ نمودار توان تولید سلول‌ها که برابر با توان مصرفی کاتولایزر است بر حسب زمان نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که در ساعاتی که تابش خورشید بیشتر می‌شود، توان خروجی از سلول خورشیدی نیز بیشتر شده و در نتیجه توان مصرفی کاتولایزر و تولید گاز هیدروکسی نیز افزایش خواهد یافت.

نتایج آزمایشات نشان می‌دهد که در حالتی که سه سلول خورشیدی با هم موازی شده، بیشترین توان مصرفی کاتولایزر با ۱۵ صفحه بدست می‌آید. همچنین برای دو سلول خورشیدی موازی شده و یک سلول خورشیدی به ترتیب تعداد صفحات بهینه برابر ۱۷ و ۱۸ عدد است و به عبارتی می‌توان بیشترین توان را از سلول خورشیدی برای تولید گاز هیدروکسی دریافت کرد. از آنجاکه در هر حالت میزان تولید گاز هیدروکسی توسط دستگاه اندازه‌گیری شده است، در شکل ۸ نمودار میزان تولید این گاز بر حسب تعداد صفحات کاتولایزر برای تعداد سلول‌های مختلف نشان داده شده است. همانطور که انتظار می‌رود بیشترین میزان تولید گاز هیدروکسی در نقطه با بیشترین توان تولیدی سلول است. در حالت ۳ سلول خورشیدی موازی بیشترین توان مصرفی کاتولایزر در ۱۵ صفحه رخ می‌دهد که بیشترین میزان تولید گاز هیدروکسی نیز در این حالت رخ می‌دهد که برابر ۴ لیتر بر دقیقه است. اما در حالت دو سلول خورشیدی موازی بیشترین میزان تولید گاز هیدروکسی و توان مصرفی کاتولایزر در ۱۷ صفحه رخ می‌دهد که برابر  $2/85$  لیتر بر دقیقه است. همچنین برای یک سلول خورشیدی میزان تولید گاز هیدروکسی در بیشترین توان مصرفی که با ۱۸ صفحه رخ می‌دهد،  $1/37$  لیتر بر دقیقه است. نتیجه مهم اینکه در کاتولایزر خورشیدی باید متناسب با سیستم خورشیدی، تعداد صفحات مناسب کاتولایزر انتخاب شود تا در نقطه بیشینه تولید از سلول‌ها استفاده شود. از سوی دیگر چنانچه هندسه کاتولایزر مشخص باشد، باید سیستم خورشیدی دارای ولتاژ و جریان مناسبی برای آن انتخاب نمود. به عنوان مثال مطابق شکل ۸ مشاهده می‌شود که برای کاتولایزر با ۲۱ صفحه استفاده از ۲ سلول خورشیدی  $325$  وات تولید بالاتری نسبت به حالت ۳ سلول خورشیدی داشته است. افزایش شدت جریان مصرفی کاتولایزر باعث افزایش دما صفحات و افزایش میزان تلفات خواهد شد.

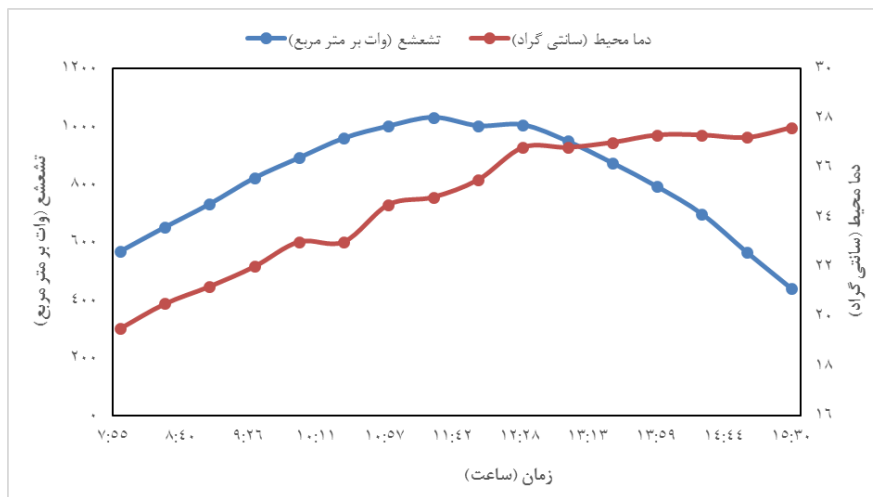




شکل ۸) نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب تعداد صفحات الکترولایزر

