

شبیه‌سازی ترمودینامیکی یک سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی با کاربرد در یک سیستم مستقل از شبکه

جاماسب پیرکندی^{۱*} و رضا حربی منفرد^۲

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۴/۰۳/۱۵	هدف از ارائه این مقاله شبیه‌سازی ترمودینامیکی یک سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی پلیمری مستقل از شبکه برای به‌کارگیری در چهار شهر تهران، مشهد، منجیل و زابل می‌باشد. با توجه به اهمیت پیل سوختی در کاهش نوسانات توان خروجی توربین بادی و همچنین انعطاف‌پذیری سیستم هیبریدی در مقابل تغییرات شرایط جوی و نوسانات توان مصرفی، از چند پیل سوختی و الکترولاایزر با توان مناسب به‌کارگیری در سیستم هیبریدی استفاده شده است. هدف اولیه این پژوهش این است که توربین بادی تا چه حدی می‌تواند پاسخگوی توان مصرفی واحدهای مسکونی باشد و در صورت عدم تامین توان لازم برای تعداد واحدهای بالاتر چند پیل سوختی و الکترولاایزر مورد نیاز است. نتایج بیانگر آن است که سیستم هیبریدی برای شهر تهران، برای تعداد واحدهای کم قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد، این در حالیست که برای شهر منجیل و زابل تعداد واحدهای تحت پوشش به صورت چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین به دلیل سرعت پایین باد در شهر مشهد، سیستم هیبریدی به هیچ عنوان پاسخگوی توان مصرفی واحدهای معرفی شده نمی‌باشد. نتایج بیانگر این مساله است که با افزایش تعداد واحدهای مسکونی، سهم تامین توان توسط پیل سوختی افزایش می‌یابد. سیستم هیبریدی پیشنهادی برای شهرهای تهران، منجیل و زابل به ترتیب تا ۶، ۶۸ و ۳۴ واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی بوده و برای این تعداد واحد مسکونی سهم پیل سوختی به ترتیب ۱۰/۲، ۱۱/۳ و ۸/۳۱ درصد از توان تولیدی می‌باشد. همچنین هزینه راه‌اندازی سیستم هیبریدی معرفی شده در مقایسه با نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با سوخت فسیلی تقریباً یکسان می‌باشد.
پذیرش مقاله: ۱۳۹۶/۰۲/۲۷	
واژگان کلیدی: سیستم هیبریدی، واحد مسکونی، توربین بادی، پیل سوختی، الکترولاایزر.	

۱-مقدمه

می‌گردد [۱]. پیشرفت‌های روز افزون در زمینه انرژی‌های تجدیدپذیر باعث ایجاد قالب‌های جدیدی برای استفاده عمومی از این منابع گشته است. در این میان در سال‌های اخیر انرژی باد نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر رشد سریع‌تری را دارا بوده است. به‌کارگیری توربین‌های بادی، سیستم‌های تولید پراکنده را به سمت ایجاد یک سیستم با تولید متغیر سوق می‌دهد. از طرف دیگر این مساله از قابلیت

امروزه گرم شدن روزافزون هوای کره زمین و روند رو به رشد مصرف انرژی در جهان، استفاده از روش‌ها و سیستم‌های جدید تولید انرژی با بازدهی بالا و آلاینده‌گی پایین را در اولویت قرار داده است. عدم حضور شبکه سراسری برق در مناطق دور افتاده و هزینه بالای خطوط انتقال جدید به دلیل مسافت طولانی و عوارض نامناسب جغرافیایی اغلب منجر به جستجوی راه حل جایگزین

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: jpirkandi@mut.ac.ir

۱. دانشیار، مجتمع دانشگاهی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

۲. دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و هوافضا، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات، تهران

پرداختند. هدف آن‌ها بهینه‌سازی راندمان با در نظر گرفتن محدودیت‌های موجود نظیر افت انرژی و افزایش نرخ تعداد این سیستم‌ها بود. در این پژوهش سعی شده است تا موارد ذکر شده مورد ارزیابی قرار گیرند.

هدف از ارائه این مقاله مدل‌سازی و تحلیل یک سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی پلیمری مستقل از شبکه برای تعداد واحدهای مسکونی مختلف جهت به-کارگیری در چهار شهر تهران، مشهد، منجیل و زابل می-باشد. در این مقاله نشان داده خواهد شد که برای شهرهای فوق‌الذکر یک توربین بادی ۸۵۰ کیلوواتی پاسخگوی توان مصرفی چه تعداد واحد مسکونی می‌باشد و در صورت عدم تامین توان لازم برای تعداد واحدهای بالاتر، چند پیل سوختی و الکترولایزر مورد نیاز است. همچنین در سیستم پیشنهادی سهم تامین توان توسط پیل سوختی بررسی خواهد شد. در ادامه هزینه مصرفی برای استفاده از سیستم هیبریدی معرفی شده و مقایسه آن با نیروگاه‌های سیکل ترکیبی با سوخت فسیلی بررسی خواهد شد.

۲- ترکیب بندی سیستم هیبریدی

شماتیک سیستم هیبریدی مورد مطالعه در این پژوهش در شکل (۱) نشان داده شده است. مطابق این شکل انرژی باد توسط روتور توربین بادی به انرژی الکتریکی تبدیل شده و در ساعاتی از روز که سرعت باد به اندازه کافی زیاد است، توسط مبدل الکتریکی (تبدیل جریان مستقیم به متناوب) صرف تامین تقاضای مصرف کننده می‌شود. مازاد انرژی تولیدی در این ساعات، وارد الکترولایزر شده و توسط فرآیند الکتروشیمیایی، آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند، که این گازها می‌توانند در دو مخزن ذخیره شوند. در ساعاتی که سرعت باد پایین است و توربین باد قادر به تولید انرژی الکتریکی کافی نیست، پیل سوختی وارد مدار شده و با استفاده از هیدروژن ذخیره شده در مرحله قبل به عنوان سوخت، توان مورد نیاز سیستم را تامین می‌کند.

۳- فرضیات

در طراحی و مدل‌سازی سیستم هیبریدی، فرضیات زیر در نظر گرفته شده است:

- از توزیع دما، فشار و اجزاء شیمیایی درون پیل سوختی و الکترولایزر صرف نظر شده است.
- رفتار تمامی گازهای موجود در سیکل به صورت گاز ایده-آل فرض شده و از تغییرات انرژی جنبشی و پتانسیل در

اطمینان این سیستم‌ها به صورت قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد. به عبارت دیگر نوسانات توان خروجی به دلیل متغیر بودن سرعت باد یکی از اصلی‌ترین مشکلات استفاده از توربین‌های بادی است [۲]. برای حل این مساله، ترکیب توربین بادی و پیل سوختی به عنوان یکی از شیوه‌های نوین تولید توان مطرح شده است. سیستم‌های هیبریدی حاصل دارای راندمان بالایی بوده و پژوهشگران زیادی به همراه شرکت‌های سازنده متعدد در پی تجاری کردن این سیستم‌ها و همچنین افزایش توان و یا بازده آن‌ها می‌باشند [۳]. بررسی عملکرد این نوع از سیستم‌های هیبریدی از موضوعات علمی روز دنیا بوده و در سال‌های اخیر در کشورهای اسکاتلند، نروژ، انگلیس و برخی دیگر از کشورهای اروپایی به شدت مورد توجه قرار گرفته است.

