



## ساخت نمونه آزمایشگاهی سیستم هیبریدی انرژی بادی - پیل سوختی با تأمین هیدروژن به روش الکترولیز و تحلیل فنی آن

علیرضا زاهدی<sup>1\*</sup>، سید امیرعلی امیرخلیلی<sup>2</sup>، علی غفاری نژاد<sup>3</sup>

1- استادیار، مهندسی سیستم انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

2- کارشناس ارشد، مهندسی سیستم انرژی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

3- استادیار، الکتروشمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

\* zahediar@iust.ac.ir ، 1184613114 صندوق پستی تهران

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل  
دریافت: 14 شهریور 1395  
پذیرش: 12 آبان 1395  
ارائه در سایت: 28 آذر 1395

کلید واژگان:

توربین بادی

الکترولیز

هیدروژن

پیل سوختی

ذخیره سازی انرژی

### چکیده

کاهش منابع انرژی‌های فسیلی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای روز به روز نیاز به منابع پاک و لایزال انرژی را بیشتر می‌کند. یکی از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر انرژی بادی است که در سال‌های اخیر همواره در حال توسعه بوده است. نیروگاه‌های بادی گاه‌ها در ساعات پیک مصرف جوابگو نیستند، لذا یک سیستم ذخیره‌سازی توان و پشتیبان برای این نیروگاه‌ها ضروری به نظر می‌رسد. در این پژوهش تلاش شده است تا یک سیستم هیبریدی برای اتصال به نیروگاه بادی، جهت تأمین توان قابل اطمینان و همچنین تولید محصولات جانبی بارزش ارائه گردد. سیستم هیبریدی که در این پژوهش معرفی شده متشکل از چهار جزء اصلی است: توربین بادی، الکترولیزر، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی. سازوکار سیستم به این صورت است که در ساعات کم باری، توان اضافی تولید شده توسط توربین بادی وارد واحد الکترولیز شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود. هیدروژن و اکسیژن تبدیل شده فشرده شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌شوند. این گازها در ساعات پیک مصرف برای تولید برق وارد پیل سوختی می‌گردند تا تقاضای برق شبکه ارضا شود. در این پژوهش ابتدا با ساخت یک نمونه آزمایشگاهی سیستم هیبریدی مذکور میزان تولید هیدروژن توسط الکترولیز قلیایی و میزان تولید توان توسط پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی شد. بیشترین میزان هیدروژن تولیدی توسط این سیستم در هر ساعت به طور متوسط 304 میلی‌لیتر بود. در نتیجه میزان توان تولیدی توسط پیل سوختی 1008 mW محاسبه شد. پس از ساخت نمونه آزمایشگاهی، مطالعه موردی برای سیستم مورد نظر در منطقه کوهین انجام شد.

## Lab Scale Production of Wind Power-Fuel Cell Hybrid Systems by Use of Electrolysis Process and Study of Technical Analysis

Ali Reza Zahedi<sup>\*1</sup>, Seyed Amirali Amirkhali<sup>1</sup>, Ali Ghaffari Nejad<sup>2</sup>

1- School of New Technologies, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

2- Department of Chemistry, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran

\* P.O.B. 1184613114 Tehran, Iran, zahediar@iust.ac.ir@address.ac.ir

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper  
Received 04 September 2016  
Accepted 02 November 2016  
Available Online 18 December 2016

Keywords:  
Wind turbine  
Electrolyze  
Hydrogen  
fuel cell  
energy storage

### ABSTRACT

Wind has become one of the developing sources of renewable energy in recent years. Wind power is often unusable at peak times. Therefore, a storage system or backup power is always necessary. In this study, a hybrid system is presented for a wind farm to provide the reliable power. The hybrid system consists of four main components: a wind turbine, electrolyzer, hydrogen storage and fuel cell. The mechanism of this system is that the extra electricity produced in fewer demand hours by wind turbines is conducted to a hydrogen and oxygen generator system. Hydrogen and oxygen are compressed and stored in special tanks. Then, hydrogen is introduced to a fuel cell unit in order to produce electricity at peak times (when the electricity produced by wind power is less than demand). The hydrogen production rate by alkaline electrolysis as well as the electricity production by PEM fuel cell was investigated. The maximum hydrogen produced by the system per hour average was 304 ml and the power produced by the fuel cell was 1008 MW. After the construction of the prototype, a case study for this system was done in the Kouhin area.

### 1- مقدمه

افزایش است و اگر الگوی جاری مصرف انرژی تغییر نیابد، مصرف انرژی با چالش‌های بزرگی روبرو خواهد شد [1]. علاوه بر این، نحوه کسب انرژی از طبیعت یا مسائل محیط‌زیستی یکی دیگر از چالش‌های مصرف انرژی است، به طوری که حفظ محیط‌زیست به یک الزام جهانی تبدیل شده است [2-11]. سیستم‌های انرژی‌های تجدید پذیر به خصوص انرژی بادی، طبیعت متغیری

برای انرژی یک منبع ارزشمند و حیاتی، طبیعت است. بشر از زمان خلقت همواره کوشیده است تا با به کارگیری انرژی‌های در دسترس فعالیت‌های خود را به آسانی، با بالاترین سرعت و کمترین هزینه به انجام رساند. با افزایش جمعیت جهان و به کارگیری فناوری‌های جدید، روند تقاضای انرژی رو به

Please cite this article using:

A. R. Zahedi, S. A. Amirkhali, A. Ghaffari Nejad, Lab Scale Production of Wind Power-Fuel Cell Hybrid Systems by Use of Electrolysis Process and Study of Technical Analysis, Modares Mechanical Engineering, Vol. 16, No. 12, pp. 425-432, 2016 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 2-2- روش آزمایشگاهی

طی پژوهش با توجه به ضعف تحقیقات صورت گرفته در زمینه عملیاتی نمودن سیستم‌های هیبریدی، همگام با مدل‌سازی این سیستم به ساخت نمونه آزمایشگاهی پرداخته شد. به‌طور خلاصه در این سیستم از یک توربین بادی کوچک و منبع تغذیه، الکترولیزر، پیل سوختی و سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده می‌گردد [7].

نتایج آزمایشگاهی در سه تست کلی بر روی الکترولیزر و میزان تولید هیدروژن آن، پیل سوختی و میزان توان خروجی آن و در نهایت ترکیب سیستم هیبریدی تشریح گردید.

## 3- معرفی اجزاء و نتایج آزمایشگاهی

اجزای به‌کار رفته در این پژوهش عبارت است از: توربین بادی/منبع تغذیه، الکترولیزر، کپسول هیدروژن و اکسیژن، پیل سوختی، مولتی‌متر. برای اتصال جریان به صفحات الکتروکاتود الکترولیزر از سیم‌های مسی که دور آن‌ها کاملاً عایق شده است استفاده گردید [16].

