



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

علیرضا زاهدی^{۱*}، سید امیر علی امیرخالی^۲، علی غفاری نژاد^۳

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

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

۳- استادیار، الکتروشیمی، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

*تهران، صندوق پستی ۱۱۸۴۶۱۳۱۱۴

zahediar@iust.ac.ir

چکیده

کاشه 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 گاهاً در ساعات پیک مصرف جوab گو نیستند، لذا یک سیستم ذخیره‌سازی توان و پشتیان 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 بازرس ارائه گردد. سیستم هیبریدی که در این پژوهش معرفی شده مشتمل از چهار جزء اصلی است: توربین بادی، الکترولیز، 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 قیایی 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 میلی لیتر بود. در نتیجه میزان توان تولیدی توسط پیل سوختی W 1008 mW محاسبه شد. پس از ساخت نمونه آزمایشگاهی، مطالعه موردی برای سیستم مورد نظر در منطقه کوهین انجام شد.

اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دربافت: ۱۴ شهریور ۱۳۹۵

پذیرش: ۱۲ آبان ۱۳۹۵

ارائه در سایت: ۲۸ اذر ۱۳۹۵

کلید واژگان:

توربین بادی

الکترولیز

هیدروژن

پیل سوختی

ذخیره‌سازی انرژی

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

Ali Reza Zahedi^{۱*}, Seyed Amirali Amirkhalili^۱, Ali Ghaffari Nejad^۲

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

۲- 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 Kouhchin area.

افزایش است و اگر الگوی جاری مصرف انرژی تغییر نیابد، مصرف انرژی با چالش‌های بزرگی روبرو خواهد شد [۱]. 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 [۱۱-۲]. سیستم‌های انرژی‌های تجدید پذیر به خصوص انرژی بادی، طبیعت متغیری

برای انرژی یک منبع ارزشمند و حیاتی، طبیعت است. بشر از زمان خلت 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 و به

Please cite this article using:

A. R. Zahedi, S. A. Amirkhalili, 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- روشن 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. به طور خلاصه در این سیستم از یک توربین بادی کوچک و منبع تغذیه، الکتروولیز، پیل سوختی و سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده می‌گردد [7]. نتایج آزمایشگاهی در سه تست کلی بر روی الکتروولیز و میزان تولید هیدروژن آن، پیل سوختی و میزان توان خروجی آن و درنهایت ترکیب سیستم هیبریدی تشریح گردید.

3- معرفی اجزاء و نتایج آزمایشگاهی

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

همچنین سایر اجزاء به کار رفته در این پژوهش، به منظور اتصال کپسول‌های هیدروژن و نیتروژن و همچنین خروجی الکتروولیز 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- الکتروولیز و تولید هیدروژن

ابتدا به منظور 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 اعمال شده، قطب مثبت و قطب منفی به آند و کاتد که مستقر 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 مناسب 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 و یکبار با تنظیم توان ورودی به الکتروولیز از 0 تا 30 میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده شد. شکل‌های 2 تا 8 نشان‌دهنده اثر تغییرات ولتاژ و توان را روی خروجی الکتروولیز می‌باشند [7,6,3]. با افزایش اختلاف پتانسیل دو سر الکترودها میزان تولید هیدروژن افزایش یافته تا به نقطه‌ای می‌رسد که در آن خروجی هیدروژن تقریباً ثابت بوده و پس از آن کاهش می‌یابد. بخشی از ولتاژ اعمال شده باید صرف غله بر این مقاومت شود. همچنین با افزایش ولتاژ صفحه آند (فوم نیکل) در اسید خورده شده و همچنین از شدت اسیدیته الکتروولیت کاسته شده و درنتیجه تولید هیدروژن باشد کمتر انجام می‌شود [15,5,4]. یکی از حالاتی که در آن تولید هیدروژن مناسب 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 و یکبار با تنظیم توان ورودی به الکتروولیز از 0 تا 30 میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده شد [1].

