

## طراحی، کنترل و مدیریت انرژی سیستم هیبرید PV/WG/CHP-FC برای کاربردهای مستقل از شبکه

احمد روحانی، امین روحانی، محمد مهدی قنبریان و میلاد الهی

دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیضا، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، بیضا، ایران [rouhani@biau.ac.ir](mailto:rouhani@biau.ac.ir)  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون، دانشکده فنی و مهندسی، کازرون، ایران [a.rohani@aol.com](mailto:a.rohani@aol.com)  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد کازرون، دانشکده فنی و مهندسی، کازرون، ایران [m\\_ghanbarian@yahoo.com](mailto:m_ghanbarian@yahoo.com)  
دانشگاه آزاد اسلامی، واحد بیضا، دانشکده فنی و مهندسی، بیضا، ایران [milad\\_elahi2005@yahoo.com](mailto:milad_elahi2005@yahoo.com)

### چکیده

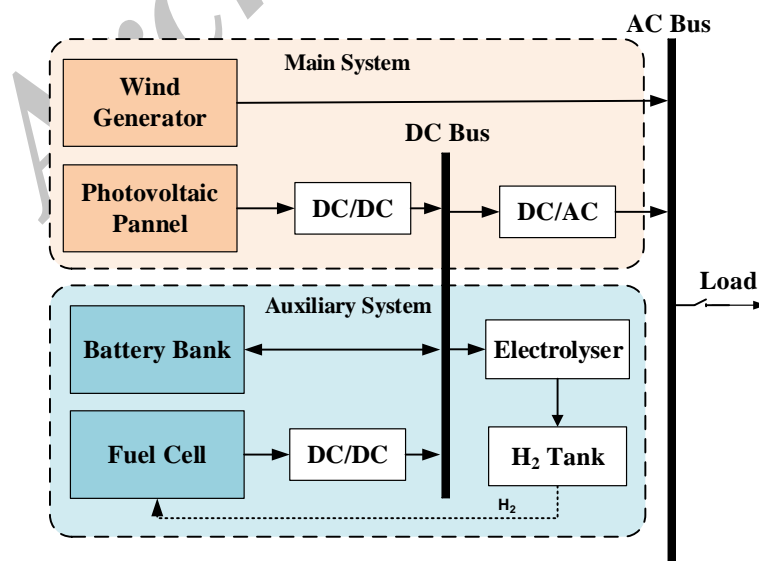
در این مقاله سیستم هیبرید فتوولتائیک-بادی/CHP-پیل سوختی جهت کاربردهای مستقل از شبکه طراحی شده است. هدف از این طراحی بررسی عملکرد و مدیریت انرژی این سیستم هیبرید می باشد. ترکیب سیستم شامل سه منبع انرژی شامل مولد فتوولتائیک، بادی و CHP-پیل سوختی می باشد. انرژی حاصل از توربین های بادی، پنل های فتوولتائیک و CHP منابع اصلی سیستم بوده و از ترکیب پیل سوختی-الکترولیزور به همراه باتری به عنوان سیستم ذخیره سازی استفاده شده است. سیستم کنترل و مدیریت انرژی جامعی جهت کنترل توان تولیدی منابع موجود در سیستم و واحدهای ذخیره سازی طراحی شده است. سیستم مذکور با Matlab/Simulink شبیه سازی شده و کارایی آن در شرایط مختلف عملکرد با اطلاعات واقعی پروفیل بار و هواشناسی شهر شیراز مورد بررسی قرار گرفته شده است. از نتایج بهینه سازی چنین استنباط می گردد که سیستم مورد مطالعه جهت استفاده در کاربرد های مستقل از شبکه در مناطق دور افتاده بخصوص در کاربردهای گلخانه ای عملی و مقرون به صرفه است.

واژه های کلیدی: پیل سوختی، توربین بادی، سیستم هیبرید انرژی، فتوولتائیک، مدیریت انرژی، CHP.

### مقدمه

افزایش چشم گیر مصرف انرژی، طبیعت تجدیدناپذیر سوخت‌های فسیلی، هزینه‌های سنگین سوخت‌های فسیلی، نگرانی‌های موجود در زمینه زیست‌محیطی و مشکلاتی از این قبیل، عوامل اصلی در توسعه‌ی انرژی‌های تجدیدپذیر می‌باشند. در این بین انرژی‌های بادی و خورشیدی از مهمترین منابع تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. به همین خاطر توسعه سیستم‌های تولید انرژی با مولد بادی (WG) و مولد فتوولتائیک (PV) پیشرفت قابل توجهی داشته است [۱]. در این میان استفاده از سیستم‌های تولید همزمان بر پایه محرک اولیه پیل سوختی به خاطر راندمان بالا، قابلیت انشعاب، عملکرد بدون صدا، اثرات زیست‌محیطی کم، ظرفیت کوچک می‌تواند تکنولوژی ایده‌آلی برای تولید قدرت توزیعی و محلی باشد [۲]. به هر حال هر یک از تکنولوژی‌های یاد شده دارای معایبی نیز می‌باشند. اشکال اصلی انرژی بادی و خورشیدی الگوی فصلی و متناوب آن و وابستگی زیاد آن به شرایط محیطی می‌باشد، در حالی که تقاضای توان مصرف کننده مشخصه‌ای متفاوت دارد. بنابراین سیستم‌های مبتنی بر PV اغلب به همراه دیگر منابع انرژی تجدیدپذیر سیستم استفاده می‌شوند. همچنین سوخت مصرفی FCها نیز گران است. اما با ترکیب چند تکنولوژی و با کنترل و مدیریت درست، می‌توان سیستم هیبرید با قابلیت اطمینان بالا برای تأمین بار مناطق مختلف به کار برد [۳-۱۰].