جدول ۲) جدول پارامترهای سیستم در نقطه بهینه عملکردی با تابش ثابت ۱۰۰۰ وات

	یک سلول خورشیدی	دو سلول خورشیدی موازی شده	سه سلول خورشیدی موازی شده
تعداد صفحات بهینه الکترولایزر	۱۸	۱۷	۱۵
مصرف انرژی (وات)	۲۵۵	۵۳۴	۸۶۱
تولید گاز هیدروکسی (لیتر بر دقیقه)	۱/۴۷	۲/۸۵	۴
شدت مصرف انرژی (وات-ساعت بر لیتر)	۳/۱۸۲۵	۳/۱۱۶۰۵	۳/۵۸۷۵
راندمان سیستم خورشیدی (%)	۱۲/۷۳	۱۳/۳۵	۱۴/۳۵



شکل ۹) نمودار تابش روزانه در شهر شاهرود در کشور ایران

جدول ۳) خلاصه عملکرد روزانه سیستم

مشخصات الکترو لایزر	دو سلول		سه سلول
	خورشیدی موازی شده	خورشیدی موازی شده	خورشیدی موازی شده
مصرف انرژی (وات ساعت)	۱۶۶۰	۳۶۳۳	۵۱۵۵
تولید روزانه بر حسب لیتر	۱۰۵۷	۲۳۶۳	۳۱۷۶
شدت مصرف انرژی (وات ساعت بر لیتر)	۲/۹۲۹۹۷۲	۲/۱۷۶۲۵۴	۳/۰۴۴۰۹۵
تولید به ازای سطح بر حسب لیتر	۱۹۱۹	۴۵۴۲/۵	۶۹۱۹
راندمان سیستم خورشیدی (%)	۱۲/۸۱۳۷۹	۱۳/۹۱۹۵۲	۱۳/۱۲۵۵۳

### ۶- نتیجه گیری

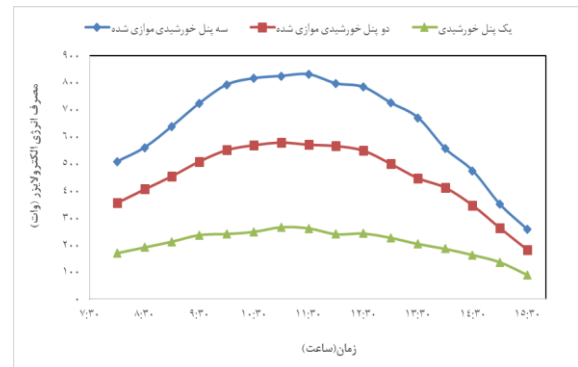
در این پژوهش به ارزیابی و ساخت الکترو لایزر چند سلولی تولیدکننده گاز هیدروکسی ساخته شده از ورق استیل ۳۱۶ با منبع انرژی سلول‌های خورشیدی پرداخته شده است. برای افزایش رسانایی آب از الکترولیت پتاسیم هیدروکساید با غلظت ۵٪ استفاده شده است. نتایج نشان می‌دهد شدت جریان مصرفی الکترو لایزر و ولتاژ مصرفی آن به یکدیگر وابسته هستند. از طرفی با افزایش تعداد صفحات الکترو لایزر با اتصال سری، ولتاژ مصرفی آن نیز به طور تقریباً خطی افزایش پیدا می‌کند و هر صفحه الکترو لایزر توانایی مصرف ۲ الی ۳ ولت را دارد، اما برای شدت جریان در هر صفحه محدودیتی وجود ندارد. مشاهده گردید تولید گاز هیدروکسی کاملاً وابسته به توان داده شده به الکترو لایزر بوده و متناسب با آن تغییر می‌کند.