از تحقیقات انجام شده در این زمینه می‌توان به فعالیت‌های گرینر و همکاران [۴] در سال ۲۰۰۷ اشاره کرد. آن‌ها در این تحقیق تولید هیدروژن از توربین بادی را در نروژ مورد مطالعه قرار دادند. چاوز و همکاران [۵] در سال ۲۰۱۳ یک نیروگاه هیبریدی توربین باد، صفحات خورشیدی و پیل سوختی را بر اساس هوش مصنوعی در یک منطقه دور افتاده در مکزیک تحلیل کردند. رنجر و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳ یک ترکیب توربین بادی و پیل سوختی را مورد تحلیل و بررسی قرار دادند. هدف عمده آن‌ها در این تحقیق بررسی گرمای تولیدی در سیستم و بهینه‌سازی آن با استفاده از روش الگوریتم ژنتیک بود. رحیمی و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۴ به تحلیل یک سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی پلیمری مستقل از شبکه پرداختند. آن‌ها چند سیستم هیبریدی برای پنج شهر تهران، منجیل، زابل، بینالود و هندیجان برای یک آپارتمان صد متری و برای مصرف انرژی چهار نفره طراحی کردند. آنها همچنین سیستم پیشنهادی را از دیدگاه انرژی و اقتصادی تحلیل کردند. همانطور که اشاره شد در مقاله آقای رحیمی و همکاران [۷] تنها به بررسی سیستم هیبریدی برای یک واحد مسکونی پرداخته شده است و سهم تامین توان تولیدی توسط پیل سوختی و میزان هزینه راه‌اندازی برای واحدهای آپارتمانی مختلف و مقایسه آن با نیروگاه سیکل ترکیبی با سوخت فسیلی مورد بررسی قرار نگرفته است. آندالورو و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۷ به ارزیابی عملکرد یک سیستم هیبریدی پیل سوختی و باتری‌های لیتیومی در شرایط مختلف برای تولید برق یک سیستم پیشران

ضریب توان C_p از رابطه (۳) محاسبه می‌شود [۷]. در این رابطه θ زاویه تماس سرعت باد و پره‌های توربین باد می‌باشد. بدست آوردن رابطه زاویه تماس کار دشواری بوده و از طریق نتایج تجربی و شکل (۲) بدست می‌آید.

$$C_{p,Betz} = 0.73 \left(\frac{121}{\lambda_i} - 0.58\theta - 0.002\theta^{2.14} - 13.2 \right) \times \exp(-18.4/\lambda_i) \quad (3)$$

۲-۴- الکتروولایزر

الکتروولایزر یک دستگاه الکتروشیمیایی است که توسط الکتروسیته آب را به هیدروژن و اکسیژن تجزیه می‌کند، که این گازها می‌توانند در یک مخزن ذخیره شده و متعاقباً برای تولید انرژی مورد استفاده قرار گیرند. این روش می‌تواند به پایداری منابع الکتروسیته متغیر مانند توربین‌های بادی کمک فراوانی کند. یکی از فواید الکتروولایزر تولید هیدروژن خالص است. طراحی الکتروولایزر بر اساس ارتباط بین مصرف انرژی الکتریکی و هیدروژن تولید شده است. در مجموع سل‌های الکتروشیمیایی در ولتاژ کم کار کرده و ولتاژ کلی عبوری از استک‌ها به طور معمول بین ۵۰ تا ۱۰۰ ولت است. این در حالیست که جریان الکتروولایز می‌تواند به صدها آمپر برسد که این مساله به اندازه‌ی الکتروولایزر بستگی دارد. با توجه به موارد اشاره شده توان ورودی الکتروولایزر از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۱].

$$P_{cell} = V_{cell} \times I_{cell}$$

که در رابطه بالا P_{cell} ، V_{cell} و I_{cell} به ترتیب توان خروجی سل، ولتاژ سل و جریان سل می‌باشند. با توجه به رابطه فوق با تعیین ولتاژ ورودی، جریان عبوری محاسبه می‌شود. برای حذف اثر سطح، معمولاً از چگالی جریان استفاده می‌گردد [۷]:

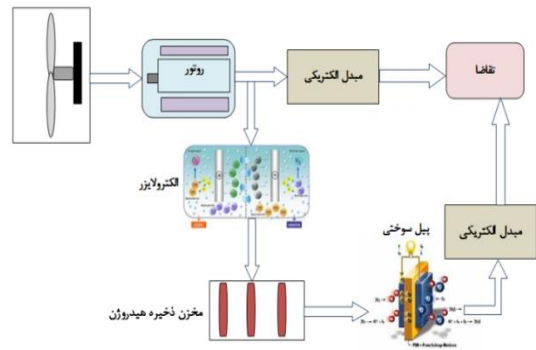
$$J = \frac{I}{A} \quad (5)$$

که در رابطه فوق J ، A و I ، به ترتیب جریان، مساحت سل و چگالی جریان الکتروولایزر می‌باشند.

ولتاژ سل در الکتروولایزر از رابطه (۶) بدست می‌آید [۷]:

$$V_{cell} = V_{cell}^0 - V_{act} - V_{ohm} \quad (6)$$

آن‌ها صرفنظر شده است.
- دمای گازهای خروجی آند و کاتد یکسان و برابر دمای کاری پیل فرض شده است.
- از نشت گاز در پیل سوختی و الکتروولایزر صرفنظر شده است.
- پیل سوختی استفاده شده در این تحقیق از نوع غشاء پلیمری در نظر گرفته شده است.



شکل ۱- شماتیک ترکیب توربین بادی و پیل سوختی پلیمری [۲]

۴- روابط حاکم بر سیستم

۴-۱- توربین بادی

بر اساس قانون بتز^۱ و با استفاده از جنبه‌های ساده پایستگی جرم، مومنتوم و انرژی، یک توربین بادی ایده‌آل، $59/3$ درصد انرژی در جرمی از هوا را می‌تواند جذب کند. بیشترین توانی که برای یک روتور ایده‌آل محاسبه می‌شود، برابر $59/3$ درصد توان بادی است که از رابطه (۳) بدست می‌آید [۷]:

$$q(v) = \frac{1}{2} \rho A v^3 C_{p,Betz} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \times 0.59 \quad (1)$$

در رابطه (۱) $C_{p,Betz}$ ، ضریب بتز نامیده می‌شود [۷]. برای توربین بادی ارتباط سرعت باد و توان خروجی از رابطه (۲) بدست می‌آید [۹ و ۱۰]:

$$P(v) = \begin{cases} 0 & v < v_{ci} \text{ یا } v > v_{co} \\ q(v) & v_{ci} \leq v < v_r \\ P_r & v_r \leq v \leq v_{co} \end{cases} \quad (2)$$

که در آن v_{ci} ، v_{co} ، v_r و $q(v)$ ، به ترتیب سرعت قطع پایین، سرعت قطع بالای باد، سرعت نامی، توان خروجی و توان نامی می‌باشند.