منابع انرژی متعددی شامل WG, PV, FC, مولدهای دیزلی، توربین‌های گازی و میکروتوربین‌ها در ترکیب با یکدیگر می‌توانند سیستم هیبرید انرژی تشکیل دهند [۳-۱۰]. به خاطر خاصیت تناوبی باد و خورشید، نیاز به ذخیره‌سازی انرژی در شرایط مطلوب جهت استفاده در مواقع نیاز کاملاً محسوس می‌باشد. اغلب از باتری برای ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود [۱۱و۱۲]. از ترکیب FC و الکترولیزور نیز جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده شده است [۷-۱۰و۱۲]. در برخی از مطالعات ترکیب باتری و FC برای ذخیره‌سازی ترجیح داده شده است [۱۳و۱۴]. و در برخی از مراجع، استفاده از دو منبع فوق برای ذخیره‌سازی به تفکیک از لحاظ هزینه مقایسه شده‌اند [۱۴و۱۵]. ولی آنچه در این زمینه کمتر دیده می‌شود، بررسی جامع عملکرد سیستم بهینه شده و منابع ذخیره‌سازی می‌باشد. در این مقاله پس از بهینه‌سازی ابعاد سیستم به بررسی عملکرد سیستم هیبرید PV/WG/CHP-FC/ فتوولتائیک- بادی با ذخیره‌سازی باتری و ترکیب FC با الکترولیزور در طی یک روز کاری سیستم پرداخته شده است. ساختار سیستم هیبرید، بلوک کنترلی، نتایج شبیه‌سازی و آنالیز اقتصادی در بخش‌های بعدی آورده شده‌اند.



شکل ۱- بلوک دیاگرام سیستم هیبرید PV/WG/CHP-FC

شکل (۱) سیستم هیبرید انرژی مورد مطالعه را نشان می‌دهد. در این سیستم CHP-FC، WG و PV به عنوان منابع اصلی در نظر گرفته می‌شوند. در حالی که از ترکیب FC و الکترولیزور به همراه باتری به عنوان سیستم پشتیبان و ذخیره‌کننده استفاده می‌شود. از آنجا که منابع انرژی اصلی و ذخیره‌ساز همگی سازگار با محیط زیست می‌باشد این سیستم تولید انرژی، کاملاً با محیط زیست سازگار است [۱۰ و ۱۱]. هنگامی که انرژی بادی یا خورشیدی مازاد بر تقاضای بار موجود باشد، الکترولیزور روشن شده و شروع به تولید هیدروژن می‌کند. هیدروژن تولید شده در تانک ذخیره‌سازی نگهداری می‌شود. در صورتی که ظرفیت تانک ذخیره‌سازی هیدروژن تکمیل باشد، توان اضافی به Dump load تحویل داده می‌شود. در مواقعی که توان تولیدی کاهش می‌یابد، FC با هیدروژن ذخیره شده در تانک ذخیره‌سازی و در موارد خالی بودن این تانک به کمک هیدروژن ذخیره شده در تانک پشتیبان توان مورد نیاز سیستم را تأمین خواهد کرد. در این سیستم از باتری نیز جهت ذخیره‌سازی انرژی استفاده می‌شود.

در این سیستم، منابع مختلف انرژی به باس DC متصل شده و به وسیله یک اینورتر DC/AC بار را تأمین می‌کند. سیستم به راحتی قابل گسترش بوده و منابع انرژی قابل دسترس دیگری را با توجه به شرایط منطقه مورد نظر می‌توان به سیستم اضافه کرد.

### مشخصات و ابعاد سیستم

هدف از نگارش این بخش برقراری نسبت مناسبی میان تولید و مصرف در سیستم هیبرید مورد نظر جهت تأمین بارهای محلی در منطقه ای دور از شبکه می‌باشد. در این راستا تعیین ابعاد سیستم جهت قابلیت اطمینان مناسب برق تولیدی و همچنین بهینه بودن از لحاظ اقتصادی ضروری می‌باشد. بدین منظور باید اختلاف توان تولیدی ( $P_{Gen}$ ) از انرژی‌های نو و تقاضای بار ( $P_{Load}$ ) طبق معادله (۱) در یک بازه زمانی حداقل گردد [۱۵]. که در این مقاله بازه زمانی یک روزه در نظر گرفته شده است.

$$\Delta P = P_{Gen} - P_{Load} \quad (1)$$

از نقطه نظر طراحی، بهینه‌سازی ابعاد و واحدهای هیبرید بسیار مهم می‌باشد و منجر به یک رابطه مناسب بین هزینه و اجرا خواهد شد. قبل از بهینه‌سازی ابعاد سیستم بایستی پروفیل بار، شدت تابش و میزان سرعت باد قابل دسترس را ارزیابی کرد، بنابراین این موارد در بخش‌های ذیل ارائه خواهند شد.

### منحنی‌های پروفیل بار الکتریکی و حرارتی

پروفیل بار الکتریکی و حرارتی یک شبانه‌روز نمونه برای مصرف یک مجموعه از واحدهای مسکونی با در نظر گرفتن گلخانه در منطقه‌ای دور از شبکه استفاده شده در شبیه‌سازی، به ترتیب در شکل (۲) و شکل (۳) نشان داده شده است [۱۶ و ۱۷].