آزمایش‌ها در دو حالت انجام شده است. حالت اول تابش خورشید تقریباً ثابت بوده و در حالت دوم سیستم به صورت روزانه مورد ارزیابی قرار گرفته است. در بخش اول آزمایش‌ها (تابش ثابت) تعداد سلول‌های خورشیدی از یک تا ۳ سلول تغییر داده شد. توان بیشینه دریافت شده توسط الکترو لایزر به ترتیب ۲۶۶، ۵۷۸ و ۸۳۰ وات بوده که میزان تولید گاز هیدروکسی در این سه حالت به ترتیب ۱/۳۷، ۲/۸۵ و ۴ لیتر بر دقیقه بوده است.

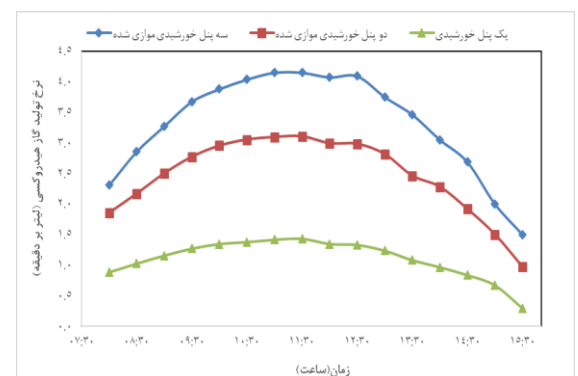
نتایج نشان می‌دهد که توان مصرفی الکترو لایزر در بیشترین حالت به ترتیب با سه سلول خورشیدی موازی، دو سلول خورشیدی و یک سلول خورشیدی برابر ۸۳۰، ۵۷۸ و ۲۶۶ وات می‌رسد.

در شکل ۱۱ نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب زمان نشان داده شده است. مشاهده می‌شود که با افزایش تعداد سلول‌ها میزان تولید گاز هیدروکسی نیز بیشتر می‌شود اما این افزایش در استفاده از دو سلول نسبت به یک سلول بیشتر از ۳ سلول نسبت به دو سلول می‌باشد. بیشینه میزان تولید گاز هیدروکسی با سه، دو و یک سلول خورشیدی به ترتیب برابر ۴، ۳/۱ و ۱/۴۲ لیتر بر دقیقه می‌باشد که در زمان اوج تابش خورشید رخ می‌دهد. همچنین کل تولید در سه حالت ذکر شده به ترتیب برابر ۱۶۰۰، ۱۲۰۰، ۵۳۰ لیتر گاز هیدروکسی بوده است.

در جدول ۳ میانگین پارامترهای مختلف به صورت روزانه نشان داده شده است. آزمایشات روزانه با توجه به تعداد صفحات بهینه انتخاب شده در جدول ۲ برای الکترو لایزر انجام شده است. مشاهده می‌شود که در حالتی که دو سلول خورشیدی با یکدیگر موازی هستند میزان شدت مصرف انرژی و راندمان سیستم خورشیدی نسبت به دو حالت دیگر بهینه تر است. از طرفی میزان تولید گاز هیدروکسی با افزایش توان مصرفی افزایش می‌یابد.



شکل ۱۰) نمودار توان مصرفی الکترو لایزر بر حسب زمان



شکل ۱۱) نمودار میزان تولید گاز هیدروکسی بر حسب زمان

2- Hijikata T. Research and development of international clean energy network using hydrogen energy (WE-NET). *International journal of hydrogen energy*. 2002 Feb 1;27(2):115-29.

3- Dresselhaus MS, Thomas IL. Alternative energy technologies. *Nature*. 2001 Nov 15;414(6861):332-7.

4- Momirlan M, Veziroglu TN. The properties of hydrogen as fuel tomorrow in sustainable energy system for a cleaner planet. *International journal of hydrogen energy*. 2005 Jul 1;30(7):795-802.

5- Carmo M, Fritz DL, Mergel J, Stolten D. A comprehensive review on PEM water electrolysis. *International journal of hydrogen energy*. 2013 Apr 22;38(12):4901-34.

6- Turner JA. A realizable renewable energy future. *Science*. 1999 Jul 30;285(5428):687-9.