همچنین سایر اجزاء به‌کار رفته در این پژوهش، به‌منظور اتصال کپسول‌های هیدروژن و نیتروژن و همچنین خروجی الکترولیزر به پیل سوختی از شلنگ‌هایی در سایزهای مناسب و اتصالات پنوماتیکی استفاده شد. برای محاسبه و تنظیم دبی خروجی گاز هیدروژن از استوانه مدرج پرآب که به حالت برعکس درون تشت آب غوطه‌ور شده است، استفاده شد [16].

## 3-1- الکترولیزر و تولید هیدروژن

ابتدا به‌منظور شناسایی قابلیت تولید هیدروژن فلزات مختلف، 18 تست از الکترودهای با جنس‌های متفاوت گرفته شده است. در جدول 1 علامت ▲ به معنی تولید خوب هیدروژن ► به معنی تولید معمولی هیدروژن ▼ به معنی تولید کم هیدروژن و - به معنی عدم تولید هیدروژن می‌باشد [17-19].

تست‌ها به این شکل انجام شدند که با استفاده از منبع تغذیه و ثابت نگه‌داشتن مقدار اختلاف پتانسیل اعمال‌شده، قطب مثبت و قطب منفی به آند و کاتد که مستغرق در محلول نیم مولار اسیدسولفوریک وصل شده و میزان تولید هیدروژن مشاهده گردید. همان‌گونه که در جدول 1 مشاهده می‌شود، یکی از حالاتی که در آن تولید هیدروژن مناسبی وجود دارد، استفاده از فوم نیکل به‌عنوان آند و توری مسی به‌عنوان کاتد است. حال با استفاده از این الکترودها یک‌بار با تنظیم ولتاژ از 0 تا 15 V و یک‌بار با تنظیم توان ورودی به الکترولیزر از 0 تا 30 W میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده شد. شکل‌های 2 تا 8 نشان‌دهنده اثر تغییرات ولتاژ و توان را روی خروجی الکترولیزر می‌باشند [3,6,7]. با افزایش اختلاف پتانسیل دو سر الکترودها میزان تولید هیدروژن افزایش‌یافته تا به نقطه‌ای می‌رسد که در آن خروجی هیدروژن تقریباً ثابت بوده و پس‌از آن کاهش می‌یابد. بخشی از ولتاژ اعمال‌شده باید صرف غلبه بر این مقاومت شود. همچنین با افزایش ولتاژ صفحه آند (فوم نیکلی) در اسید خورده شده و همچنین از شدت اسیدیته الکترولیت کاسته شده و در نتیجه تولید هیدروژن با شدت کمتری انجام می‌شود [4,5,15]. یکی از حالاتی که در آن تولید هیدروژن مناسبی وجود دارد، استفاده از فوم نیکل به‌عنوان آند و توری مسی به‌عنوان کاتد است. حال با استفاده از این الکترودها یک‌بار با تنظیم ولتاژ از 0 تا 15 V و یک‌بار با تنظیم توان ورودی به الکترولیزر از 0 تا 30 W میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده شد [1].

دارند؛ باوجود اینکه برای احداث نیروگاه بادی حداقل به مدت یک سال تمام اطلاعات بادنسنجی منطقه ثبت و تحلیل می‌شود [2-11]. اما با این‌حال نیز نمی‌توان به قطع در مورد شدت و مدت و زمان دقیق وزش باد اظهارنظر نمود [5,8,10,12,13]. از طرف دیگر در بهترین مناطق بادخیز توربین‌های کمتر از نیمی از روز در توان نامی خود تولید دارند. به‌عبارت‌دیگر یک نیروگاه بادی ممکن است در ساعات پیک مصرف برق، به مقداری که شبکه نیاز دارد، قادر به تزریق برق نباشد و یا در ساعاتی که تقاضای کمی از جانب شبکه وجود دارد، نیروگاه بادی اضافه‌تولید داشته باشد [14,15]. از این رو وجود یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی برای نیروگاه بادی برای ذخیره انرژی در ساعات کم باری و تزریق آن در ساعات پرباری باعث افزایش امنیت شبکه، افزایش میزان تولید نیروگاه و کاهش نوسانات توان خروجی باشد. نتایج این پژوهش به دو دسته تقسیم گردید: نتایج آزمایشگاهی و نتایج مدل‌سازی. در بخش آزمایشگاهی به‌طورکلی نتایج به سه بخش تقسیم می‌شود: نتایج تست الکترولیزر و ذخیره هیدروژن، نتایج تست پیل سوختی و نتایج ترکیب سیستم هیبریدی توربین باد/الکترولیزر/پیل سوختی [16]. در بخش مدل‌سازی نیز سناریوهای مختلف تحت تأثیر پارامترها بررسی شده و دو سناریو برتر انتخاب شده و سپس به تحلیل فنی آن پرداخته شده است.

## 2- سیستم پیشنهادی

سیستم هیبریدی که در این پژوهش معرفی خواهد شد، مطابق شکل 1 متشکل از چهار جزء اصلی است: توربین بادی، الکترولیزر، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی سازوکار سیستم مذکور به این صورت است که در ساعات کم باری، توان اضافی تولیدشده توسط توربین بادی وارد واحد الکترولیزر شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌گردد. هیدروژن و اکسیژن تبدیل‌شده فشرده‌شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌گردند [16].

## 2-1- روش تحقیق

در این پژوهش روش آزمایشگاهی برای تحلیل فنی سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. به‌عبارت دیگر ابتدا نمونه آزمایشگاهی سیستم موردنظر با تمرکز بر تولید هیدروژن از طریق الکترولیزر و ارتباط آن به پیل سوختی غشاء پلیمری موجود ساخته شده و پارامترهای مختلف در شرایط متفاوت تست گردید.

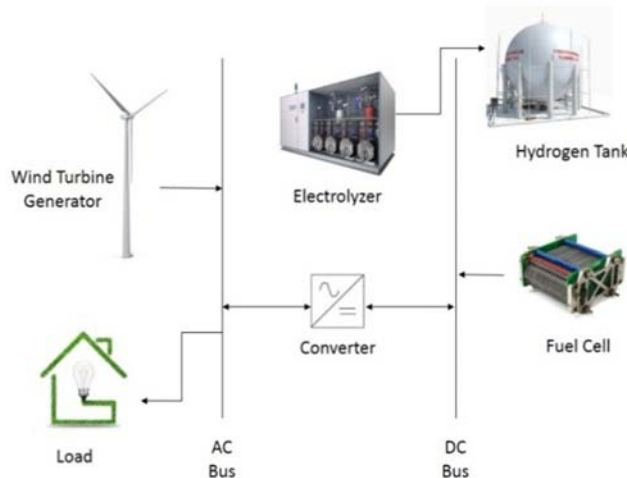


Fig. 1 Schematic of the proposed hybrid system

شکل 1 شماتیک سیستم هیبریدی پیشنهادی

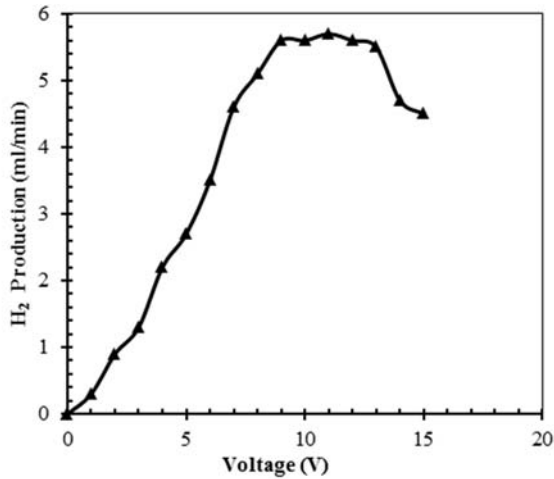


Fig. 2 Hydrogen production shift based on the applied voltage  
 شکل 2 نمودار تغییرات تولید هیدروژن برحسب ولتاژ اعمالی