3. Cut-out speed
4. Stack

1. Betz's law
2. Cut-in speed

۳-۴- پیل سوختی پلیمری

پیل‌های سوختی فناوری جدیدی برای تولید انرژی هستند که بدون ایجاد آلودگی‌های زیست محیطی و صوتی، انرژی الکتریکی با بازدهی بالا تولید می‌کنند. تولید مستقیم الکتریسیته جایگزین مناسبی برای چرخه کارنو جهت تبدیل انرژی شیمیایی حاصل از احتراق سوخت به انرژی گرمایی و مکانیکی و در نهایت الکتریسیته می‌باشد، که اتلاف انرژی را به حداقل ممکن رسانده و در نتیجه می‌توان به یک بازدهی تئوری مناسب دست یافت. در این مقاله به دلیل برخی ویژگی‌های پیل سوختی پلیمری از جمله راه-اندازی سریع آن، این نوع پیل سوختی مورد استفاده قرار می‌گیرد [۷ و ۱۴]. ولتاژ واقعی خروجی از پیل سوختی با توجه به پارامترهای جدول ۱ و طبق رابطه (۱۱) بدست می‌آید [۱۴]:

$$V_{FC} = E_{ernst} - \mu_{act} - \mu_{ohm} - \mu_{con} \quad (11)$$

که در رابطه بالا E_{ernst} ، μ_{act} ، μ_{ohm} و μ_{con} به ترتیب ولتاژ استاندارد، افت ولتاژ فعال‌سازی، افت ولتاژ اهمیک و افت ولتاژ غلظتی^۴ می‌باشند.

جدول ۱- ضرایب پارامتری پیل سوختی پلیمری [۱۴]

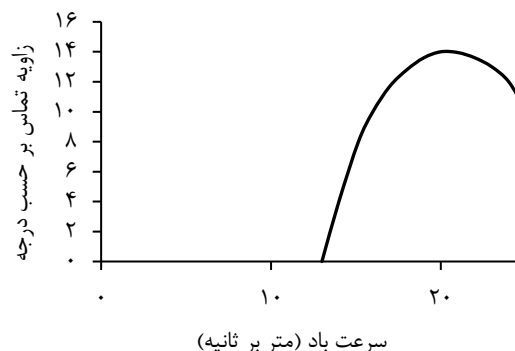
β_4	β_3	β_2	β_1
-۰/۰۰۰۱۸۷	/۰۰۰۰۷۴	۰/۰۰۳۱۲	-۰/۹۵۱۴

۴-۴- سیستم هیبریدی

توان تولیدی یا مفید سیستم هیبریدی عبارتست از مجموع توان‌های تولیدی توربین باد و پیل سوختی پلیمری با کسر توان مصرفی الکترولایزر و سایر اجزاء مصرف‌کننده سیستم هیبریدی.

$$W_{net} = W_{PEM-FC} + W_{W-T} - W_{elec} - W_{extra} \quad (12)$$

که در رابطه بالا W_{net} ، W_{PEM-FC} ، W_{W-T} ، W_{elec} و W_{extra} به ترتیب توان تولیدی سیستم هیبریدی، توان تولیدی پیل سوختی، توان تولیدی توربین بادی، توان مصرفی الکترولایزر و توان مصرفی دیگر اجزاء سیستم هیبریدی می‌باشند.



شکل ۲- زاویه تماس و سرعت باد در توربین بادی [۷]

که در رابطه (۱۰)، V_{cell}^0 ، V_{act} و V_{ohm} به ترتیب ولتاژ نرنست^۱، افت ولتاژ فعال‌سازی^۲ و افت ولتاژ اهمی^۳ می‌باشند. ولتاژ پیل در شرایط استاندارد با در نظر گرفتن تاثیرات غلظت و دما از رابطه (۷) و معادله نرنست بدست می‌آید. معمولاً مقدار V_{cell}^0 در دما و فشار استاندارد، ۱/۲۳ ولت است [۱۲، ۱۳].

$$V_{cell}^0 = E_{rev}^0 - 0.9 \times 10^{-3}(T - 298) + \frac{RT}{4F} \times \ln\left(\frac{P_{H_2}^2 \times P_{O_2}}{P_{H_2O}}\right) \quad (7)$$

$$E_{rev}^0 = 1.229 - 0.9 \times 10^{-3}(T - 298) \quad (8)$$

که در آن E_{rev}^0 ، T ، R ، F ، P_{H_2} ، P_{O_2} و P_{H_2O} به ترتیب ولتاژ برگشت‌پذیر، دمای کاری الکترولایزر، ثابت گازها، ضریب فارادی، فشار هیدروژن، فشار اکسیژن و فشار آب می‌باشند.

مقدار $J_{0,i}$ طبق رابطه (۱۰) بدست آمده و به چگالی جریان مرجع بستگی دارد [۷]

$$V_{act,i} = \frac{RT}{F} \ln\left[\frac{J}{2J_{0,i}} + \sqrt{\left(\frac{J}{2J_{0,i}}\right)^2 + 1}\right] \quad (9)$$

$$i = a, c$$

$$J_{0,i} = J^{ref} \exp\left(\frac{-E_{act,i}}{RT}\right) \quad i = a, c \quad (10)$$

که در روابط فوق J^{ref} ، a و c به ترتیب بیانگر چگالی جریان مرجع، آند و کاتد می‌باشند. در رابطه (۱۰) چگالی مرجع از مقالات، اطلاعات کارخانه‌های سازنده یا از طریق داده‌های تجربی بدست می‌آید [۷].

3.Ohmic
4.Concentration

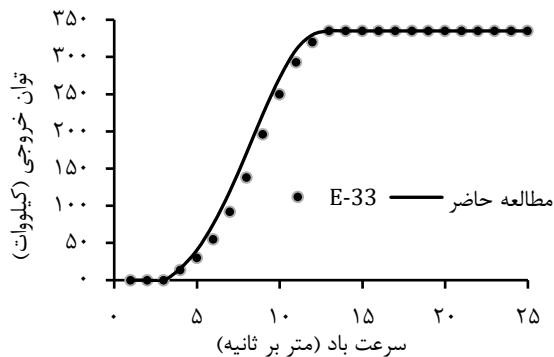
1. Nernst
2.Activation

جدول ۳- مشخصات الکترولایزر جهت اعتبارسنجی [۱۱]

مشخصات	پارامترهای بررسی شده
۸۰	دمای کاری الکترولایزر (سانتی‌گراد)
۱	فشار ورودی آب (اتمسفرد)
۱۴	ظرفیت غشاء در آند
۱۰	ظرفیت غشاء در کاتد
$1/7 \times 10^5$	چگالی جریان مرجع در آند (آمپر بر متر مربع)
$4/6 \times 10^3$	چگالی جریان مرجع در کاتد (آمپر بر متر مربع)
۷۶	انرژی فعال‌سازی در آند (کیلو ژول بر مول)
۱۸	انرژی فعال‌سازی در کاتد (کیلو ژول بر مول)
۱۰۰	ضخامت الکترولیت (میکرومتر)

جدول ۴- مشخصات توربین بادی جهت اعتبارسنجی [۱۶]

مشخصات	پارامترهای بررسی شده
۳۳۵	توان نامی (کیلووات)
۱۲/۶	سرعت نامی (متر بر ثانیه)
۲۸	سرعت قطع بالای باد (متر بر ثانیه)
۳	سرعت قطع پایین باد (متر بر ثانیه)
۱۶/۷	شعاع روتور (متر)



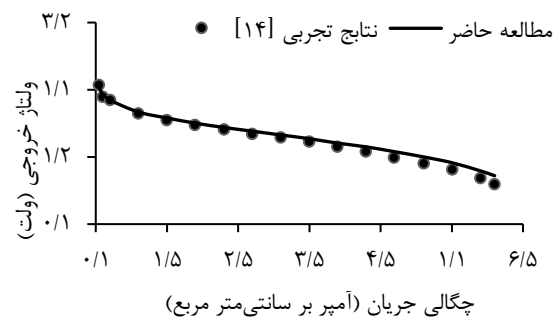
شکل ۵- مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی توربین بادی