دارند، با وجود اینکه برای احداث نیروگاه بادی حداقل به مدت یک سال تمام اطلاعات بادسنجی منطقه ثبت و تحلیل می‌شود [11-2], اما با این حال نیز نمی‌توان به قطع در مورد شدت و مدت و زمان دقیق وزش باد اظهار نظر نمود [5-13,12,10,8,5]. از طرف دیگر در بهترین مناطق با دخیز توربین‌های کمتر از ۱۵ روز در توان نامی خود تولید دارند. به عبارت دیگر یک نیروگاه بادی ممکن است در ساعت‌های پیک مصرف برق، به مقداری که شبکه نیاز دارد، قادر به تزریق برق نباشد و یا در ساعتی که تقاضای کمی از جانب شبکه وجود دارد، نیروگاه بادی اضافه تولید داشته باشد [15,14]. از این رو وجود یک سیستم ذخیره‌سازی انرژی برای نیروگاه بادی برای ذخیره انرژی در ساعت‌های کم باری و تزریق آن در ساعت‌های 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 به طور کلی نتایج به سه بخش تقسیم می‌شود: نتایج تست الکتروولیز و ذخیره هیدروژن، نتایج تست پیل سوختی و نتایج ترکیب سیستم هیبریدی توربین باد/الکتروولیز/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 متکشل از چهار جزء اصلی است: توربین بادی، الکتروولیز، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی سازوکار سیستم مذکور به این صورت است که در ساعت‌های کم برای، توان اضافی تولیدشده توسط توربین بادی وارد واحد الکتروولیز شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌گردد. هیدروژن و اکسیژن تبدیل شده فشرده شده و در مخازن مخصوص به خود ذخیره می‌گردد [16].

2-1- روشن تحقیق

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

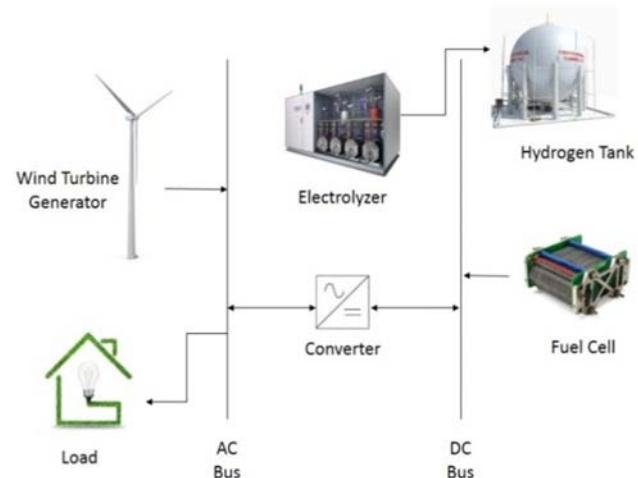
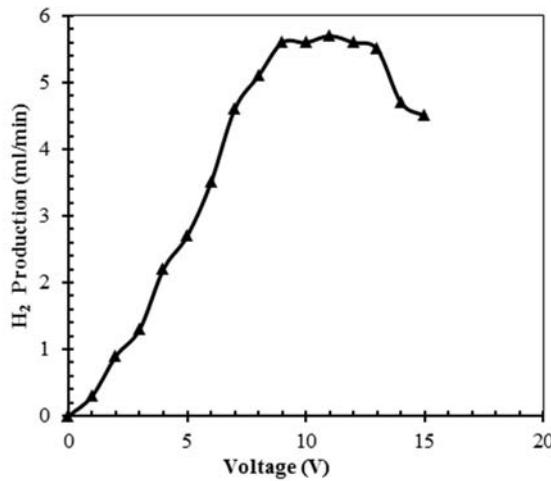
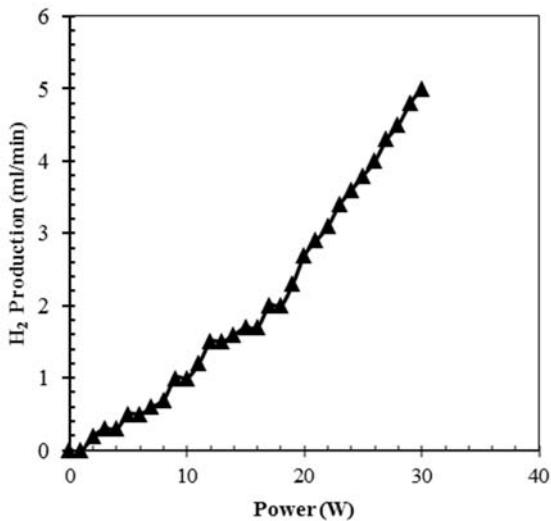