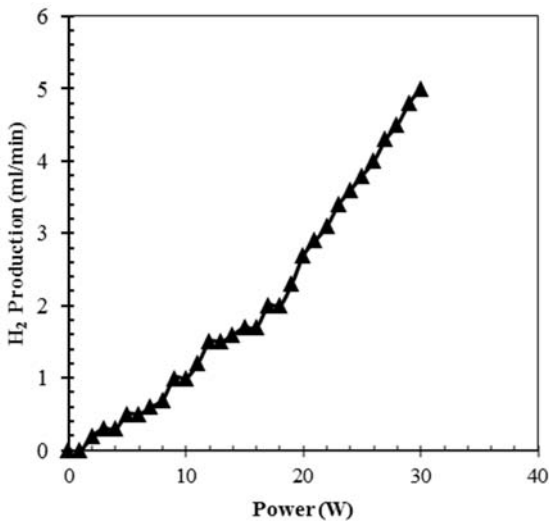


Fig. 3 Hydrogen production shift based on the input power to the electrolyzer  
 شکل 3 نمودار تغییرات تولید هیدروژن برحسب توان ورودی به الکترولیزر

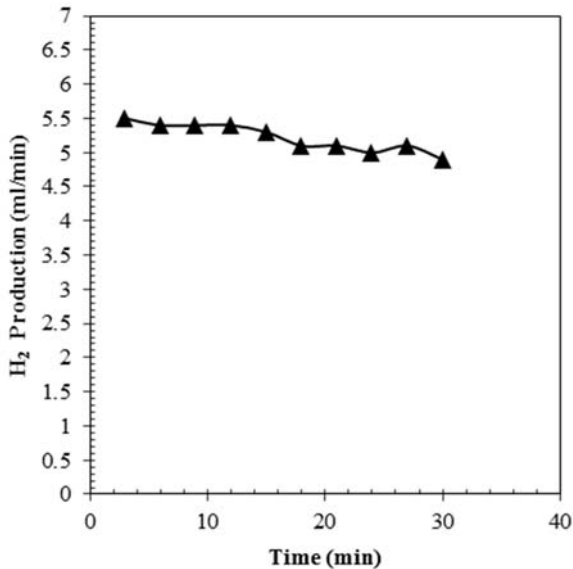


Fig. 4 Volumetric flow rate of hydrogen in terms of time  
 شکل 4 دبی حجمی هیدروژن برحسب زمان

جدول 1 مقایسه تولید هیدروژن با استفاده از الکترودهای مختلف

شماره	کاتد	آند	وضعیت تولید
1	فوم نیکل	فوم نیکل	▲
2	ورق آلومینیوم	ورق آلومینیوم	▼
3	ورق آلومینیوم	ورق برنج	▼
4	ورق برنج	ورق آلومینیوم	▲
5	فوم نیکل	ورق آلومینیوم	▲
6	ورق آلومینیوم	فوم نیکل	-
7	پارچه کربن	ورق آلومینیوم	▶
8	ورق آلومینیوم	پارچه کربن	-
9	فوم نیکل	ورق برنج	▲
10	ورق برنج	فوم نیکل	▲
11	توری مس	توری فولاد	▲
12	توری فولاد	توری مس	▲
13	توری مس	ورق برنج	▲
14	ورق برنج	توری مس	▲
15	فوم نیکل	توری مس	▲
16	توری مس	فوم نیکل	▲
17	توری فولاد	فوم نیکل	▲
18	ورق روی	ورق روی	▲

در شکل 2 تولید هیدروژن با گذشت زمان اندکی کمتر می‌شود و بازهم می‌توان دلیل آن را کم شدن خاصیت اسیدسولفوریک ناشی از خوردگی آند (فوم نیکل) بیان کرد [17-19]. یکی از حالاتی که در آن تولید هیدروژن مناسبی وجود دارد، استفاده از فوم نیکل به عنوان آند و توری مسی به عنوان کاتد است. حال با استفاده از این الکترودها یک‌بار با تنظیم ولتاژ از 0 تا 15 V و یک‌بار با تنظیم توان ورودی به الکترولیزر از 0 تا 30 W میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده گردید [16].

شکل 2 نشان می‌دهد که تولید هیدروژن بعد از ولتاژ مشخص 12 V کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن برازش منحنی به روش لگاریتمی معادله (1) برای محاسبه دبی در هر زمانی به دست می‌آید:

$$y = -0.249 \ln(x) + 5.8705 \quad (1)$$

با در نظر گرفتن برازش منحنی به روش لگاریتمی معادله (2) برای محاسبه دبی در هر زمانی به دست می‌آید:

$$y = -0.249 \ln(x) + 5.8705 \quad (2)$$

هم‌چنین نمودار تغییرات تولید هیدروژن بر حسب توان ورودی به الکترولیزر در شکل 3 و دبی حجمی هیدروژن در شکل 4 آمده است [16].

بدین ترتیب در دقیقه 60م دبی حجمی تولید هیدروژن برابر با 4.85 میلی‌لیتر بر دقیقه خواهد بود. در نتیجه می‌توان میانگین تولید هیدروژن را برای این سیستم 5.07 میلی‌لیتر بر دقیقه در نظر گرفت. در نتیجه در صورت کارکرد این سیستم به مدت یک ساعت، 304 میلی‌لیتر گاز هیدروژن تولید خواهد شد [6]. به‌منظور افزایش میزان تولید هیدروژن به میزان حدود 50 میلی‌لیتر بر دقیقه چندین رویکرد وجود دارد:

افزایش سطح الکترودها: الکترودهای استفاده شده در آزمایش اخیر بیشترین سطح ممکن را داشتند تا بتوانند در محفظه تعبیه‌شده در الکترولیزر قرار بگیرند [20].