۶- روش حل

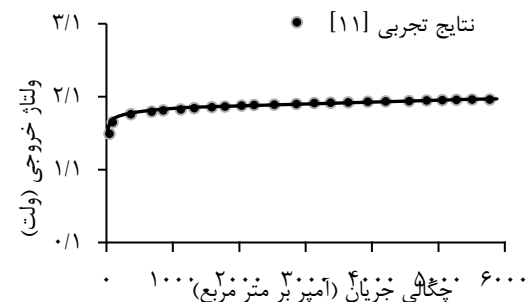
در این پژوهش در بخش تحلیل‌های توربین بادی اطلاعات میانگین سرعت باد غالب شهرهای مختلف از سازمان هواشناسی کشوری واقع در تهران بدست آمده است. شکل (۶) در این مقاله سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل‌سوختی پلیمری مطابق شکل (۷) به گونه‌ای طراحی شده است، که هر زمان توان تولیدی توربین بادی از توان مصرف کننده کمتر باشد، به تعداد مورد نیاز پیل‌سوختی و هر زمان که توان تولیدی بیشتر باشد، به تعداد مورد نیاز

۵- اعتبارسنجی

جهت اعتبارسنجی کد تهیه شده لازم است برای یک نمونه معین، نتایج حاصل از کد تهیه شده و نتایج آزمایشگاهی یا عددی موجود مقایسه گردد. با توجه به مشخصات پیل-سوختی پلیمری در جدول ۲، نتایج حاصل از کد تهیه شده با نتایج تجربی میانسری و همکاران [۱۴] در شکل (۳) مقایسه شده است. برای الکترولایزر نیز مطابق جدول ۳ نتایج حاصل از کد تهیه شده و نتایج تجربی بدست آمده توسط احمدی و همکاران [۱۱] در شکل (۴) مقایسه گردیده است. با توجه به مشخصات یک توربین بادی از شرکت انرکون در جدول ۴، نتایج تجربی با نتایج حاصل از کد تهیه شده، در شکل (۵) مقایسه شده است. همخوانی نزدیک بین این نتایج در شکل‌های ۳ تا ۵، صحت روش حاضر و کد تهیه شده را تایید می‌کند.



شکل ۳- مقایسه نتایج مطالعه حاضر با نتایج تجربی پیل-سوختی پلیمری توسط میانسری و همکاران [۱۴]

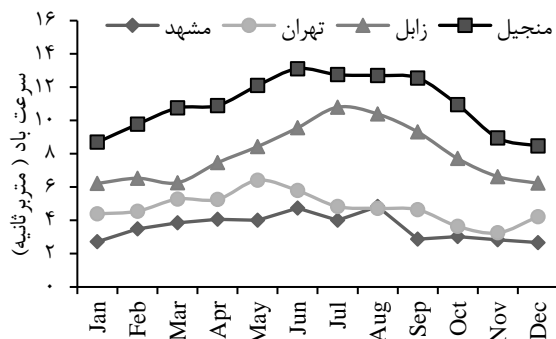


شکل ۴- مقایسه نتایج مطالعه حاضر و نتایج تجربی الکترولایزر توسط احمدی و همکاران [۱۱]

جدول ۲- مشخصات پیل‌سوختی پلیمری جهت اعتبارسنجی [۱۴]

مشخصات	پارامترهای بررسی شده
۱	فشار هیدروژن (اتمسفرد)
۰/۲	فشار اکسیژن (اتمسفرد)
۷۲	دمای سل (سانتی‌گراد)
۲۵	مساحت سل (سانتی‌متر مربع)

ذخیره هیدروژن برابر فشار و دمای شرایط استاندارد است. حجم مخزن هیدروژن با توجه به مقدار هیدروژن تولیدی از الکترولایزر از طریق معادله حالت گازهای ایده‌آل بدست می‌آید.



شکل ۶- میانگین سرعت باد غالب بین سال‌های ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳ [۱۸]

به غیر از الکترولایزر اجزاء دیگری در سیستم هیبریدی وجود دارند که مصرف‌کننده توان بوده و اطلاعات آنها در جدول ۹ آورده شده است.

هزینه راه‌اندازی نیروگاه سیکل ترکیبی با سوخت فسیلی ۱۲۳۰ دلار برای هر کیلووات در نظر گرفته شده است [۱۷]. برای محاسبه هزینه راه‌اندازی سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی پلیمری به اطلاعات داده شده توسط رحیمی و همکاران [۷] اکتفا می‌گردد (جدول ۱۰).

۸- نتایج

۸-۱- محاسبه هزینه راه‌اندازی

با توجه به جدول ۱۰، با فرض اینکه یک پیل سوختی، یک الکترولایزر و یک منبع ذخیره هیدروژن با ظرفیت ۳۰۰ کیلوگرم استفاده شده است، هزینه راه‌اندازی سیستم هیبریدی (با در نظر گرفتن هر دلار به ارزش ۳۸۰۰ تومان) چهار هزار و سیصد و نود و هشت میلیون تومان بدست آمد. باید توجه داشت که سهم پیل سوختی پلیمری ۲/۶ درصد و سهم توربین بادی ۸۰/۷ درصد هزینه کل راه‌اندازی می‌باشد. همچنین هزینه ساخت یک نیروگاه سیکل ترکیبی با توان برابر با سیستم هیبریدی با احتساب سوخت مصرفی، سه هزار و نهصد و هفتاد و سه میلیون تومان محاسبه گردید. با توجه به موارد ذکر شده می‌توان نتیجه گرفت که هزینه راه‌اندازی سیستم هیبریدی معرفی شده در مقایسه با نیروگاه سیکل ترکیبی با سوخت فسیلی تقریباً یکسان است.

الکترولایزر (برای تولید هیدروژن مورد نیاز پیل سوختی) به کار گرفته شود. این عمل سیستم هیبریدی را نسبت به شرایط مختلف جوی و توان مصرفی، انعطاف‌پذیر می‌کند. کد طراحی شده در نرم‌افزار متلب به کار برده شده است. شرط طراحی این سیستم هیبریدی بدین صورت است که به هیچ عنوان توان کلی سیستم هیبریدی از توان مصرفی کمتر نشده و همچنین سیستم قادر باشد هیدروژن مورد نیاز خود را توسط الکترولایزر تامین کند. باید توجه داشت که هیدروژن تولیدی و مصرفی سیستم هیبریدی برای بیست و چهار ساعت از روز محاسبه می‌گردد.