متوسط پروفیل بار الکتریکی حدود ۷/۳ کیلو وات می‌باشد که منجر به مصرف سالیانه حدود ۶۳/۸۸ مگا وات می‌شود. پیک بار مصرفی ۱۰ کیلووات و حداقل مصرف ۵ کیلووات می‌باشد. متوسط پروفیل بار حرارتی نیز ۳/۵ کیلو وات می‌باشد.

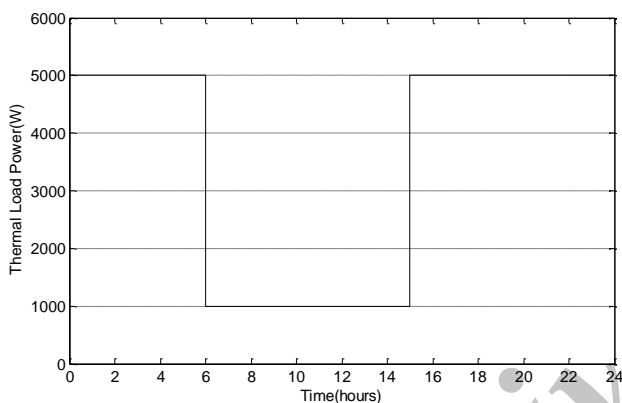
### اطلاعات تابش خورشید

توان حاصل از انرژی خورشیدی بطور قابل ملاحظه‌ای وابسته به شرایط محیطی می‌باشد و بنابراین غیر قابل پیش‌بینی است. اطلاعات تابش خورشید استفاده شده در سیستم، میانگین تابش روزانه بر یک متر مربع در طول ۱۰ سال شهر شیراز

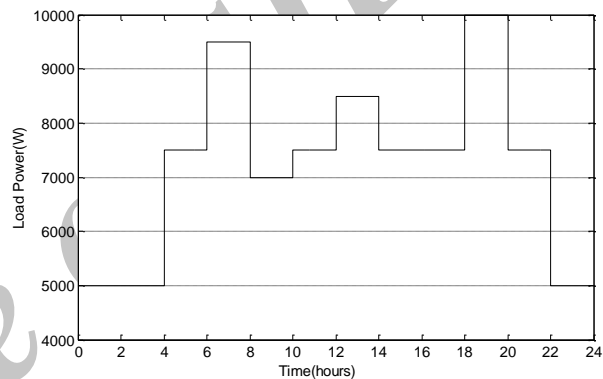
می باشد که در شکل (۴) آورده شده است [۱۸]. بیشترین میانگین تابش در ماه Jun در حدود ۷۵۰۰ Wh و کمترین میانگین تابش در حدود ۲۸۰۰ Wh در ماه Dec می باشد. در ادامه این سیستم با توجه به اطلاعات مربوط به یک روز نمونه در ماه تیر بررسی می شود. لذا منحنی تابش خورشید در یک شبانه روز در شکل (۵) آورده شده است.

### اطلاعات وزش باد

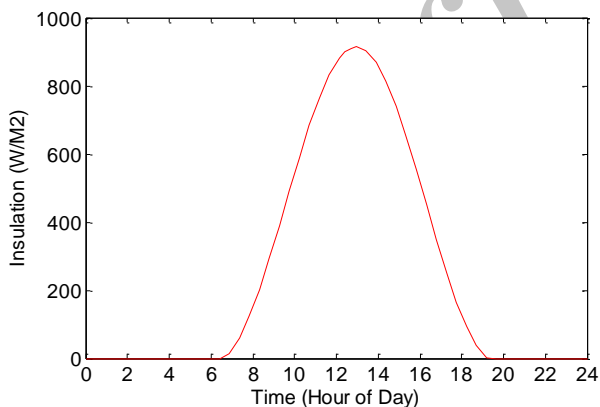
میزان سرعت باد نیز میانگین ماهیانه شهر شیراز در طول ۱۰ سال می باشد که این مقادیر در ارتفاع ۱۰ و ۵۰ متر در شکل (۴) قابل مشاهده است. سرعت باد در ارتفاع ۱۰ متر در ماه Jun به میزان ۵/۹ m/s می باشد و میانگین سالیانه سرعت باد در این ارتفاع ۵/۰۹ m/s است [۱۸]. منحنی سرعت باد در یک شبانه روز در شکل (۶) آورده شده است.



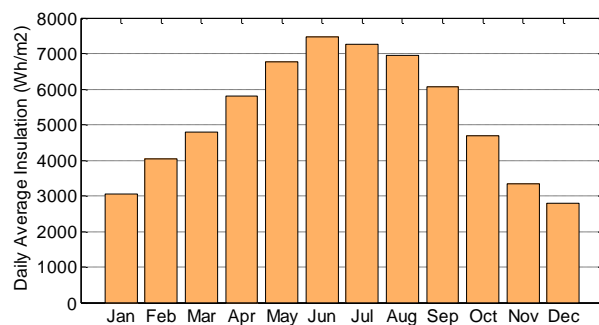
شکل ۳- پروفیل بار حرارتی در یک شبانه روز