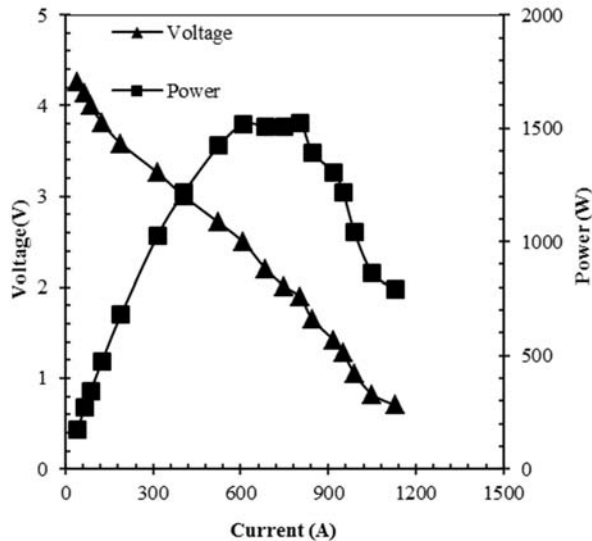


Fig. 6 Chart fuel cell polarization and lack of pre-heating the air in aerated

شکل 6 نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در حالت هوادهی و عدم پیش گرم کردن

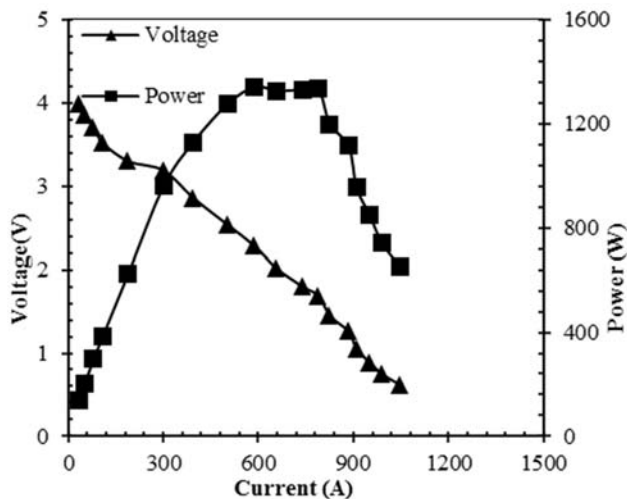


Fig. 7 Chart fuel cell polarization in a state of aerated and non-preheat the air

شکل 7 نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در حالت عدم هوادهی و عدم پیش گرم کردن هوا

سوختی در شرایط عادی، تجهیزات و امکانات لازم برای افزایش دمای داخلی پیل سوختی، گرمایش سوخت و همچنین رطوبت زنی وجود نداشت. لذا توان خروجی پیل سوختی در شرایط حاضر کمتر از میزان گزارش شده در مرجع بدست آمد [1].

علت بالاتر بودن خروجی در آزمایش‌های قبلی را می‌توان این‌گونه بیان نمود:

- 1- بالا بودن دمای داخلی سطح پیل سوختی (80 درجه)
- 2- ثابت نگه داشتن دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی
- 3- پیش گرم کردن هیدروژن ورودی

4- رطوبت‌زنی هیدروژن و هوای ورودی به پیل سوختی [23-21] در پژوهش حاضر افزایش دمای داخلی پیل سوختی، گرمایش سوخت و همچنین رطوبت زنی صورت نگرفت.

### 3-3- منبع تغذیه/الکترولیز/پیل سوختی

### 2-3- پیل سوختی

پیل سوختی استفاده‌شده در این آزمایش، یک پیل سوختی غشاء پلیمری 5 سل با ظرفیت تولید 4 W بود [6]. مجموعه غشاء-الکتروود این پیل سوختی از یک غشاء پلیمری الکترولیت و دولایه کاتالیزور، و دولایه نفوذ گاز تشکیل شده است [3]. برای تست پیل سوختی ابتدا با فشار 1-3 اتمسفر گاز نیتروژن وارد پیل سوختی شده تا گازهای داخل کانال‌ها تخلیه گردد. با تنظیم دبی گاز هیدروژن روی 55 میلی‌لیتر بر دقیقه گاز هیدروژن وارد پیل سوختی گردید. در این بخش از آزمایش 3 تست از پیل سوختی در شرایط هوا رسانی گرم، هوا رسانی دمای محیط و بدون هوا رسانی انجام شد که نتایج آن در شکل 5 نشان داده شده است [21-23].

بیش‌ترین میزان توان خروجی پیل سوختی مربوط به حالتی است که هوا پیش گرم شده و از طریق فن وارد پیل سوختی می‌شود. همچنین نتیجه می‌شود هوادهی از طریق فن تأثیر بسیار زیادی در توان خروجی پیل سوختی دارد. ذکر این نکته ضروری است که در این مرحله فقط تست‌های اولیه بر روی پیل سوختی و به کمک کپسول هیدروژن خشک انجام پذیرفت. لیکن آزمون‌های نهایی به کمک الکترولیزر تولید کننده هیدروژن صورت پذیرفته است. همچنین در شکل‌های 6 و 7 در حالت‌های مختلف آزمایش شده است.

در پژوهش انجام یافته توسط زاهدی و همکاران در شرایط مختلف و با استفاده از دستگاه تست پیل سوختی از پیل سوختی استفاده شده تست گرفته شده است. بیش‌ترین میزان خروجی این پیل سوختی در حدود 4 W است. اما در تست‌های انجام گرفته در این پژوهش ماکزیمم توان خروجی پیل سوختی کمتر از 2 W بود [16,17,24,26].

با افزایش اختلاف پتانسیل دو سر الکتروودها میزان تولید هیدروژن افزایش یافته تا به نقطه‌ای می‌رسد که در آن خروجی هیدروژن تقریباً ثابت بوده و پس‌از آن کاهش می‌یابد. علت ثابت ماندن و سپس کاهش تولید هیدروژن را می‌توان افزایش مقاومت ناشی از فاصله بین الکتروودها دانست که بخشی از ولتاژ اعمال شده باید صرف غلبه بر این مقاومت شود. نمودار ولتاژ و چگالی جریان بر حسب توان نیز در شکل 8 آمده است.

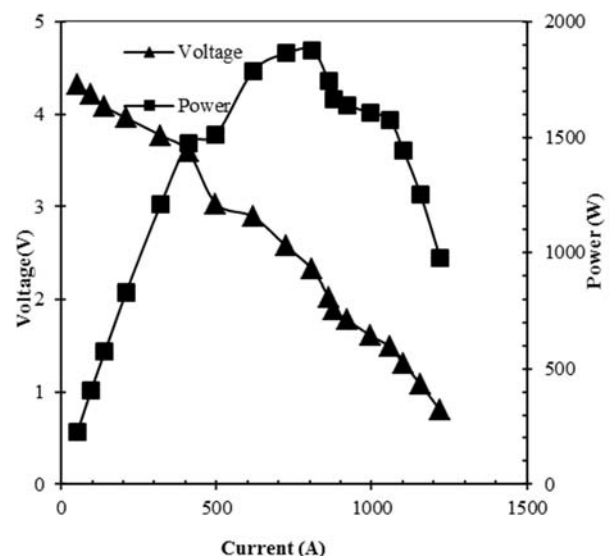


Fig. 5 Aeration and pre-heating the fuel cell polarization curve in the air

شکل 5 نمودار پلاریزاسیون پیل سوختی در حالت هوادهی و پیش گرم کردن هوا

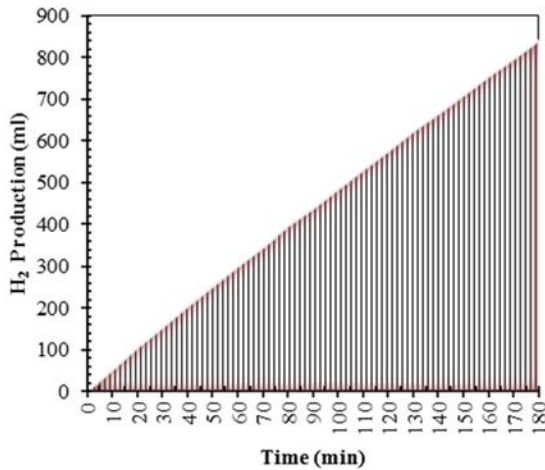


Fig. 9 The hydrogen produced in three hours

شکل 9 میزان تولید هیدروژن در سه ساعت

4- توان خروجی پیل سوختی:

$$P_{FC} = 1008\text{mW} \times \frac{2800}{840} = 3.36\text{W}$$

بنابراین در 10 ساعت کم باری هیدروژن ذخیره شده قادر به تولید توان W 3.36 در ساعات پرباری خواهد بود.