۷- تجهیزات

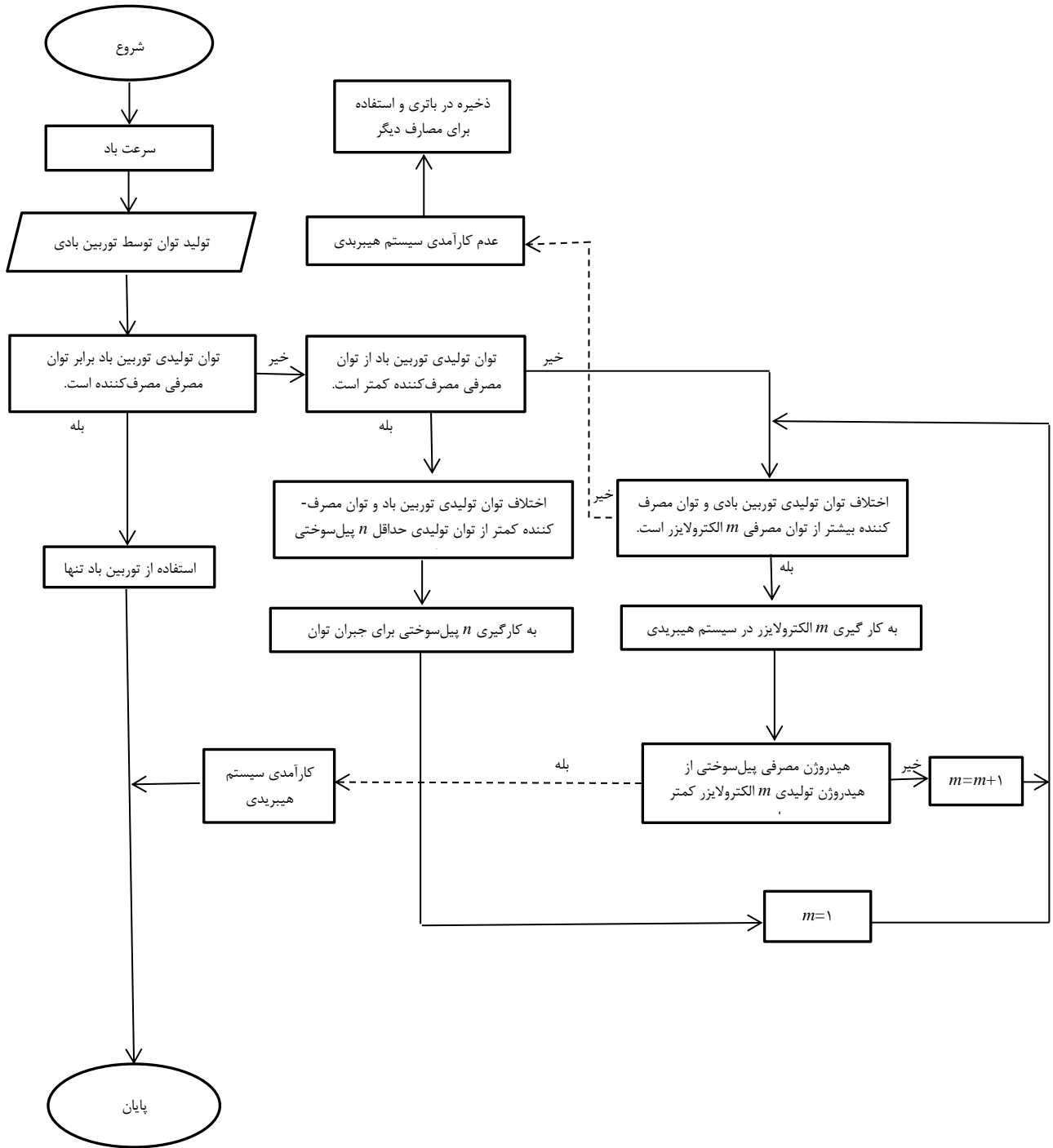
در این مقاله توان مصرفی یک واحد آپارتمانی به مساحت ۱۰۰ متر مربع و با ظرفیت چهار نفر در نظر گرفته شده است. در بخش اول بار حرارتی و برودتی این آپارتمان توسط نرم‌افزار کریر محاسبه گردید. میزان مصرف انرژی برای بخش روشنایی، برای ۲۴ ساعت در پانزدهم هر ماه میلادی در نظر گرفته شده است. برای محاسبه مصرف انرژی الکتریکی دیگر اجزاء مانند تلوزیون، یخچال، اتو، فن و ... از روش‌های تجاری استفاده شده است. رحیمی و همکاران [۷] در تحقیقی میزان مصرف انرژی یک واحد آپارتمانی را بدست آورده بودند. با توجه به نتایج آن‌ها مصرف انرژی الکتریکی شهرهای تهران، مشهد، منجیل و زابل مطابق جدول ۵ یکسان در نظر گرفته شده است. توربین بادی استفاده شده در این تحقیق یک توربین بادی ۸۵۰ کیلوواتی مدل جی-۸۵ شرکت گامسا در نظر گرفته شده است [۱۰]. دلیل انتخاب این توربین بادی حداقل کاربری آن برای ۵ واحد آپارتمانی در تهران است.

در جدول ۶ اطلاعات این نوع توربین بادی نمایش داده شده است.

در این پژوهش پیل سوختی پلیمری از شرکت بالارد با توان ۱۵ کیلووات انتخاب شده است. مشخصات فنی این پیل سوختی در جدول ۷ ارائه شده است [۱۵].

همچنین برای تولید هیدروژن در این تحقیق یک الکترولایزر با توان مصرفی ۲۱ کیلووات با توجه به مشخصات فنی ارائه شده در جدول ۸ در نظر گرفته شده است [۱۶].

باتوجه به اینکه فشار خروجی آب از الکترولایزر ۲۷ بار است، بنابراین نیازی به کمپرسور نبوده و فشار و دمای منبع



شکل ۷- ترکیب بندی فلوچارت حل سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی

جدول ۵- میانگین مصرف انرژی الکتریکی در پانزدهم هر ماه میلادی بر حسب کیلووات ساعت [۷]

ماه	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
مصرف	۱۴۰	۱۰۴/۷	۵۷/۴۱	۲۸/۴۴	۳۴۹/۷۱	۳۶۵/۴۵	۳۶۲/۵۶	۳۴۵/۳۸	۳۰/۳۴	۶۵/۱۱	۱۱۰/۵۶	۱۴۲/۷۴

جدول ۶- مشخصات فنی توربین بادی [۱۰]

توان نامی (کیلووات)	سرعت نامی (متر بر ثانیه)	سرعت قطع بالای باد (متر بر ثانیه)	سرعت قطع پایین باد (متر بر ثانیه)	سرعت دورانی (دور بر دقیقه)	قطر روتور (متر)	نوع توربین بادی
۸۵۰	۱۲	۲۳	۳	۲۲-۱۱/۵	۵۸	گامسا (جی-۸۵)

جدول ۷- مشخصات فنی پیل سوختی پلیمری [۱۵]

فشار هیدروژن (بار)	فشار اکسیژن (بار)	دمای کارکرد (سانتی‌گراد)	مساحت سل (سانتی‌متر مربع)	صخامت غشاء (میلی‌متر)	تعداد سل	هیدروژن مصرفی (کیلوگرم بر ساعت)
۱	۱	۷۲	۴۹×۱۸	۰/۱۲۷	۱۲۰	۱/۰۶

جدول ۸- مشخصات فنی الکترولیزر [۱۶]

فشار آب (بار)	تعداد سل	دمای کارکرد (سانتی‌گراد)	مساحت سل (سانتی‌متر مربع)	صخامت غشاء (میکرومتر)	چگالی جریان (آمپر بر متر مربع)	هیدروژن تولیدی (کیلوگرم بر ساعت)
۱	۳۰	۸۰	۲۵۰۰	۳۰۰	۱۵۰۰	۰/۴۵

جدول ۹- توان مصرفی اجزاء کمکی [۱۶]

مصرف کننده	توان مصرفی بر حسب کیلووات	توضیحات
منبع تغذیه DC	۱/۲۳	وظیفه کنترل جریان و تبدیل آن از مستقیم به متناوب را دارد.
PLC rack	۰/۰۵	برنامه کنترلر منطقی می‌باشد که در قسمت ورودی اطلاعات را بررسی و کنترل می‌کند.
پمپ آب الکترولیزر	۰/۳	وظیفه گردش آب را در الکترولیزر بر عهده دارد.
فن‌ها	۰/۰۵	وظیفه خنک کاری الکترولیزر را بر عهده دارد.