Fig. 1 Schematic of the proposed hybrid system

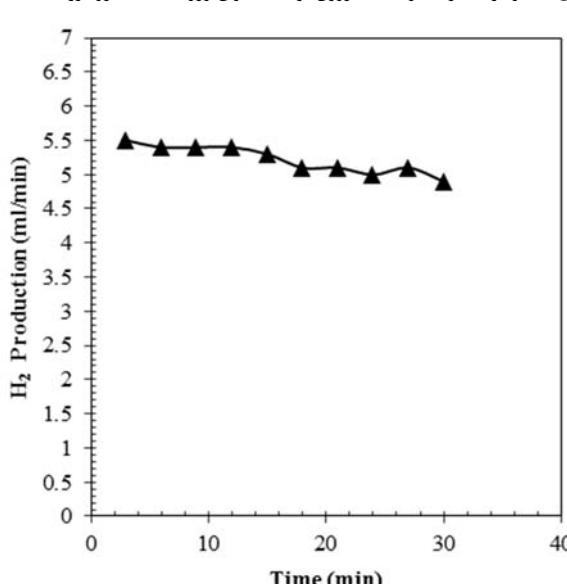
شکل 1 شماتیک سیستم هیبریدی پیشنهادی



شکل 2 نمودار تغییرات تولید هیدروژن بر حسب ولتاژ اعمالی



شکل 3 نمودار تغییرات تولید هیدروژن بر حسب توان ورودی به الکتروولیز



شکل 4 دبی حجمی هیدروژن بر حسب زمان

جدول 1 مقایسه تولید هیدروژن با استفاده از الکترودهای مختلف

Table 1 Compare hydrogen production using different electrodes

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

در شکل 2 تولید هیدروژن باگذشت زمان اندکی کمتر می‌شود و باز هم 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 و یکبار با تنظیم توان ورودی به الکتروولیز از 0 تا 30 W میزان گاز هیدروژن خروجی سنجیده گردید [16].

شکل 2 نشان می‌دهد که تولید هیدروژن بعد از ولتاژ مشخص V 12 کاهش می‌یابد. با در نظر گرفتن برآذش 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 برآذش 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 الکتروولیز در شکل 3 و دبی حجمی هیدروژن در شکل 4 آمده است [16].

بدین ترتیب در دقیقه 16000 دبی حجمی تولید هیدروژن برابر با 4.85 میلی لیتر بر دقیقه خواهد بود. در نتیجه می‌توان میانگین تولید هیدروژن را برای این سیستم 5.07 میلی لیتر بر دقیقه در نظر گرفت. درنتیجه در صورت کار کرد این سیستم به مدت یک ساعت، 304 میلی لیتر گاز هیدروژن تولید خواهد شد [6]. به منظور افزایش میزان تولید هیدروژن به میزان حدود 50 میلی لیتر بر دقیقه چندین رویکرد وجود دارد:

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

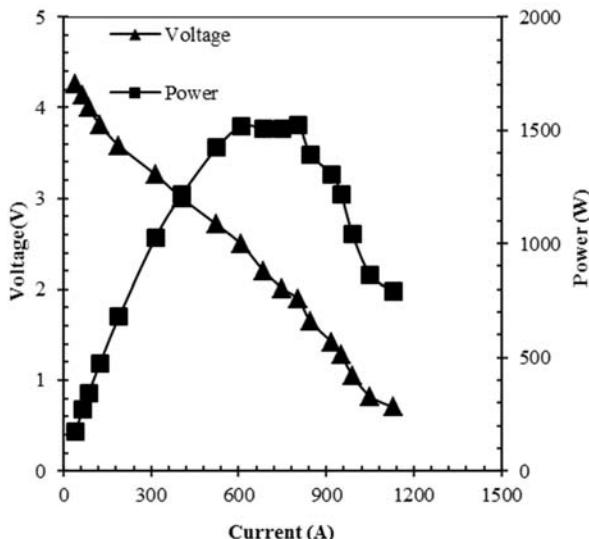


Fig. 6 Chart fuel cell polarization and lack of pre-heating the air in aerated

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

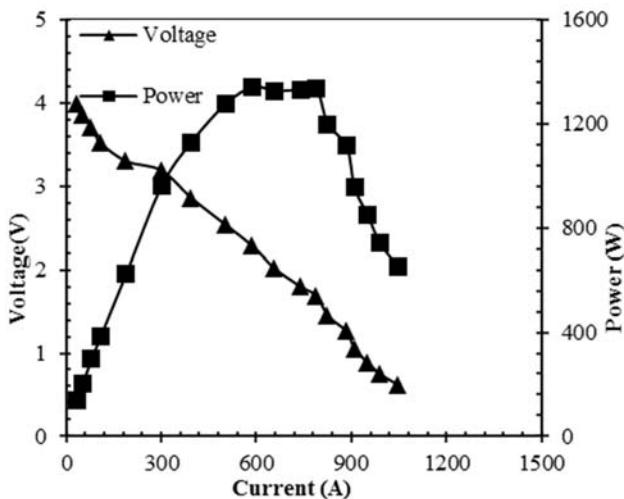


Fig. 7 Chart fuel cell polarization in a state of aerated and non-preheat the air

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 سوت 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 آزمایش های قبلی را می توان این گونه 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- رطوبت زنی هیدروژن و هوای ورودی به پیل سوختی [23-21]

در پژوهش حاضر افزایش دمای داخلی پیل سوختی، گرمایش سوت و همچنین رطوبت زنی صورت نگرفت.

3-3- منبع تغذیه/الکتروولیز/پیل سوختی

3-2- پیل سوختی

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

بیش ترین میزان توان خروجی پیل سوختی مربوط به حالتی است که هوای پیش گرم شده و از طریق فن وارد پیل سوختی می شود. همچنین نتیجه می شود هدایت 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 کسوسول هیدروژن خشک انجام پذیرفت. لیکن آزمون های نهایی به کمک الکتروولیز تولید کننده هیدروژن صورت پذیرفته است. همچنین در شکل های 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. بیش ترین میزان خروجی این پیل سوختی در حدود W 4 است. اما در تست های انجام گرفته در این پژوهش مکاریم توان خروجی پیل سوختی کمتر از W 2 بود [26-24,17,16].

با افزایش اختلاف پتانسیل دو سر الکتروودها میزان تولید هیدروژن افزایش یافته تا به نقطه ای می رسد که در آن خروجی هیدروژن تقریباً ثابت بوده و پس از آن کاهش می یابد. علت ثابت ماندن و سپس کاهش تولید هیدروژن را می توان 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.

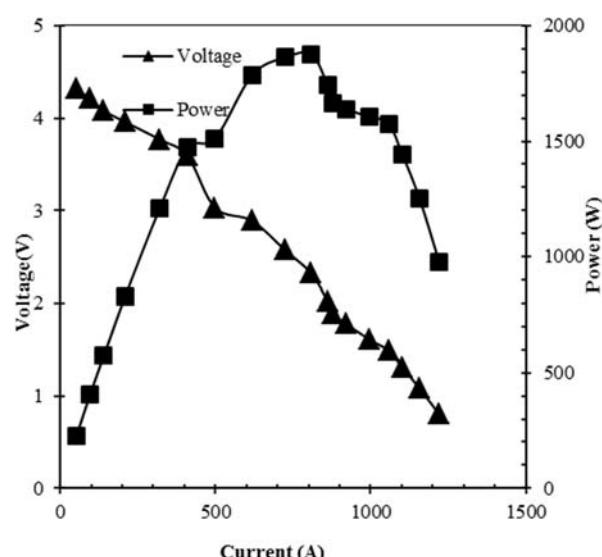


Fig. 5 Aeration and pre-heating the fuel cell polarization curve in the air

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

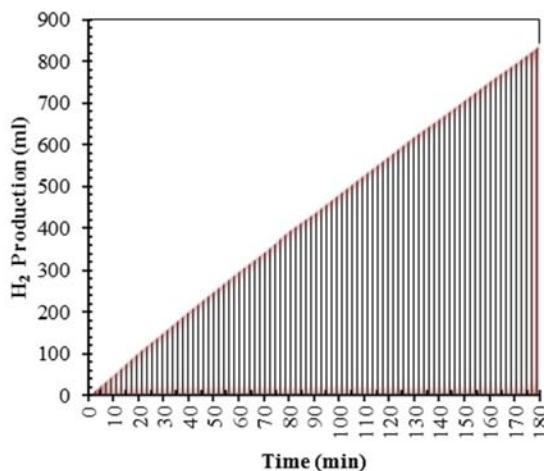


Fig. 9 The hydrogen produced in three hours

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 در ساعت پرباری خواهد بود.