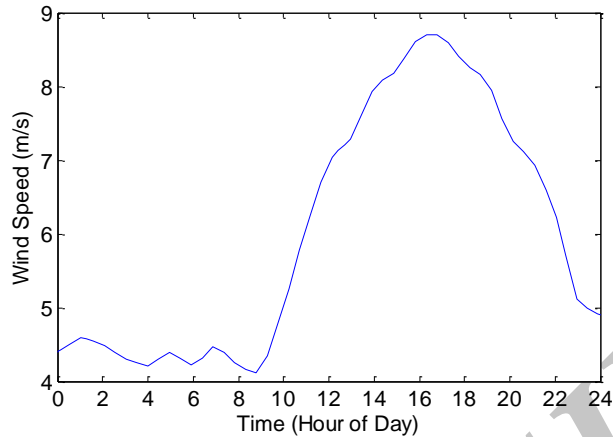
شکل ۲- پروفیل بار الکتریکی در یک شبانه روز



شکل ۵- شدت تابش خورشید در یک شبانه روز



شکل ۴- میانگین روزانه تابش خورشید در شهر شیراز



شکل ۶- سرعت باد در یک شبانه روز

### مشخصات اجزاء سیستم

به منظور طراحی سیستم بهینه با مدیریت انرژی و نیز مشاهده عملکرد سیستم در شرایط مختلف، وجود اطلاعات کافی از ساختار هر یک از اجزاء ضروری است. سیستم مورد نظر متشکل از توربین بادی، پنل فتوولتائیک، پیل سوختی، الکترولیزور و باتری می‌باشد. مبدل‌های DC/AC و AC/DC و DC/DC استفاده شده در شبیه‌سازی دارای راندمان ۹۵٪ می‌باشند. در این بخش هر یک از این اجزاء بررسی می‌شوند.

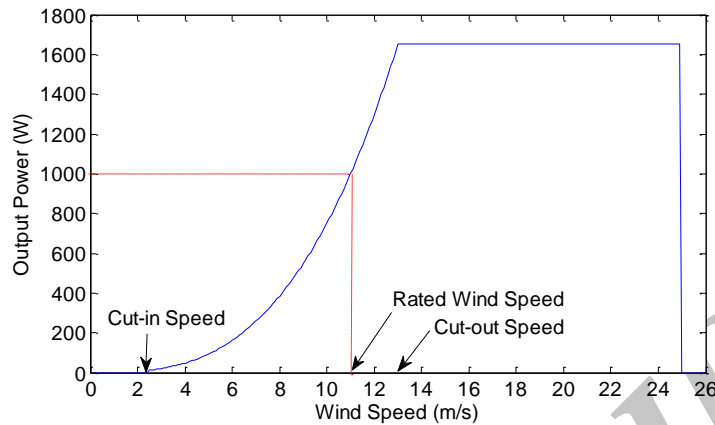
### توربین بادی

تحقیقات متعددی بر روی توربین‌های بادی صورت گرفته است [۱۹ و ۱۳]. توربین بادی با تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی مکانیکی و سپس با انتقال این انرژی به ژنراتور، الکتریسیته تولید می‌کند. توان خروجی توربین بادی از معادله (۲) بدست می‌آید [۷ و ۵ و ۳ و ۱ و ۲۰]. در این رابطه  $P_{wg}$  توان مکانیکی خروجی توربین،  $C_p$  ضریب عملکرد توربین بادی به صورت تابعی از نسبت سرعت ماکزیمم ( $\lambda$ ) و زاویه چرخش ( $\theta$ )،  $\rho$  چگالی هوا ( $kg/m^3$ )،  $A$  سطح در بر گیرنده پره‌های توربین ( $m^2$ ) و  $V_w$  سرعت باد می‌باشد.

$$P_{wg} = 0.5 C_p(\lambda, \theta) \rho A V_w^3 \quad (2)$$

توان توربین بدست آمده، توسط مبدل AC/DC به باس DC انتقال می‌یابد. در شکل (۷) توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد ترسیم شده است. مشاهده می‌شود توان خروجی توربین از مقدار مشخصی از سرعت باد به بعد ثابت شده و برای سرعت‌های بیشتر از سرعت ماکزیمم، توربین متوقف می‌شود.

مشخصات و پارامترهای توربین بادی استفاده شده در شبیه‌سازی در جدول (۱) آورده شده است [۲۱ و ۶].



شکل ۷- توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد

جدول ۱- مشخصات توربین بادی

توربین بادی	
۱ KW	توان نامی
۲/۵ m/s	سرعت قطع پایین
۱۱ m/s	سرعت نامی
۱۳ m/s	سرعت قطع بالا
۲/۵ m	قطر روتور
۶۰ Hz	فرکانس نامی
۳۲۰۰ \$	هزینه سرمایه اولیه
۱۰۰ \$/year	هزینه نگهداری و عملکرد
۱۵ سال	طول عمر
۱/۲۲۵ Kg/m <sup>3</sup>	چگالی هوا

### پنل فتوولتائیک

سیستم فتوولتائیک فرآیندی است که انرژی خورشید را به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند. سلول‌های خورشیدی از لحاظ فیزیکی شباهت بسیاری به دیوهای p-n دارند. سلول‌های فتوولتائیک چند بلوری در حال حاضر بهترین انتخاب از لحاظ قیمت و کیفیت می‌باشند. آنها بازده کمتری از تکنولوژی تک بلوری ارائه می‌دهند اما ارزانتر می‌باشند. این موارد دلیل استفاده این تکنولوژی در اکثر سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد.