جدول ۱۰- داده‌های اقتصادی سیستم معرفی شده [۷]

نوع دستگاه	هزینه	طول عمر (سال)
توربین بادی	۱۱۰۰ [دلار بر کیلووات]	۲۰
برج	۲۵۰ [دلار بر متر]	۲۵
الکترولیزر	۱۵۰۰ [دلار بر کیلووات]	۱۰
مخزن هیدروژن	۵۰۰ [دلار بر کیلوگرم]	۲۵
پیل سوختی پلیمری	۲۰۰۰ [دلار بر کیلووات]	۱۰

نتایج نشان می‌دهد که سیستم هیبریدی مورد نظر فقط برای ۵ تا ۶ واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد جدول ۱۱. با توجه به تعدد واحدهای مسکونی، تنها نتایج مربوط برای ۶ واحد مسکونی ارائه شده است. همانطور که در شکل (۸) مشاهده می‌شود، توربین بادی در بعضی از ماه‌های سال قادر به تامین توان مصرفی برای شش واحد مسکونی نمی‌باشد، بنابراین با استفاده از پیل سوختی در سیستم هیبریدی این کسری توان جبران می‌شود. مطابق این شکل، توان تولیدی سیستم هیبریدی در طول سال پاسخگوی نیاز توان مصرف کننده می‌باشد. در ادامه میزان هیدروژن مصرفی و تولیدی سیستم هیبریدی نشان داده

۸-۲- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در شهرهای مختلف

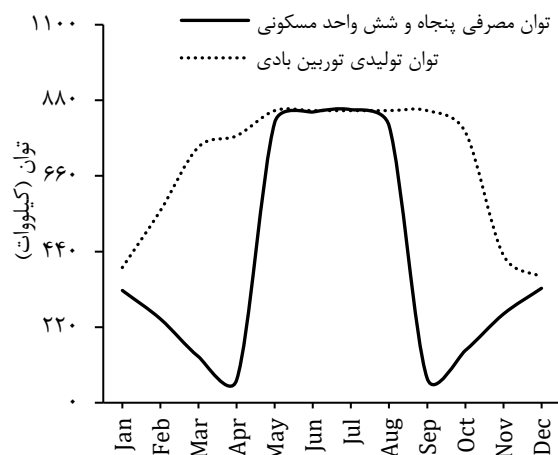
در این پژوهش سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی برای شهرهای تهران، مشهد، منجیل و زابل مدل سازی و تحلیل شده است. در تحلیل‌های انجام شده تعداد واحدهای مسکونی به عنوان یک متغیر در نظر گرفته شده است. کد مربوطه هوشمند بوده و با توجه به نیاز سیستم، تعداد پیل سوختی و الکترولیزر و در نتیجه میزان مصرف و تولید هیدروژن را محاسبه می‌کند.

۸-۲-۱- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در تهران

۸-۲-۳- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در منجیل

با توجه به سرعت بالای باد در منجیل، توربین بادی انرژی مورد نیاز ۵ تا ۵۶ واحد و سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی انرژی مورد نیاز ۵۷ تا ۶۸ واحد مسکونی را تامین می‌کند (جدول ۱۲ و ۱۳). در این تحقیق نتایج مربوط به توربین بادی برای ۵۶ واحد و سیستم هیبریدی برای ۶۸ واحد مسکونی آورده شده است. همانطور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود، علی‌رغم تغییر سرعت باد از ماه می تا سپتامبر توان تولیدی توربین بادی ثابت است.

دلیل این مساله همانطور که در شکل ۷ نشان داده شده این است که سرعت باد در این ماه‌ها از سرعت نامی توربین بادی بیشتر بوده و در این مدت توربین بادی حداکثر توان مجاز خود را تولید می‌کند. همچنین مشاهده می‌شود که در طول سال توربین بادی قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد. این در حالیست که برای تعداد واحدهای بالاتر، توان تولیدی توربین بادی پاسخگوی توان مصرفی نمی‌باشد.



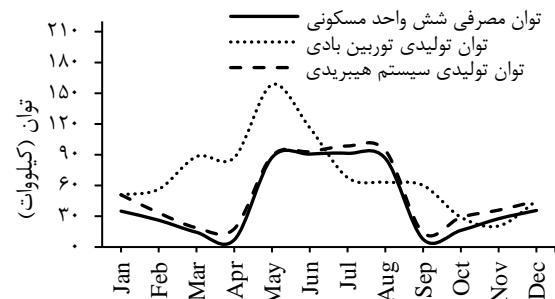
شکل ۱۰- مقایسه توان مصرفی ۵۶ واحد مسکونی و توان

مطابق شکل ۱۱ سیستم هیبریدی برای ۶۸ واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی بوده و این تعداد، حداکثر تعداد واحدی است که سیستم هیبریدی قادر به تامین توان آن می‌باشد. همانطور که در شکل ۱۲ مشاهده می‌شود به تعداد مورد نیاز پیل سوختی و الکتروایزر در ماه‌های مختلف سال به کار گرفته شده است. به عنوان مثال در ماه جولای، ۱۳ پیل سوختی و در ماه اکتبر، ۲۵ الکتروایزر استفاده می‌گردد. همچنین سیستم هیبریدی در طول سال قادر به تامین هیدروژن مصرفی خود می‌باشد.

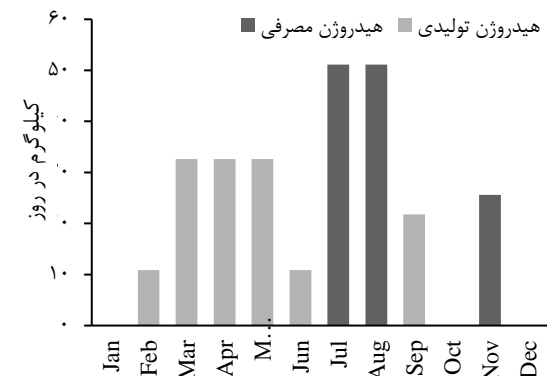
شده است شکل (۹). همانطور که مشاهده می‌شود به تعداد مورد نیاز پیل سوختی و الکتروایزر در ماه‌های مختلف سال به کار گرفته شده است. به عنوان مثال در ماه جولای، ۲ پیل سوختی و در ماه می ۳ الکتروایزر استفاده می‌گردد. همچنین در ماه‌های ژانویه، اکتبر و دسامبر به دلیل اینکه توان تولیدی توربین بادی از توان مصرفی شش واحد مسکونی بیشتر است، نیازی به استفاده از پیل سوختی نمی‌باشد. از سوی دیگر به دلیل اینکه این اختلاف توان از توان مصرفی الکتروایزر کمتر است، نیازی به استفاده از الکتروایزر نمی‌باشد. برای سایر ماه‌های میلادی با توجه به مقدار هیدروژن مصرفی، الکتروایزر به تعداد مورد نیاز استفاده شده است.

۸-۲-۲- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در مشهد

با توجه به سرعت پایین باد در مشهد سیستم هیبریدی حتی برای ۱ واحد مسکونی هم قابل استفاده نمی‌باشد. دلیل این مساله این است که هرچه تعداد پیل‌های سوختی بیشتر گردد، توربین بادی قادر به تولید توان برای الکتروایزر جهت تولید هیدروژن نمی‌باشد.