با فرض تولید توان منبع تغذیه در 6 ساعت مساوی با 180 W، پیل سوختی باعث افزایش ضریب ظرفیت به میزان 1.8% خواهد بود. البته این مقدار تا اعداد بزرگتری می توان افزایش یابد. پارامترهای مختلفی که در این موضوع موثر هستند عبارتند از:

1- تغییر الکترولیزر قلبیابی به غشاء پلیمری که منجر به افزایش چند برابری تولید هیدروژن می گردد.  
2- افزایش سطح الکترودها در الکترولیزر و هرچه بیشتر نزدیک نمودن صفحات به هم.

3- بالا بردن دمای داخلی سطح پیل سوختی

4- ثابت نگه داشتن دبی هیدروژن ورودی به پیل سوختی

5- پیش گرم کردن هیدروژن ورودی

نتایج مطالعات نشان می دهد که میزان افزایش ضریب ظرفیت ناشی از استفاده از سیستم هیبریدی مذکور، تا 10-20% قابل افزایش است [7].

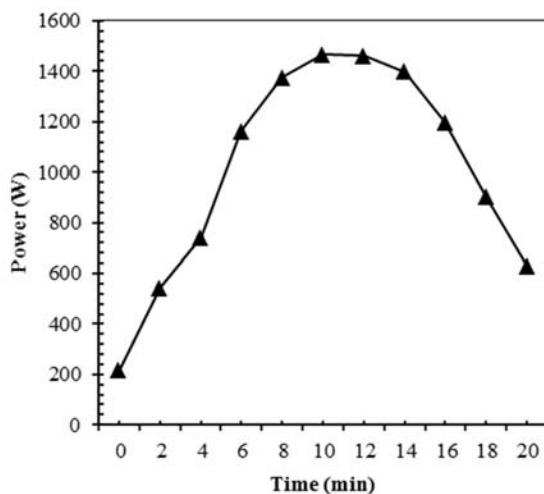


Fig. 10 The power produced by the fuel cell

شکل 10 قدرت حاصله توسط پیل سوختی

اجزای سیستم هیبریدی شامل منبع تغذیه، الکترولیزر و پیل سوختی کنار هم قرار گرفتند. در این آزمون توان خروجی توسط منبع تغذیه شبیه سازی شد. توان خروجی وارد الکترولیزر شده و در آنجا هیدروژن تولیدی ذخیره می گردد. پس از آنکه هیدروژن ذخیره شده به دبی مناسبی رسید، وارد پیل سوختی شده و به عنوان توان کمکی وارد مدار می شود [27]. توان بیشینه تولیدی توسط پیل سوختی 1465 mW مشاهده گردید که در این حالت اختلاف پتانسیل دو سر پیل سوختی 2.05 V و جریان آن 715 میلی آمپر بود. علت افت شدید توان خروجی در پیل سوختی علاوه بر افت ولتاژ ناشی از افت اهمی، کاهش جریان ناشی از کاهش دبی سوخت ورودی به پیل سوختی بود [28]. هم چنین میزان تولید هیدروژن در سه ساعت در شکل 9 آمده است. در این نمودار مشخص می شود که تولید هیدروژن در سه ساعت افزایش می یابد و تا حدود 800 میلی لیتر افزایش می یابد [1]. زمان بر حسب دقیقه برای سه ساعت محاسبه شده است.

حال با در نظر گرفتن شارژ مخزن هیدروژن به مدت 3 ساعت توسط توان خروجی منبع تغذیه، این سیستم قادر به تولید 1008 mW توان بود. از طرفی میزان توان نامی ورودی به الکترولیزر در این زمان قابل حساب است.

بدین ترتیب نسبت سیستم هیبریدی باید در طول سه ساعت 90 W توان وارد الکترولیزر نماید تا پیل سوختی در 20 دقیقه به طور متوسط 1008 mW توان تولید کند [24,17,16,6].

با فرض اینکه سیستم مورد نظر 24 ساعت شبانه روز در حال تولید توان باشد و ساعات پر باری بین ساعات های 12 تا 18 (6 ساعت) و ساعات کم باری بین ساعات 22 تا 8 (10 ساعت) باشد و منبع تغذیه در همه ساعات حداقل 30 kW توان تولید نماید، به مدت 10 ساعت (ساعات کم باری) می توان هیدروژن ذخیره نمود و در 6 ساعت پر باری پیل سوختی تولید توان نماید. میزان توان تولیدی توسط پیل سوختی در شکل 10 آمده است.

هم چنین برای محاسبه توان به دست می آید [10,19,21,26-29]:

1- تولید توان توسط منبع تغذیه:

$$P_{WTG} = 24\text{h} \times 30\text{W} = 720\text{Wh}$$

2- توان ورودی به الکترولیزر:

$$P_{\text{Electrolyzer}} = 10\text{h} \times 30\text{W} = 300\text{W}$$

3- مقدار هیدروژن ذخیره شده:

$$S_{H_2} = 840\text{ml} \times \frac{10}{3} = 2800\text{ml}$$

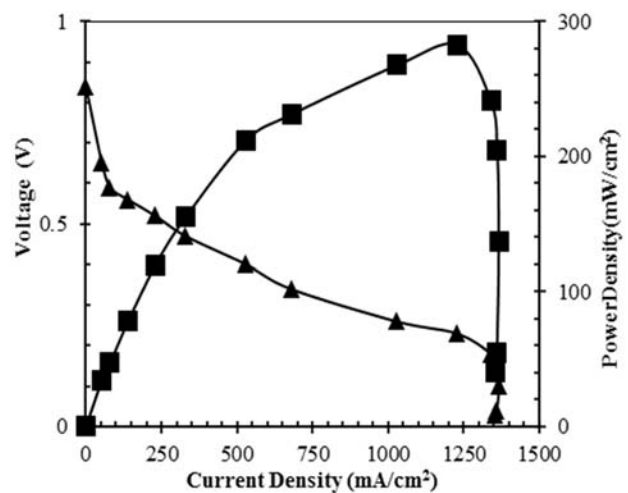


Fig. 8 Fuel cell test in laboratory

شکل 8 تست های انجام گرفته بر روی پیل سوختی در منبع

### 3-4- سیستم هیبرید توربین باد/پیل سوختی/الکترولیز

با کنار هم قراردادن اجزای سیستم متشکل از توربین بادی، الکترولیزر و پیل سوختی سیستم هیبریدی مورد نظر تشکیل شد. هم‌چنین منحنی توان توربین مورد استفاده نشان داده شده است [7، 12، 22].