توان تولیدی PV از معادله (۳) بدست می‌آید [۱۳ و ۲۲].

$$P_{pv} = \text{insolation} \times \eta_{pv} \times S_{pv} \quad (3)$$

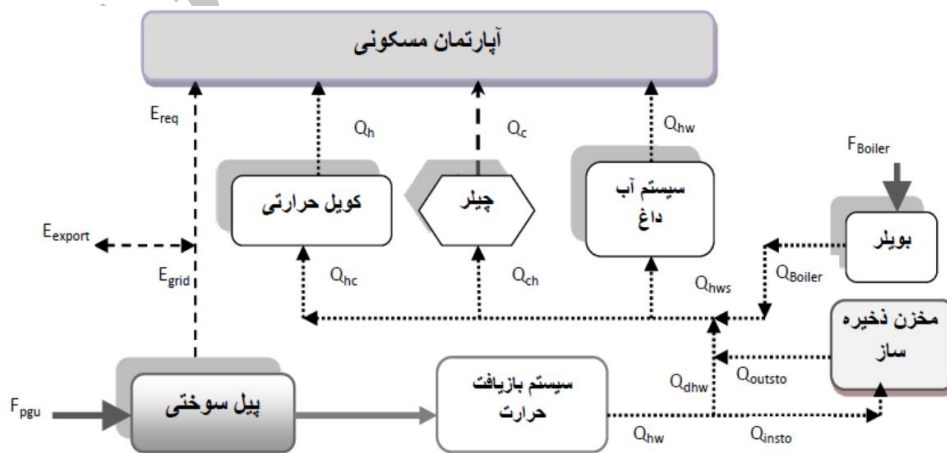
در این رابطه  $S_{pv}$  سطح PV بر حسب متر مربع،  $\eta_{pv}$  بازده PV، و تابش نیز بر حسب وات بر متر مربع می‌باشد. در مدل PV از اثر دما بر سطح پنل صرف‌نظر شده است. سایر مشخصات PV در جدول (۲) ملاحظه می‌شود [۲۳].

جدول ۲- مشخصات پنل فتوولتائیک

پنل فتوولتائیک	
تکنولوژی	پلی کریستالین
توان ماکزیمم	۱۲۰ W
راندمان	۱۲ %
سطح هر ماژول	۱/۰۷ m <sup>2</sup>
P <sub>max</sub> در ولتاژ	۱۶/۸ V
P <sub>max</sub> در جریان	۷/۱۲ A
جریان اتصال کوتاه	۷/۷۴ A
ولتاژ مدار باز	۲۱ V
هزینه سرمایه اولیه	۴/۸۴ \$/W <sub>peak</sub>
هزینه نگهداری و عملکرد	۰ \$/year
طول عمر	۲۰ سال

### پیل سوختی CHP

فن آوری تولید همزمان برق و گرما (CHP)، از لحاظ ترمودینامیکی به معنی تولید همزمان دو شکل معمول انرژی یعنی برق و گرما، با استفاده از یک منبع انرژی اولیه می باشد. انرژی گرمایی از بازیافت تلفات گرمای این مولدهای مستقل به دست می آید و این گرما در بخش های مختلف صنعتی، تجاری و مسکونی به کار گرفته می شود. از طرفی الکتریسیته تولیدی توسط این فنآوری به صورت محلی و مستقل و غیرمتمرکز بوده که این دو ویژگی در کنار یکدیگر، کارایی مولدهای تولید برق را به میزان قابل توجهی افزایش می دهد. کارایی سامانه های معمول به روش متمرکز در حدود ۲۷ تا ۵۵ درصد می باشد و بیشترین کارایی مربوط به نیروگاه های سیکل ترکیبی است. در حالیکه با بهره گیری تولید همزمان برق و گرما به صورت مستقل، کارایی انرژی این مولدها به ۹۰ درصد نیز خواهد رسید. سامانه های CHP به دلیل تولید کارآمد، انعطاف پذیر و انرژی پاک، مزیت های بسیاری را به همراه دارند. شکل (۸) جریان انرژی در CHP نشان می دهد [۱۷، ۲۴ و ۲۵].



شکل ۸- جریان انرژی در CHP

از مهمترین این سامانه‌ها می‌توان به توربین‌های گاز، موتورهای پیستونی، میکروتوربین‌ها، موتورهای استرلینگ و پیل-های سوختی که همگی مجهز به سامانه بازیافت گرما هستند، اشاره نمود. پیل‌های سوختی با استفاده از انرژی شیمیایی حاصل از ترکیب اکسیژن و هیدروژن، برق و گرما همراه با محصول جانبی آب تولید می‌کنند. با توجه به نوع الکترولیت ۵ نوع پیل سوختی شامل پیل سوختی اسیدفسفریکی (PAFC)، پلیمری (PEMFC)، قلیایی (AFC)، کربنات مذاب (MCFC) و اکسیدجامد (SOFC) وجود دارند. سه نوع پیل سوختی اسیدفسفریکی، پلیمری، قلیایی دما پائین بوده و زمان استارت به کار کوتاهی دارند ولی البته در قیاس با دو نوع دیگر از بازدهی پائین‌تری برخوردارند. سوخت این سه نوع پیل سوختی باید هیدروژن باشد لذا به رفورمر جهت تبدیل سایر سوخت‌ها به هیدروژن و دی‌اکسیدکربن نیاز است.