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

1- تغییر الکترولیز قلبی به غشاء پلیمری که منجر به افزایش چند برابر تولید هیدروژن می‌گردد.

2- افزایش سطح الکترودها در الکترولیز 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 می‌دهد که میزان افزایش ضریب ظرفیت ناشی از استفاده از سیستم هیبریدی مذکور، تا 10-20% قابل افزایش است [7].

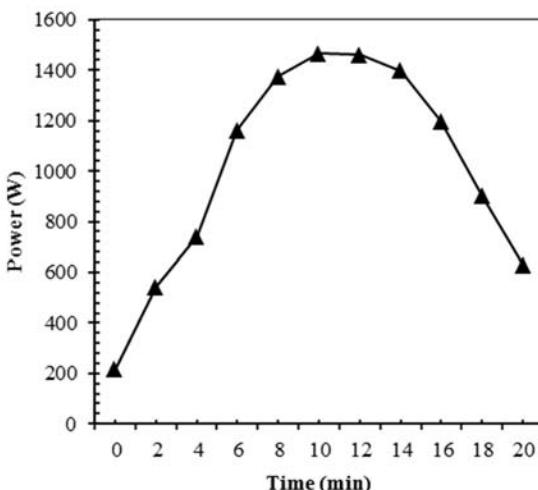


Fig. 10 The power produced by the fuel cell

شکل 10 قدرت حاصله توسط پیل سوختی

اجزای سیستم هیبریدی شامل منبع تغذیه، الکترولیز و پیل سوختی کنار هم قرار گرفتند. در این آزمون توان خروجی توسط منبع تغذیه شبیه‌سازی شد. توان خروجی وارد الکترولیز شده و در آنجا هیدروژن تولیدی ذخیره می‌گردد. پس از آنکه هیدروژن ذخیره شده به دبی مناسب رسید، وارد پیل سوختی شده و به عنوان توان کمکی وارد مدار می‌شود [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 میلی‌آمپر 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]. همچنین میزان تولید هیدروژن در سه ساعت در شکل 9 آمده است. در این نمودار مشخص می‌شود که تولید هیدروژن در سه ساعت افزایش می‌باید و تا حدود 800 میلی‌لیتر افزایش می‌یابد [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 1008 Tوان بود. از طرفی میزان توان نامی ورودی به الکترولیز در این زمان قابل حساب است.

بدین ترتیب نسبت سیستم هیبریدی باید در طول سه ساعت 90 Tوان وارد الکترولیز نماید تا پیل سوختی در 20 دقیقه بهطور متوسط 1008 mW 1008 Tوان تولید کند [24,17,16,6].

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

همچنین برای محاسبه توان به دست می‌آید [29-26,21-19,10]:

1- تولید توان توسط منبع تغذیه:

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

2- توان ورودی به الکترولیز:

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

3- مقدار هیدروژن ذخیره شده:

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

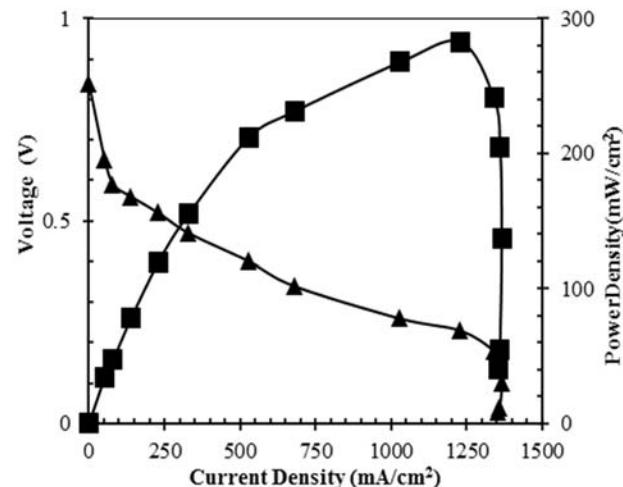


Fig. 8 Fuel cell test in laboratory

شکل 8 تست‌های انجام گرفته بر روی پیل سوختی در منبع

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

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

۷- پبل سوختی غشاء پلیمری با عمر 40000 ساعت کارکرد موردنظر قرار گرفته است.