توربین بادی دارای قطر پره 2 متری و ارتفاع برج 2.5 متری است. منحنی توان توربین بادی استفاده شده در شکل 11 آمده است که در آن توربین بادی از مارک صبا نیرو است. هم‌چنین تعیین سرعت چرخشی توربین بادی در ابعاد مختلف در جدول 2 آمده است.

همان‌طور که در جدول 2 ملاحظه می‌گردد، کمترین مقدار سرعت دورانی مورد نیاز 23.57 رادیان بر ثانیه یا 225 دور بر دقیقه بوده که مربوطه به توربین سه پره با قطر پره 0.6 متر و جرم نیم کیلوگرم می‌باشد.

### 4- نتایج مدل سازی مطالعه

سیستم هیبریدی موردنظر متشکل از توربین بادی، پیل سوختی، الکترولیزر، مخزن ذخیره هیدروژن و مبدل جریان DC به AC است. در این بخش پس از ارائه فرضیات صورت گرفته، به مدل‌سازی سیستم هیبریدی ساخته شده در مقیاس بزرگتر و برای تأمین برق 250 خانوار پرداخته گردیده است. در مرحله بعد موانع پیش رو بررسی شده و مدل کامل‌تری ارائه گردیده است. منطقه کوهین که در استان قزوین به‌عنوان یکی از مناطق بادخیز ایران که در امتداد کریدور بادی نشأت گرفته از رشته‌کوه البرز شناخته می‌شود، به‌عنوان منطقه مورد مطالعه در نظر گرفته شد.

### 4-1- فرضیات اولیه

فرضیات مدل به شرح زیر در دستور کار قرار گرفت:

- 1- سیستم موردنظر برای تأمین برق 250 خانوار در منطقه کوهین در نظر گرفته شده است.
- 2- متوسط مصرف سالانه برق هر خانوار ایرانی 2740 kWh فرض شده است.
- 3- تیرماه و مردادماه به‌عنوان ماه‌های دارای بیشترین مصرف برق در نظر گرفته شده است.
- 4- تحلیل اقتصادی بر مبنای قیمت انرژی<sup>1</sup> و قیمت فعلی سرمایه<sup>2</sup> انجام شده است.

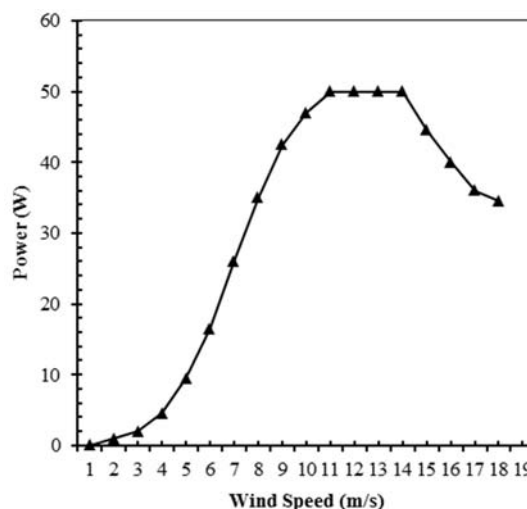


Fig. 11 Wind turbine power curve used.

شکل 11 منحنی توان توربین بادی استفاده شده

5- عمر سیستم 20 سال در نظر گرفته شده است.

6- توربین بادی محور افقی با عمر 20 سال و ظرفیت 300 kW در نظر گرفته شده است.

7- پیل سوختی غشاء پلیمری با عمر 40000 ساعت کارکرد موردنظر قرار گرفته است.

8- الکترولیزر غشاء پلیمری با عمر 15 سال در نظر گرفته شده است.

9- مخزن ذخیره هیدروژن با عمر 25 سال و دارای ذخیره 10% در ابتدای کار در نظر گرفته شده است.

همین‌طور اطلاعات آب و هوای منطقه کوهین در طی سه سال در جدول 3 آمده است. همان‌گونه که فرضیات مسأله اشاره شده تقاضای برق برابر با تقاضای 250 خانوار در منطقه کوهین که هر خانوار به‌طور متوسط 2740 kWh در سال مصرف برق دارند و اوج مصرف برق در سال مربوط به ماه مرداد می‌باشد. متوسط میزان تقاضای برق در هر ماه، تقاضای برق در هر روز از ماه‌های مختلف و پروفایل سالانه تقاضای برق در ساعات مختلف روز نمایش داده شده است [22].

توربین بادی در نظر گرفته شده در این پژوهش توربین NTK 300 kW دارای ژنراتور ABB بود که مشخصات فنی آن و منحنی توان آن آمده است [19].

جدول 2 تعیین سرعت چرخشی توربین بادی در ابعاد مختلف

Table 2 Determine the speed of rotation of the wind turbine in different dimension

تعداد پره	جرم پره (kg)	طول پره (m)	ممان اینرسی (kgm <sup>3</sup> )	سرعت دورانی (rads <sup>-1</sup> )	دور بر دقیقه (RPM)
3	0.1	0.3	0.009	105	1007
3	0.1	0.4	0.016	79	755
3	0.1	0.5	0.025	63	604
3	0.1	0.6	0.036	53	503
3	0.2	0.3	0.018	75	712
3	0.2	0.4	0.032	56	534
3	0.2	0.5	0.05	45	427
3	0.2	0.6	0.072	37	356
3	0.3	0.3	0.027	61	581
3	0.3	0.4	0.048	46	436
3	0.3	0.5	0.075	37	349
3	0.3	0.6	0.108	30	291
3	0.4	0.3	0.036	53	503
3	0.4	0.4	0.064	40	377
3	0.4	0.5	0.1	32	302
3	0.4	0.6	0.144	26	252
3	0.5	0.3	0.045	47	450
3	0.5	0.4	0.08	35	338
3	0.5	0.5	0.125	28	270
3	0.5	0.6	0.18	24	225

جدول 3 اطلاعات آب‌وهوایی منطقه کوهین در طی سه سال

Table 3 The weather data Koochin area in three years

میانگین 3 ساله	2004	2003	2002	
-4	-10.2	-8	-16	کمینه دما (C)
40.1	37.8	42.4	40	بیشینه دما (C)
13.9	14	13.6	14.1	میانگین دما (C)
54	54	55	53	رطوبت نسبی میانگین (%)
358.3	326	410	339	میزان بارندگی سالانه

<sup>1</sup> Cost of Energy

<sup>2</sup> Net Present Cost

گرفته شده و سیستم مورد نظر بر طبق آن‌ها شبیه‌سازی گردید. ظرفیت‌های در نظر گرفته شده برای سیستم نشان داده شده است. برای نیل به سیستم بهینه دقیقاً 1000 شبیه‌سازی انجام شد که از این تعداد، 123 سناریو برای تأمین تقاضا امکان‌پذیر می‌باشند. همچنین میانگین سرعت باد در ارتفاعات 40، 60 و 80 متری در جدول 5 آمده است. همین‌طور ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته شده برای اجزای سیستم در جدول 6 آمده است. در این پژوهش از مبدل 200 kW با تعداد توربین 4 عدد استفاده شده است.