دو نوع کربنات مذاب و اکسیدجامد در دماهای بالا کار کرده و نیاز به زمان استارت طولانی‌تری دارند لذا برای کاربردهای حمل و نقل مناسب نبوده ولی به دلیل بازدهی بالا (بیش از ۵۰٪) افق روشنی در کاربردهای نیروگاهی و CHP در مقیاس بزرگ برای آنها وجود دارد. این مولدهای برق سوخت‌های فسیلی را به صورت داخلی به هیدروژن تبدیل می‌کنند بنابراین، نیازی به استفاده از رفورمرها ندارند [۲].

پیل سوختی استفاده شده در شبیه‌سازی از نوع PEM (Proton Exchange Membrane) می‌باشد. این نوع FC با سوخت هیدروژن و در شرایط نرمال (از ۳۰ تا ۲۰۰ درجه سانتیگراد و فشار ۱ اتمسفر) کار می‌کند و دارای بازده الکترونیکی در حدود ۵۰ درصد می‌باشد [۱۴و۳]. توان FC مذکور معادل ۷۵۰۰ W در نظر گرفته شده است. توان FC در یک مقدار ثابت تنظیم گردیده است و توان خالص FC می‌تواند معادل با توان متوسط بار گردد. باید توجه داشت که سیستم FC به حدود ۲۰ درصد توان خالص جهت تامین مصرف داخلی نیاز دارد.

## الکترولیزور

الکترولیزور وسیله‌ای است که از تجزیه آب، هیدروژن و اکسیژن تولید می‌کند. الکترولیزور در شبکه را می‌توان به عنوان بار غیر خطی DC در نظر گرفت [۱]. در این مقاله الکترولیزور علاوه بر تامین هیدروژن مورد نیاز FC، به عنوان Dump load نیز به کار گرفته شده است. تکنولوژی استفاده شده برای الکترولیزور از نوع Alkaline می‌باشد. این نوع الکترولیزور به مدت طولانی در صنعت استفاده شده است به طوری که طول عمر آن به حدود ۲۰ سال رسیده است و هزینه کمتری نسبت به انواع دیگر آن دارد (حدود ۲ برابر ارزانتر از نوع PEM می‌باشد) [۱۴]. توان الکترولیزور از معادله (۴) بدست می‌آید.

$$P_{\text{Electrolyser}} = P_{\text{PV}} - P_{\text{Load}} \quad (4)$$

که  $P_{\text{Load}}$  توان مصرفی بار می‌باشد.

## باتری

باتری انتخاب شده جهت شبیه‌سازی از نوع lead-acid می‌باشد، برتری این نوع باتری بر موارد مشابه در راندمان بالا، هزینه پایین و تخلیه خودی کم (کمتر از ۵ درصد در ماه) می‌باشد. عیب اصلی آن وزن بالاست که در سیستم‌های ساکن قابل چشم پوشی است [۲۶]. توان ورودی باتری با توجه به عملکرد شارژ یا دشارژ می‌تواند مثبت یا منفی باشد. توان باتری از معادله (۵) بدست می‌آید.

$$P_{\text{Bat}} = P_{\text{PV}} + P_{\text{FC}} - P_{\text{Load}} \quad (5)$$

وضعیت شارژ باتری (State of Charge)، طبق معادله (۶) از انرژی و راندمان باتری استنباط می‌شود [۱۴].

$$SOC_{\text{Bat}} = \int (P_{\text{bat charging}} \times \eta_{\text{bat}} - P_{\text{bat discharging}}) dt \quad (6)$$



CHP پیل سوختی در زمانی که وضعیت شارژ باتری از مقدار آستانه پائین تر گردد، فعال می شود. برعکس هنگامی که SOC باتری بالاتر از مقدار آستانه گردد، FC متوقف و الکترولیزور شروع به کار می کند. سایر مشخصات الکترولیزور و باتری در جدول (۳) ملاحظه می شود [۱۴و۱۶].

جدول ۳- مشخصات پیل سوختی، الکترولیزور، باتری

CHP- پیل سوختی	
PEMFC	تکنولوژی
۷۵۰۰ W	توان نامی الکتریکی
۶۰۰۰ W	توان نامی حرارتی
۵۰ %	راندمان
۸۰ °C	دمای عملکرد
۸ \$/W	هزینه سرمایه اولیه
۶ \$/W	هزینه جایگذاری
۵۰۰۰ ساعت	طول عمر
۱۰۰۰ W	توان بویلر کمکی
۱۰۰۰ W	توان ذخیره ساز گرمایی
الکترولیزور	
Alkaline	تکنولوژی
۷۵۰۰ W	توان نامی
۷۴ %	راندمان
۲۰ \$/W	هزینه سرمایه اولیه
۲۰ سال	طول عمر
باتری	
Lead-acid	تکنولوژی
۲۰ \$/KWh	هزینه سرمایه اولیه
۵ سال	طول عمر