۸- الکترولیز غشاء پلیمری با عمر 15 سال در نظر گرفته شده است.

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

همین طور اطلاعات آب و هوای منطقه کوهین در طی سه سال در جدول ۳ آمده است. همان‌گونه در فرضیات مسئله اشاره شده تقاضای برق برابر با تقاضای 250 خانوار در منطقه کوهین که هر خانوار به طور متوسط 2740 kWh در سال مصرف برق دارند و اوج مصرف برق در سال مربوط به ماه مرداد می‌باشد. متوسط میزان تقاضای برق در هرماه، 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 ۲ 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 ³)	سرعت دورانی (rads ⁻¹)	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 ۳ اطلاعات آب و هوایی منطقه کوهین در طی سه سال

Table 3 The weather data Koohin area in three years

ساله ۳ میانگین	۲۰۰۴	۲۰۰۳	۲۰۰۲	
-4	-10.2	-8	-16	(C)
40.1	37.8	42.4	40	(C)
13.9	14	13.6	14.1	(C)
54	54	55	53	(%)
358.3	326	410	339	میزان بارندگی سالانه

۴-۴- سیستم هیبرید توربین بادی / پبل سوختی / الکترولیز

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

توربین بادی قطر پره 2 متری و ارتفاع برج 2.5 متری است. منحنی توان توربین بادی استفاده شده در شکل ۱۱ آمده است که در آن توربین بادی از مارک صبا نیرو است. همچنین تعیین سرعت چرخشی توربین بادی در ابعاد مختلف در جدول ۲ آمده است.

همان‌طور که در جدول ۲ ملاحظه می‌گردد، کمترین مقدار سرعت دورانی مورد نیاز رادیان بر ثانیه یا 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.

۴- نتایج مدل سازی مطالعه

سیستم هیبریدی موردنظر متشکل از توربین بادی، پبل سوختی، الکترولیز، مخزن ذخیره هیدروژن و مبدل جریان DC به AC است. در این بخش پس از ارائه فرضیات صورت گرفته، به مدل سازی 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 کامل تری ارائه گردیده است. منطقه کوهین که در استان قزوین به عنوان یکی از مناطق بادخیز ایران که در امتداد کریدور بادی نشات گرفته از رشته کوه البرز شناخته می‌شود، به عنوان منطقه موردمطالعه در نظر گرفته شد.

۱-۱- فرضیات اولیه

فرضیات مدل به شرح زیر در دستور کار قرار گرفت:

۱- سیستم موردنظر برای تأمین برق 250 خانوار در منطقه کوهین در نظر گرفته شده است.

۲- متوسط مصرف سالانه برق هر خانوار ایرانی 2740 kWh فرض شده است.

۳- تیرماه و مردادماه به عنوان ماههای دارای بیشترین مصرف برق در نظر گرفته شده است.

۴- تحلیل اقتصادی بر مبنای قیمت انرژی^۱ و قیمت فعلی سرمایه^۲ انجام شده است.

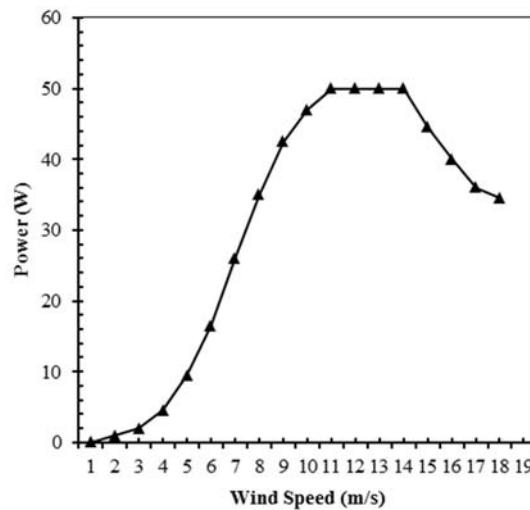


Fig. 11 Wind turbine power curve used.

شکل ۱۱ منحنی توان توربین بادی استفاده شده

¹ Cost of Energy

² 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 شده از این تعداد، 123 سناریو برای تأمین تقاضا امکان‌پذیر می‌باشدند. 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 kW 200 با تعداد توربین 4 عدد استفاده شده است.