7- Acar C, Dincer I. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *International journal of hydrogen energy*. 2014 Jan 2;39(1):1-2.

8- Sudrajat A, Handayani EM, Tamaldin N, Yamin AK. Principle of generator HHO hybrid multistack type production technologies to increase HHO gas volume. *InSHS Web of Conferences 2018 (Vol. 49, p. 02016)*. EDP Sciences.

9- Baltacioglu MK, Arat HT, Özcanli M, Aydin K. Experimental comparison of pure hydrogen and HHO (hydroxy) enriched biodiesel (B10) fuel in a commercial diesel engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2016 May 25;41(19):8347-53.

10- Drogui P, Elmaleh S, Rumeau M, Bernard C, Rambaud A. Hydrogen peroxide production by water electrolysis: Application to disinfection. *Journal of applied electrochemistry*. 2001 Aug;31:877-82.

11- Prisecaru T, Dica C, Teodorescu M, Prisecaru M, Mihaescu L, Berbece V. Experimental validation of an HHO gas cutting flame CFD model. *Technology*. 2004;46:41-7.

12- Mizuno T, Akimoto T, Azumi K, Ohmori T, Aoki Y, Takahashi A. Hydrogen evolution by plasma electrolysis in aqueous solution. *Japanese Journal of Applied Physics*. 2005 Jan 11;44(1R):396.

13- Shimizu N, Hotta S, Sekiya T, Oda O. A novel method of hydrogen generation by water electrolysis using an ultra-short-pulse power supply. *Journal of applied electrochemistry*. 2006 Apr;36:419-23.

14- Kelly P. A Practical Guide to 'Free-Energy' Devices.

15- Mandal B, Sirkar A, Abhra SH, Parameswar DE, Ray PS. Effects of geometry of electrodes and pulsating DC input on water splitting for production of hydrogen. *International Journal of Renewable Energy Research*. 2012 Mar 28;2(1):99-102.

16- Kaya MF, Demir N, Albawabiji MS, Taş M. Investigation of alkaline water electrolysis performance for different cost effective electrodes under magnetic field. *International Journal of hydrogen energy*. 2017 Jul 13;42(28):17583-92.

17- Choi B, Panthi D, Nakoji M, Tsutsumi K, Tsutsumi A. Design and performance evaluation of a novel 1 kW-class hydrogen production/power generation system. *Applied energy*. 2017 May 15;194:296-303.

18- Vincent I, Choi B, Nakoji M, Ishizuka M, Tsutsumi K, Tsutsumi A. Pulsed current water splitting

الکترولیزر مانند یک مقاومت خارجی در مدار سیستم خورشیدی عمل نموده و با تغییر تعداد صفحات نمودار ولتاژ - آمپر سلول - های خورشیدی به دست می‌آید. برای قرارگرفتن سلول‌ها در نقطه بیشینه تولید توان باید تعداد صفحات الکترولیزر به‌دقت انتخاب شود. تعداد صفحات بهینه در حالت به‌کارگیری یک، دو و سه سلول خورشیدی به ترتیب برابر ۱۸، ۱۷ و ۱۵ صفحه است.

همچنین نتایج شدت مصرف انرژی نشان می‌دهد که میزان شدت مصرف انرژی برای حالت‌های یک سلول خورشیدی و دو سلول خورشیدی موازی شده مقدار تقریباً یکسانی را دارد؛ اما میزان شدت مصرف انرژی برای سه سلول خورشیدی موازی شده بالاتر از حالت‌های دیگر است که علت این موضوع می‌تواند افزایش دمای الکترولیزر به دلیل عبور جریان بالاتر الکتریسیته باشد. با افزایش دمای الکترولیزر بخشی از توان خورشیدی دریافت شده به حرارت تبدیل شده و لذا توان خالص مصرفی جهت تولید گاز هیدروکسی کاهش پیدا می‌کند.