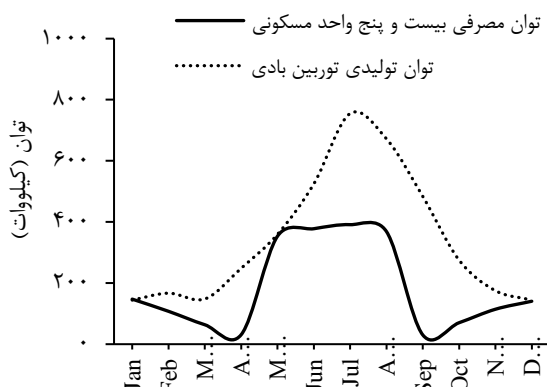


شکل ۸- سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی برای شش واحد مسکونی در تهران

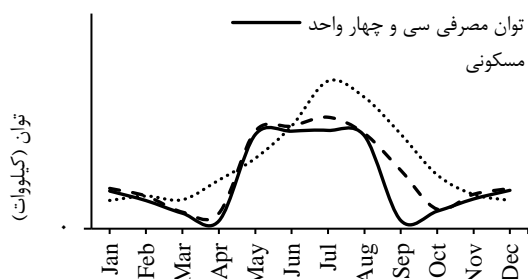


شکل ۹- مقایسه هیدروژن تولیدی و مصرفی سیستم هیبریدی برای شش واحد مسکونی در تهران

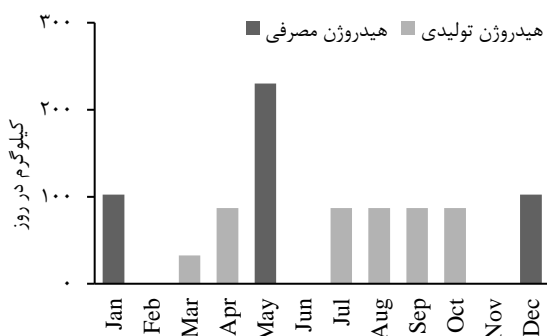
۸ الکتروولایزر استفاده می‌گردد. همچنین سیستم هیبریدی در طول سال قادر به تامین هیدروژن مصرفی خود می‌باشد. در ماه‌های فوریه، ژوئن و نوامبر به دلیل اینکه توان تولیدی توربین بادی از توان مصرفی سی و چهار واحد مسکونی بیشتر است، نیازی به استفاده از پیل سوختی و نیز به دلیل اینکه این اختلاف توان از توان مصرفی الکتروولایزر کمتر است، نیازی به استفاده از الکتروولایزر نمی‌باشد. برای سایر ماه‌های میلادی با توجه به مقدار هیدروژن مصرفی، الکتروولایزر به تعداد مورد نیاز استفاده شده است.



شکل ۱۱- سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی برای شصت و هشت واحد مسکونی در منجیل



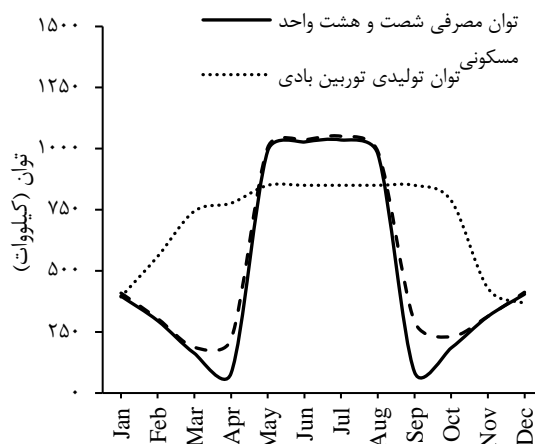
شکل ۱۲- مقایسه هیدروژن تولیدی و مصرفی سیستم هیبریدی برای شصت و هشت واحد مسکونی در منجیل



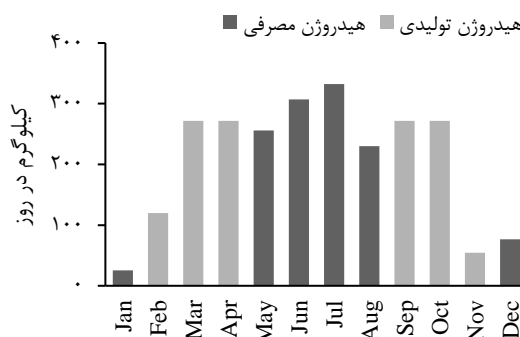
شکل ۱۳- مقایسه توان مصرفی ۲۵ واحد مسکونی و توان تولیدی یک توربین بادی ۸۵۰ کیلوواتی برای شهر زابل

شکل ۱۴- سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی برای سی و چهار واحد مسکونی در زابل

شکل ۱۵- مقایسه هیدروژن تولیدی و مصرفی سیستم هیبریدی برای سی و چهار واحد مسکونی در زابل



شکل ۱۶- سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی برای شصت و هشت واحد مسکونی در منجیل



شکل ۱۷- مقایسه هیدروژن تولیدی و مصرفی سیستم هیبریدی برای شصت و هشت واحد مسکونی در منجیل

۸-۲-۴- سیستم هیبریدی و توربین بادی و پیل سوختی در زابل

مطابق شکل ۷، با توجه به سرعت مناسب باد در شهر زابل، توربین بادی انرژی مورد نیاز ۵ تا ۲۵ واحد و سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی، ۲۶ تا ۳۴ واحد مسکونی را تامین می‌کند (جدول (۱۱ تا ۱۴)). با توجه به تعداد زیاد اشکال تنها به رسم داده‌های سیستم هیبریدی برای ۳۴ واحد مسکونی اکتفا می‌گردد.

همانطور که در شکل ۱۳ نمایش داده شده است، توربین بادی تا ۲۵ واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد. همچنین مطابق شکل ۱۴ سیستم هیبریدی تا ۳۴ واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی بوده و این تعداد حداکثر تعدادی است که سیستم قادر به تامین توان آن می‌باشد. مطابق شکل ۱۵، در ماه‌های مختلف سال به تعداد مورد نیاز پیل سوختی و الکتروولایزر به کار گرفته شده است. به عنوان مثال در ماه می، ۹ پیل سوختی و در ماه جولای،

جدول ۱۱- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در شهر تهران

تعداد واحد مسکونی	تعداد پیل سوختی	تعداد الکترو لایزر	هیدروژن مصرفی (کیلوگرم)	هیدروژن تولیدی (کیلوگرم)	تامین تقاضا توسط پیل سوختی بر حسب درصد
۵	۱	۲	۷۶/۷	۱۰۸/۷	۵
۶	۲	۳	۱۲۷/۸	۱۴۱/۳	۱۰/۲

جدول ۱۲- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در شهر منجیل

تعداد واحد مسکونی	تعداد پیل سوختی	تعداد الکترو لایزر	هیدروژن مصرفی (کیلوگرم)	هیدروژن تولیدی (کیلوگرم)	تامین تقاضا توسط پیل سوختی بر حسب درصد
۵-۵۶	—	—	—	—	—
۵۷	۲	۱	۷/۷	۹۷/۸	۰/۶