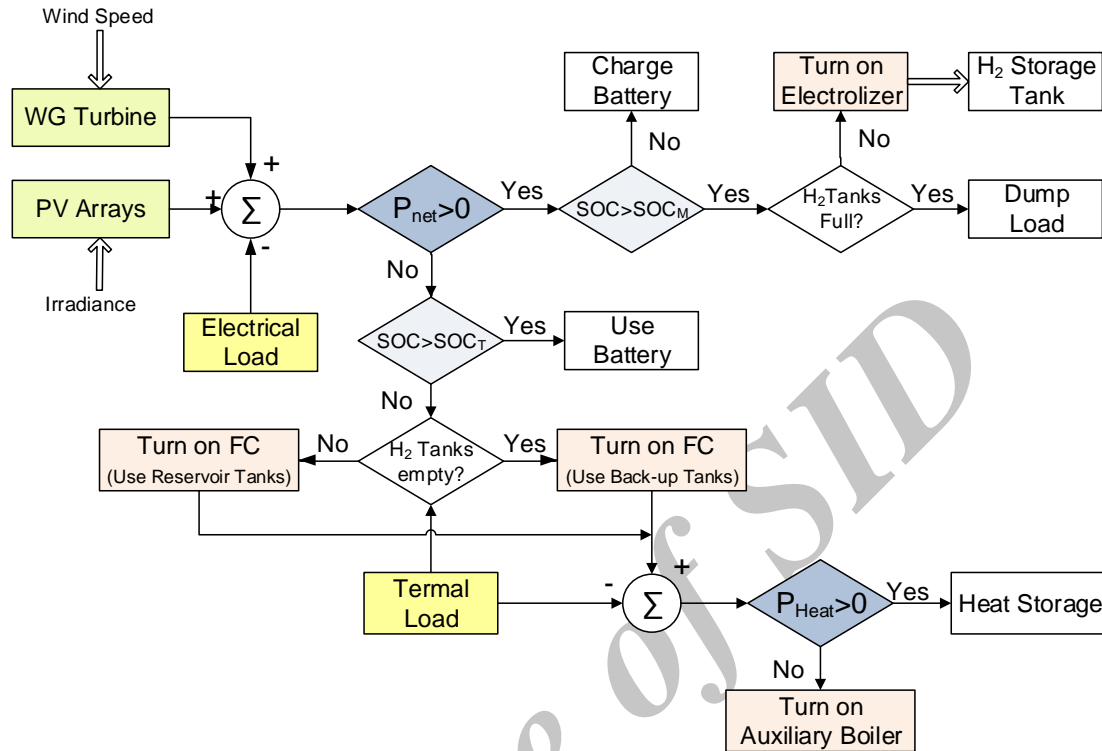
### استراتژی کنترل و مدیریت انرژی

روش های مختلفی جهت مدیریت و کنترل سیستم های هیبرید انرژی با منابع غیر پیوسته نظیر باد و خورشید وجود دارد که هر کدام مزیت و معایب خاص خود را دارد [۱۰ و ۱۳ و ۱۷].

شکل (۹) فلوچارت سیستم کنترلی پیشنهادی مربوط به سیستم هیبرید مورد مطالعه را نشان می دهد. توان تولیدی ( $P_{Gen}$ ) از معادله (۷) و اختلاف توان تولیدی و بار طبق معادله (۸) محاسبه می شود:

$$P_{Gen} = N_{WG} P_{WG} + N_{PV} P_{PV} \quad (۷)$$

$$P_{Net} = P_{Gen} - P_{Load} - P_{sc} \quad (۸)$$



شکل ۹- فلوچارت کنترلی سیستم هیبرید

$N_{PV}$  تعداد پنل های PV،  $N_{WG}$  تعداد توربین های بادی،  $P_{Gen}$  کل توان تولیدی بادی و فتوولتائیک،  $P_{WG}$  توان تولیدی به وسیله توربین بادی،  $P_{PV}$  توان تولیدی با مولد فتوولتائیک،  $P_{Load}$  بار و  $P_{sc}$  توان مربوط به مصرف داخلی سیستم می باشد. مصرف داخلی سیستم شامل توان مصرفی اجزاء جانبی سیستم نظیر سیستم های خنک کننده، واحد کنترلی و کمپرسور گاز می باشد [۱]. جهت ساده سازی، در این مقاله فقط توان مصرفی توسط کمپرسور ( $P_{comp}$ ) در نظر گرفته شده است. با توجه به اینکه در سیستم هیبریدی مورد مطالعه از تکنولوژی CHP استفاده شده است، استراتژی کنترل یک نقش کلیدی جهت اطمینان از رضایت مندی هر دو تقاضای انرژی الکتریکی و حرارتی دارا می باشد. بنابراین بایستی سیستم کنترلی هم برای تامین بار الکتریکی و هم جهت تامین بار حرارتی در نظر گرفته شود [۲۷-۳۰].

#### حالت ۱: سیستم کنترلی جهت تامین بار الکتریکی

استراتژی کنترلی سیستم به این صورت است که اگر توان تولید شده توسط PV برابر با تقاضای بار الکتریکی باشد ( $P_{Net} = 0$ )، طبق معادله (۹)، کل توان تولیدی، توسط اینورتر به بار تحویل داده می شود.

$$P_{WG} + P_{PV} = P_{Load} \quad (9)$$

اگر ( $P_{Net} > 0$ ) توان اضافی تولید شده توسط WG و PV در هر لحظه از زمان به الکترولیزور جهت تولید هیدروژن و ذخیره در تانک ذخیره سازی (جهت تامین سوخت پیل سوختی)، تحویل داده می شود. بنابراین معادله توان داده شده در معادله (۹) به صورت زیر نوشته می شود:

$$P_{WG} + P_{PV} = P_{Load} + P_{Elec} + P_{Comp} \quad P_{Net} > 0 \quad (10)$$

هنگامی که توان تولیدی توانایی تأمین بار را نداشته باشد ( $P_{Net} < 0$ )، CHP پیل سوختی با استفاده از هیدروژن شروع به تولید انرژی کرده و بار درخواستی را تأمین می کند. در این شرایط معادله توان به صورت زیر بیان می گردد:

$$P_{WG} + P_{PV} + P_{CHP,E} = P_{Load} \quad P_{Net} < 0 \quad (11)$$

که  $P_{CHP,E}$  توان الکتریکی تولیدی توسط CHP می باشد. در صورتی که تانک اصلی هیدروژن خالی باشد، FC جهت تأمین بار در مواقع مورد نیاز از هیدروژن موجود در تانک پشتیبان استفاده خواهد کرد.