### 5- جمع‌بندی

در این مقاله یک سیستم هیبریدی برای اتصال به نیروگاه بادی، جهت تأمین توان قابل‌اطمینان با تولید هیدروژن معرفی گردید. سیستم هیبریدی که در این مقاله معرفی شد متشکل از چهار جزء اصلی بود: توربین بادی، الکترولیزر، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی. سازوکار سیستم مذکور به این صورت است که در ساعات کم باری، توان اضافی تولیدشده توسط توربین بادی وارد واحد الکترولیز شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌گردد. هیدروژن و اکسیژن تبدیل‌شده فشرده‌شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌شوند. این گازها در ساعات پیک مصرف (زمانی که توان تولیدی توسط نیروگاه بادی کمتر از میزان تقاضای شبکه است) برای تولید برق وارد پیل سوختی می‌گردند تا تقاضای برق شبکه ارضا گردد. در این پژوهش ابتدا با ساخت یک نمونه آزمایشگاهی سیستم هیبریدی مذکور میزان تولید هیدروژن توسط الکترولیز قلیایی و میزان تولید توان توسط پیل سوختی غشاء پلیمری بررسی شد. با استفاده از آزمایش‌های انجام شده روی سیستم هیبریدی ساخته شده مشخص گردید که در الکترولیز قلیایی افزایش فاصله بین صفحات باعث افزایش مقاومت شده و کاهش راندمان الکترولیزر را در پی دارد. در الکترولیزر قلیایی با اعمال ولتاژ و گذشت زمان صفحات آند خورده شده و بنابراین الکترولیت نیز خاصیت خود را به مرور از دست می‌دهد و این امر باعث افزایش هزینه‌های نگهداری می‌شود. مناسب‌ترین روش الکترولیز در سیستم‌های هیبریدی الکترولیز غشاء پلیمری می‌باشد که در آن صفحات در کمترین فاصله ممکن قرار دارند و جداسازی اکسیژن و هیدروژن به راحتی صورت می‌گیرد. برای افزایش توان خروجی پیل سوختی، هیدروژن و هوا باید پیش گرم شوند، دبی هیدروژن به صورت مستمر باشد و هوا از طریق فن به داخل کاتدها دمیده شود. همچنین رطوبت‌زنی سوخت و هوای ورودی در

جدول 5 میانگین سرعت باد در ارتفاعات 40، 60 و 80 متری

ارتفاع سنسور (m)	میزان پوشش داده‌ها (%)	میانگین سرعت ( $ms^{-1}$ )
40	94.4	7.31
60	94.8	7.78
80	94.5	8.18

جدول 6 ظرفیت‌های سیستم برای راه‌اندازی اکانت

توربین بادی (تعداد)	پیل سوختی (kW)	الکترولیزر (kW)	مخزن هیدروژن (kg)	مبدل (kW)
3	100	200	1500	100
4	120	300	2000	200
	150	400	2500	300
	200	500	3000	400
		600	3500	500

یکی از دکل‌های بادسنجی سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در مجاورت محل مورد نظر قرار دارد. دکل بادسنجی در قسمت شرقی سایت با فاصله 3.5 کیلومتر، در مختصات 49.7100 شمالی و 36.3375 شرقی در ارتفاع 1447 متر بالاتر از سطح دریا بنا شده است. سنسورهای فنجان‌ی در سه ارتفاع 40، 60 و 80 متری از سطح نصب شده‌اند. علاوه بر آن، دو بادنما هم در ارتفاع‌های 60 و 78 متری قرار دارد. سنسورها نیز بر اساس استانداردهای بین‌المللی کالیبره شده‌اند [27].

اطلاعات خروجی از دکل بادسنجی در بازه زمانی 10 دقیقه‌ای ثبت شده و داده‌های خروجی از تاریخ 27 اردیبهشت سال 1390 تا 7 خرداد سال 1392 در این پژوهش استفاده شده و خلاصه‌ای از آن در جدول 5 قابل مشاهده است. همان‌طور که در جدول مشاهده می‌شود، درصد پوشش اطلاعات بیش از 94% می‌باشد که بالاتر از میزان مورد قبول است [20، 29]. در ماه 9 یعنی ماه آذر بیش‌ترین میزان مصرف برق محقق می‌شود [24]. در حالی که بیش‌ترین سرعت وزش باد در تابستان (ماه‌های ژوئن تا سپتامبر) اتفاق می‌افتد. بر این اساس مشخصات فنی توربین بادی استفاده شده در جدول 4 آمده است.

توربین بادی در نظر گرفته‌شده در این پژوهش توربین NTK 300 دارای ژنراتور ABB بود که مشخصات فنی آن در جدول 4 و منحنی توان آن در شکل 12 آمده است. همچنین میانگین سرعت باد در جدول 5 قابل مشاهده است.

در سیستم هیبریدی نمونه آزمایشگاهی میزان توان خروجی الکترولیزر حدوداً 50% و میزان تولید توان پیل سوختی در حالت ماکزیمم 6.7% خروجی الکترولیزر بوده است. حال با در نظر گرفتن این دو مقدار، میزان توان تولیدی پیل سوختی نسبت به توان خروجی از توربین بادی 1 به 30 خواهد بود. رسیدن به سیستم بهینه اقتصادی نیازمند بررسی سناریوهای مختلف است. از همین رو برای هر یک از اجزای سیستم ظرفیت‌های مختلفی در نظر

جدول 4 مشخصات فنی توربین بادی NTK300

مشخصات	واحد	مقدار
توان نامی	kW	300
قطر روتور	m	28
ارتفاع هاب	m	31
بازه سرعت	$ms^{-1}$	4-25
تعداد پره	-	3

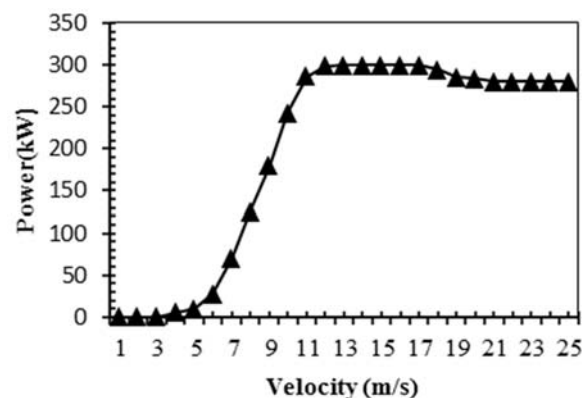


Fig. 12 Wind turbine power curve NTK 300

شکل 12 ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته‌شده برای اجزای سیستم