نتایج آزمایش‌های روزانه نشان داد که تولید کاملاً وابسته به توان دریافتی از خورشید بوده و منطبق بر نمودار تابش روزانه تغییر می‌کند. مشاهده گردید که تولید روزانه دستگاه در استفاده از یک، دو و سه سلول خورشیدی به ترتیب 1057، 2363 و 3176 می باشد و تولید به ازای سطح سلول برای این سه حالت نیز ۱۹۱۹، ۴۵۴۲/۵ و ۶۹۱۹ بوده که نشان دهنده عملکرد بهتر سیستم در استفاده از دو سلول می باشد. با افزایش تعداد سلول‌ها جریان عبوری از سیستم بالاتر رفته که موجب افزایش تلفات آن نیز می شود. لذا در بررسی بازده خورشیدی سیستم نیز مشاهده گردید که بازده در حالت استفاده از دو سلول بیشتر از حالت‌های دیگر بوده است.

به‌طورکلی در طراحی یک سیستم الکترولیزر خورشیدی تعداد صفحات باید متناسب با مشخصات سلول‌ها انتخاب گردد تا ولتاژ مصرفی الکترولیزر نزدیک به ولتاژ نامی سلول‌های خورشیدی باشد. از سوی دیگر جهت کاهش تلفات سیستم باید جریان عبوری از الکترولیزر به نحوی کنترل گردد که دمای الکترولیزر خیلی بالاتر از دمای محیط نباشد.

**تاییدیه اخلاقی:** محتویات علمی این مقاله حاصل پژوهش نویسندگان است و در هیچ نشریه ایرانی و غیر ایرانی منتشر نشده است.

**تعارض منافع:** در این مقاله هیچگونه تعارض منافی برای اظهار وجود ندارد.

## منابع

1- Edwards PP, Kuznetsov VL, David WI, Brandon NP. Hydrogen and fuel cells: Towards a sustainable energy future. *Energy policy*. 2008 Dec 1;36(12):4356-62.

- electrochemical cycle for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018 May 31;43(22):10240-8.
- 19- Efendi S, Nurisma RA. Karakteristik Performa Generator Oxyhydrogen Tipe Dry Cell dengan Penambahan Katalis Kalium Hidroksida. In *Prosiding SENTIKUIN (Seminar Nasional Teknologi Industri, Lingkungan dan Infrastruktur)* 2019 Nov 14 (Vol. 2, pp. A3-1).
- 20- Bow Y, Dewi T. HHO gas generation in hydrogen generator using electrolysis. In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* 2019 Apr 1 (Vol. 258, No. 1, p. 012007). IOP Publishing.
- 21- Salek F, Zamen M, Hosseini SV. Experimental study, energy assessment and improvement of hydroxy generator coupled with a gasoline engine. *Energy Reports*. 2020 Nov 1;6:146-56.
- 22- Subramanian B, Thangavel V. Analysis of onsite HHO gas generation system. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020 May 21;45(28):14218-31.
- 23- Salek F, Zamen M, Hosseini SV, Babaie M. Novel hybrid system of pulsed HHO generator/TEG waste heat recovery for CO reduction of a gasoline engine. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2020 Sep 3;45(43):23576-86.
- 24- El Kady MA, Farrag AE, Gad MS, El Soly AK, Hashish HA. Parametric study and experimental investigation of hydroxy (HHO) production using dry cell. *Fuel*. 2020 Dec 15;282:118825.
- 25- Jannah Z, Susilo SH. Design of HHO generators as producers of water fuel (HHO generator product analysis based on electric current and catalyst). In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021 Feb 1 (Vol. 1073, No. 1, p. 012034). IOP Publishing.
- 26- Ahmad MS, Butt TZ, Pandey AK, Abd Rahim N. PV integrated on-demand water electrolysis system for HHO generation and its application as primary fuel in combustion. In *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 2021 Mar 1 (Vol. 1127, No. 1, p. 012022). IOP Publishing.
- 27- de Almeida Rezende L, de Campos VA, Silveira JL, Tuna CE. Educational electrolyzer prototype: Improving engineering students' knowledge in renewable energies. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Apr 26;46(29):15110-23.
- 28- Bilbao DC. Valorization of the waste heat given off in a system alkaline electrolyzer-photovoltaic array to improve hydrogen production performance: Case study Antofagasta, Chile. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2021 Sep 3;46(61):31108-21.