جدول ۱۳- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در شهر منجیل

تعداد واحد مسکونی	تعداد پیل سوختی	تعداد الکترو لایزر	هیدروژن مصرفی (کیلوگرم)	هیدروژن تولیدی (کیلوگرم)	تامین تقاضا توسط پیل سوختی بر حسب درصد
۵۸	۲	۲	۱۰۲/۳	۱۵۲/۲	۱/۱۶
۵۹	۳	۳	۱۷۹	۲۱۷/۴	۱/۹۲
۶۰	۴	۴	۲۸۱/۳	۲۸۲/۷	۳
۶۱	۵	۶	۳۸۳/۶	۴۰۲/۴	۴
۶۲	۶	۸	۵۱۱	۵۱۱/۸	۵/۱۳
۶۳	۷	۱۰	۶۱۳/۸	۶۱۹/۸	۶/۲۴
۶۴	۸	۱۲	۷۱۶/۱	۷۱۷/۶	۷/۳
۶۵	۹	۱۵	۸۴۳/۹	۸۴۸/۱	۸/۳۳
۶۶	۱۰	۱۸	۹۴۶/۲	۹۶۷/۷	۹/۳۳
۶۷	۱۱	۲۱	۱۰۷۴/۲	۱۰۹۸/۳	۱۰/۳۱
۶۸	۱۳	۲۵	۱۲۲۷/۶	۱۲۶۱/۴	۱۱/۳

جدول ۱۴- سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در شهر زابل

تعداد واحد مسکونی	تعداد پیل سوختی	تعداد الکترو لایزر	هیدروژن مصرفی (کیلوگرم)	هیدروژن تولیدی (کیلوگرم)	تامین تقاضا توسط پیل سوختی بر حسب درصد
۵-۲۵	—	—	—	—	—
۲۶	۲	۲	۱۰۲/۳	۱۹۵/۷	۱/۶۱
۲۷	۲	۲	۱۲۷/۸	۱۹۵/۷	۲/۶۶
۲۸	۳	۲	۱۷۹	۱۹۵/۷	۳/۶۴
۲۹	۴	۳	۲۰۴/۶	۲۵۰	۴/۵۵
۳۰	۵	۴	۲۵۵/۷	۳۰۴/۴	۵/۴
۳۱	۶	۵	۳۰۶/۹	۳۴۷/۷	۶/۲
۳۲	۷	۵	۳۳۲/۴	۳۳۷	۶/۹۵
۳۳	۸	۷	۴۰۹/۹	۴۴۵/۸	۷/۶۵
۳۴	۹	۸	۴۳۴/۷	۴۶۷/۷	۸/۳۱

۹- نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

تهران، با توجه به سرعت کم باد، تنها قادر به تامین توان مصرفی پنج تا شش واحد مسکونی و در شهر منجیل به دلیل سرعت بالای باد، برای پنجاه و هفت تا شصت و هشت واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد. همچنین به دلیل سرعت مناسب باد در شهر زابل، توربین بادی برای پنج تا بیست و پنج واحد و سیستم هیبریدی برای بیست و شش تا سی و چهار واحد مسکونی قادر به تامین توان مصرفی می‌باشد. از سوی دیگر نتایج نشان می‌دهد که سیستم هیبریدی برای شهر مشهد به دلیل سرعت پایین باد حتی برای یک واحد مسکونی قابل استفاده نمی‌باشد. با افزایش تعداد واحدهای مسکونی، سهم تامین توان توسط پیل سوختی افزایش می‌یابد.

در این مقاله سیستم هیبریدی توربین باد و پیل سوختی مورد تحلیل و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که هزینه راه‌اندازی سیستم هیبریدی توربین بادی و پیل سوختی در مقایسه با نیروگاه سیکل ترکیبی تقریباً یکسان است. در بخش دیگر این پژوهش سیستم هیبریدی برای چهار شهر تهران، مشهد، منجیل و زابل برای واحدهای مسکونی مختلف طراحی و تحلیل شد. توان مصرفی شامل توان مورد نیاز واحدهای مسکونی و همچنین الکتروولتاژ، برای تامین هیدروژن می‌باشد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که سیستم هیبریدی در

مراجع

- [۱] م. جهانگیری، ا. صداقت، "طراحی سیستم ترکیبی پیل خورشیدی- توربین بادی- سیستم هیدروژن مطالعه موردی: الیگودرز"، ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست، تهران، ۱۳۹۱.
- [۲] س. احمدی، م. میرقائد، ر. روشن‌دل، "مدل‌سازی سیستم ترکیبی توربین بادی- پیل سوختی و سهم پیل سوختی در تأمین تقاضای الکتریکی در یک منطقه نمونه"، نشریه علمی پژوهشی مدیریت انرژی، سال ۲، شماره ۳، ۱۳۹۱، صفحه ۱۹-۲۱.
- [3] J. Brouwer, "Hybrid Gas Turbine Fuel Cell Systems", National Fuel Cell Research Center, University of California, See also URL <http://www.nfrcr.uci.edu>. Accessed June 2, 2014.
- [4] C. Greiner, M. Korpas, A. Holen, "A Norwegian case study on the production of hydrogen from wind power", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 32, No. 10, 2007, pp. 1500–1507.
- [5] A. Chavez-Ramirez, V. Vollejo-Becerra, J. Cruz, R. Ornelas, R. Munoz-Guerrero, I. Arriago, "A hybrid power plant (solar/wind/hydrogen) model based in artificial intelligence for a remote-housing application in Mexico", International Journal of Hydrogen Energy, Vol. 38, No. 36, 2013, pp. 2641–2655.
- [6] M. Ranjbar, M. Mohammadian, S. Esmaili, "Economic analysis of hybrid system consists of fuel cell and wind based CHP system for supplying grid-parallel residential load", Energy and Buildings, Vol. 68, 2014, pp. 476–487.
- [7] S. Rahimi, M. Meratizaman, M. Monadzadeh, M. Amidpour, "Techno-economic analysis of wind turbine-PEM (polymer electrolyte membrane) fuel cell hybrid system in standalone area", Energy, Vol. 67, 2014, pp. 381–396.
- [8] L. Andaloro, A. Arista, G. Agnello, G. Napoli, F. Sergi, V. Antonucci, "Study and design of a hybrid electric vehicle (Lithium Batteries-Pem FC)", Hydrogen Energy, Vol. 52, 2017, pp. 1–19.
- [9] J. Pramod, Wind energy engineering, McGraw-Hill Professional, 2010.
- [10] C. Carrillo, A. Montano, J. Cidras, E. Diaz-Dorado, "Review of power curve modeling for wind turbines", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 21, 2013, pp. 572–581.

- [11] P. Ahmadi, I. Dincer, M. Rosen, "Energy and exergy analyses of hydrogen production via solar-boosted ocean thermal energy conversion and PEM electrolysis", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 38, No. 4, 2013, pp. 1795–1805.
- [12] A. Awasthi, K. Scott, S. Basu, "Dynamic modeling and simulation of a proton exchange membrane electrolyzer for hydrogen production", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 36, No. 22, 2011, pp. 14779–14786.
- [13] P. Esmaili, I. Dincer, G. Naterer, "Energy and exergy analyses of electrolytic hydrogen production with molybdenum-oxo catalysts", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 37, No. 9, 2012, pp. 7365–7372.
- [14] Me. Miansari, K. Sadeghi, M. Amidpour, E. Alizadeh, Mo. Miansari, "Experimental and thermodynamic approach on proton exchange membrane fuel cell performance", *Journal of Power Sources*, Vol. 190, 2009, pp. 356–361.
- [15] Fuel cell products, <http://www.ballard.com/fuel-cell-products>, Accessed 20 June 2014.
- [16] Hydrogen and fuel cell research, <http://www.nrel.gov/hydrogen>, Accessed 22 June 2014.
- [17] Leading clean energy innovation, http://www.nrel.gov/analysis/re_futures, Accessed 18 April 2015.
- [18] <http://www.irimo.ir/>, Accessed June 2, 2014.