5- جمع‌بندی

در این مقاله یک سیستم هیبریدی برای اتصال به نیروگاه بادی، جهت تأمین توان قابل اطمینان با تولید هیدروژن معروفی گردید. سیستم هیبریدی که در این مقاله معروفی شد مشتمل از چهار جزء اصلی بود: توربین بادی، الکتروولیز، ذخیره هیدروژن و پیل سوختی. سازوکار سیستم مذکور به این صورت است که در ساعات کم باری، توان اضافی تولید شده توسط توربین بادی وارد واحد الکتروولیز شده و در آنجا آب به هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌گردد. هیدروژن و اکسیژن تبدیل شده فشرده شده 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 ارض افزایش گردد. در این پژوهش ابتدا با ساخت یک نمونه آزمایشگاهی سیستم هیبریدی مذکور میزان تولید هیدروژن توسط الکتروولیز 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 الکتروولیز قلیایی افزایش فاصله بین صفحات باعث افزایش مقاومت شده و کاهش راندمان الکتروولیز را در پی دارد. در الکتروولیز قلیایی با اعمال ولتاژ و گذشت زمان صفحات آند خورده شده و بنابراین الکتروولیت نیز خاصیت خود را به مرور از دست می‌دهد و این امر باعث افزایش هزینه‌های نگهداری می‌شود. مناسب‌ترین روش الکتروولیز در سیستم‌های هیبریدی الکتروولیز 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، بدی 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

Table 5 Average wind speed at a height of 40, 60 and 80 yards

ارتفاع سنسور (m)	میزان پوشتی داده‌ها	میانگین سرعت (%)	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

Table 6 Various capacities for system components taken into account

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

یکی از دکلهای بادسنجه سازمان انرژی‌های نو ایران (سانا) در مجاورت محل مورد نظر قرار دارد. دکل بادسنجه 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 فنچانی در سه ارتفاع 60، 40 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 بادسنجه 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 پوشنش 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 گرفته شده در این پژوهش توربین kW 300 دارای ژنراتور ABB بود که مشخصات فنی آن در جدول 4 و منحنی توان آن در شکل 12 آمده است. همچنین میانگین میانگین سرعت باد در جدول 5 قابل مشاهده است.

در سیستم هیبریدی نمونه آزمایشگاهی میزان توان خروجی الکتروولیز حدوداً 50% و میزان تولید توان پیل سوختی در حالت ماکزیمم 6.7% خروجی الکتروولیز 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

Table 4 Technical specifications wind turbine NTK 300

مشخصات	مقدار واحد
توان نامی	kW
قطر روتور	m
ارتفاع هاب	m
باره سرعت	ms ⁻¹
تعداد پره	-

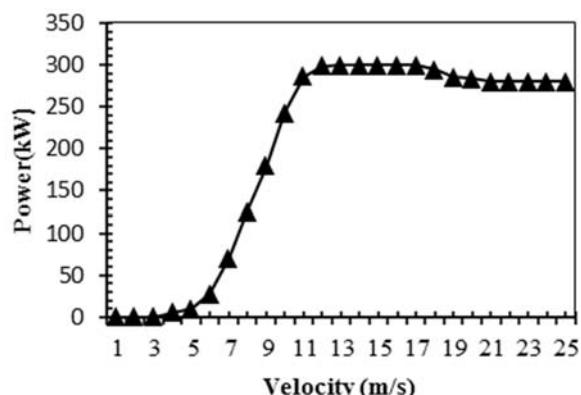


Fig. 12 Wind turbine power curve NTK 300

شکل 12 ظرفیت‌های مختلف در نظر گرفته شده 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. Raabe, 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]J. 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 میلی لیتر بود. سیستم هیبریدی ساخته شده قادر به افزایش ضربی ظرفیت توربین بادی به میزان ۱.۸% بود. در سیستم هیبریدی نمونه آزمایشگاهی میزان توان خروجی الکتروولیز حدوداً ۵۰% و میزان تولید توان پیل سوختی در حالت ماکریم ۶.۷% خروجی الکتروولیز محاسبه گردید. با در نظر گرفتن این دو مقدار، میزان توان تولیدی پیل سوختی نسبت به توان خروجی از توربین بادی ۱ به ۳۰ 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. Villafáfila-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