- system using biogeography based optimization algorithm, *Swarm and Evolutionary Computation*, Vol. 8, pp. 33-43, 2013.
- [13] D. P. Zafirakis, 2 - Overview of energy storage technologies for renewable energy systems A2 - Kaldellis, J.K, in: *Stand-Alone and Hybrid Wind Energy Systems*, Eds., pp. 29-80: Woodhead Publishing, 2010.
- [14] P. Breeze, 11 - Wind power, in: *Power Generation Technologies*, Eds., pp. 153-169, Oxford: Newnes, 2005.
- [15] S. Diaf, M. Belhamel, M. Haddadi, A. Louche, Technical and economic assessment of hybrid photovoltaic/wind system with battery storage in Corsica island, *Energy Policy*, Vol. 36, No. 2, pp. 743-754, 2008.
- [16] R. L. Borup, N. E. Vanderborgh, Design and testing criteria for bipolar plate materials for PEM fuel cell applications, Cambridge Univ Press, pp. 151, 1995.
- [17] A. Kundu, J. H. Jang, *Applications – Portable Portable Devices: Fuel Cells A2 - Garche, Jürgen*, in: *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources*, Eds., pp. 39-45, Amsterdam: Elsevier, 2009.
- [18] K. Rajeshwar, R. D. McConnell, S. Licht, *Solar hydrogen generation*, pp 41-63, Springer, 2008.
- [19] E. Zoulias, N. Lymberopoulos, Techno-economic analysis of the integration of hydrogen energy technologies in renewable energy-based stand-alone power systems, *Renewable Energy*, Vol. 32, No. 4, pp. 680-696, 2007.
- [20] M. Perrin, Y. Saint-Drenan, F. Mattera, P. Malbranche, Lead-acid batteries in stationary applications: competitors and new markets for large penetration of renewable energies, *Journal of Power Sources*, Vol. 144, No. 2, pp. 402-410, 2005.
- [21] V. Mehta, J. S. Cooper, Review and analysis of PEM fuel cell design and manufacturing, *Journal of Power Sources*, Vol. 114, No. 1, pp. 32-53, 2003.
- [22] S. Silva, M. Severino, M. De Oliveira, A stand-alone hybrid photovoltaic, fuel cell and battery system: A case study of Tocantins, Brazil, *Renewable Energy*, Vol. 57, pp. 384-389, 2013.
- [23] B. Virdis, S. Freguia, R. A. Rozendal, K. Rabaey, Z. Yuan, J. Keller, 4.18 - *Microbial Fuel Cells A2 - Wilderer, Peter*, in: *Treatise on Water Science*, Eds., pp. 641-665, Oxford: Elsevier, 2011.
- [24] F. Barbir, *PEM fuel cells: theory and practice*, pp. 147-247, Academic Press: Elsevier, 2013.
- [25] A. Kazim, Economical and environmental assessments of proton exchange membrane fuel cells in public buildings, *Energy conversion and management*, Vol. 42, No. 6, pp. 763-772, 2001.
- [26] S. Litster, G. McLean, PEM fuel cell electrodes, *Journal of Power Sources*, Vol. 130, No. 1, pp. 61-76, 2004.
- [27] E. S. Mohamed, G. Papadakis, Design, simulation and economic analysis of a stand-alone reverse osmosis desalination unit powered by wind turbines and photovoltaics, *Desalination*, Vol. 164, No. 1, pp. 87-97, 2004.
- [28] I. D. Spyrou, J. S. Anagnostopoulos, Design study of a stand-alone desalination system powered by renewable energy sources and a pumped storage unit, *Desalination*, Vol. 257, No. 1, pp. 137-149, 2010.
- [29] J. San Martín, I. Zamora, J. San Martín, V. Aperribay, P. Eguia, Energy storage technologies for electric applications, *International Conference on Renewable Energies and Power Quality* (No. 2), 2011.

میزان خروجی پیل سوختی تأثیرگذار است. بیشترین میزان هیدروژن تولیدی توسط سیستم هیبریدی ساخته شده در هر ساعت به طور متوسط 304 میلی‌لیتر بود. سیستم هیبریدی ساخته شده قادر به افزایش ضریب ظرفیت توربین بادی به میزان 1.8% بود. در سیستم هیبریدی نمونه آزمایشگاهی میزان توان خروجی الکترولیزر حدوداً 50% و میزان تولید توان پیل سوختی در حالت ماکزیمم 6.7% خروجی الکترولیزر محاسبه گردید. با در نظر گرفتن این دو مقدار، میزان توان تولیدی پیل سوختی نسبت به توان خروجی از توربین بادی 1 به 30 به دست آمد. در ادامه سیستم هیبریدی ساخته شده برای تأمین برق 205 خانوار مدل شد و مطالعه موردی برای سیستم مورد نظر در منطقه کوهین انجام شد. این سیستم قادر به تأمین تقاضای مورد نیاز به صورت کامل نبود.

## 6- مراجع

- [1] N. V. Khartchenko, V. M. Kharchenko, *Advanced Energy System*, pp. 271-447, CRC Press: Taylor & Francis Group, 2014.
- [2] P. Bajpai, V. Dash, Hybrid renewable energy systems for power generation in stand-alone applications: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 5, pp. 2926-2939, 2012.
- [3] D. Bezmalinović, F. Barbir, I. Tolj, Techno-economic analysis of PEM fuel cells role in photovoltaic-based systems for the remote base stations, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 1, pp. 417-425, 2013.
- [4] H. Chen, T. N. Cong, W. Yang, C. Tan, Y. Li, Y. Ding, Progress in electrical energy storage system: A critical review, *Progress in Natural Science*, Vol. 19, No. 3, pp. 291-312, 2009.
- [5] F. Díaz-González, A. Sumper, O. Gomis-Bellmunt, R. Villafila-Robles, A review of energy storage technologies for wind power applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 4, pp. 2154-2171, 2012.
- [6] I. Dincer, C. Zamfirescu, *Chapter 4 - Hydrogen and Fuel Cell Systems*, in: *Advanced Power Generation Systems*, Eds., pp. 143-198, Boston: Elsevier, 2014.
- [7] Y. Kalinci, A. Hepbasli, I. Dincer, Techno-economic analysis of a stand-alone hybrid renewable energy system with hydrogen production and storage options, *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 40, No. 24, pp. 7652-7664, 2015.
- [8] M. Y. H. Nor Shahida Hasan, Md Shah Majid, Hasimah Abdul Rahman, Review of storage schemes for wind energy systems, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 21, pp. 237-247, 2013.
- [9] J. P. Praene, M. David, F. Sinama, D. Morau, O. Marc, Renewable energy: Progressing towards a net zero energy island, the case of Reunion Island, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, No. 1, pp. 426-442, 2012.
- [10] D. T. Swift-Hook, 2.03 - *History of Wind Power A2 - Sayigh, Ali*, in: *Comprehensive Renewable Energy*, Eds., pp. 41-72, Oxford: Elsevier, 2012.
- [11] B. F. Towler, *The future of energy*: Academic Press, 2014.
- [12] R. Kumar, R. Gupta, A. K. Bansal, Economic analysis and power management of a stand-alone wind/photovoltaic hybrid energy