## حالت ۲: سیستم کنترلی جهت تأمین بار حرارتی

با عنایت به این نکته که طول عمر پیل های سوختی وابسته به مدت زمان در سرویس بودن آنها دارد، پس اقتصادی نمی باشد آنها بطور پیوسته در سرویس قرار داشته باشند. در نتیجه در این استراتژی، به هنگام درخواست بار حرارتی توسط مصرف کننده ها، سیستم CHP پیل سوختی با سوخت هیدروژن فعال می شود.

$$P_{Heat} = P_{CHP,H} - P_{Thermal} \quad (12)$$

$P_{Heat}$  اختلاف توان حرارتی تولیدی توسط CHP ( $P_{CHP,H}$ ) و بار حرارتی درخواستی ( $P_{Thermal}$ ) می باشد.

اگر  $P_{Heat}$  طبق معادله (۱۱) کمتر از صفر باشد، CHP پیل سوختی توانایی تأمین بار حرارتی را نداشته و یا در سرویس قرار نگرفته است. که در این حالت از بویلر کمکی ( $P_{Boiler}$ ) جهت تأمین بار حرارتی استفاده می شود.

$$P_{CHP,H} + P_{Boiler} = P_{Thermal} \quad P_{Heat} < 0 \quad (13)$$

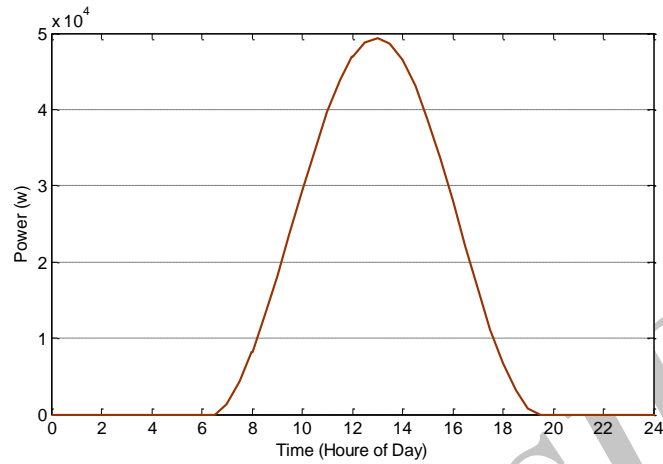
اگر  $P_{Heat} > 0$  باشد، توان حرارتی اضافی تولید شده توسط CHP پیل سوختی در تانک ذخیره گرمایی (Heat Storage) برای مواقع مورد نیاز ذخیره می گردد.

$$P_{CHP,H} = P_{Thermal} + P_{HS} \quad P_{Heat} > 0 \quad (14)$$

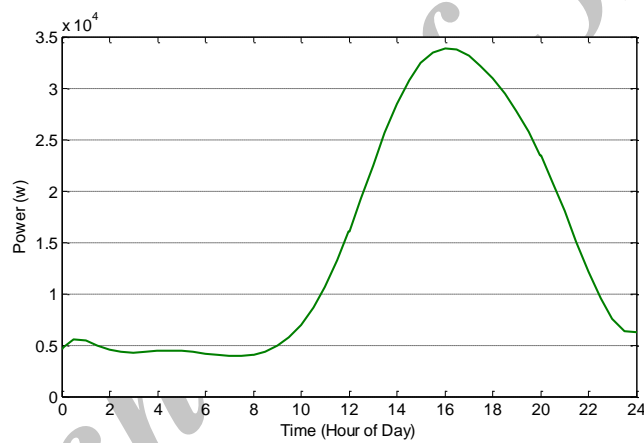
## نتایج شبیه سازی

نتایج شبیه سازی با Matlab/Simulink در یک روز کاری سیستم، در این قسمت تشریح گردیده است. در شکل (۱۰) توان خروجی ۴۵۰ عدد پیل خورشیدی نشان داده شده است. شکل (۱۱) توان خروجی توربین های بادی را نشان می دهد. توان های خروجی مربوط به با مقادیر پس از بهینه سازی هستند که نتایج آن در بخش آنالیز اقتصادی آورده شده است. در شکل (۱۲) نتایج عملکرد سیستم در طول ۲۴ ساعت نشان داده شده است. در ساعات ابتدایی روز که تابش صفر بوده، بار از طریق باتری تأمین می شود (لازم به ذکر است باتری حدود ۲۰٪ شارژ اولیه دارد). پس از حدود ۴ ساعت و با توجه به کاهش ذخیره باتری و نیز افزایش تقاضای بار مصرفی، FC روشن شده و در تأمین بار مشارکت می کند. حضور FC در مدار تا وقتی است که باتری مجدداً شارژ شود.

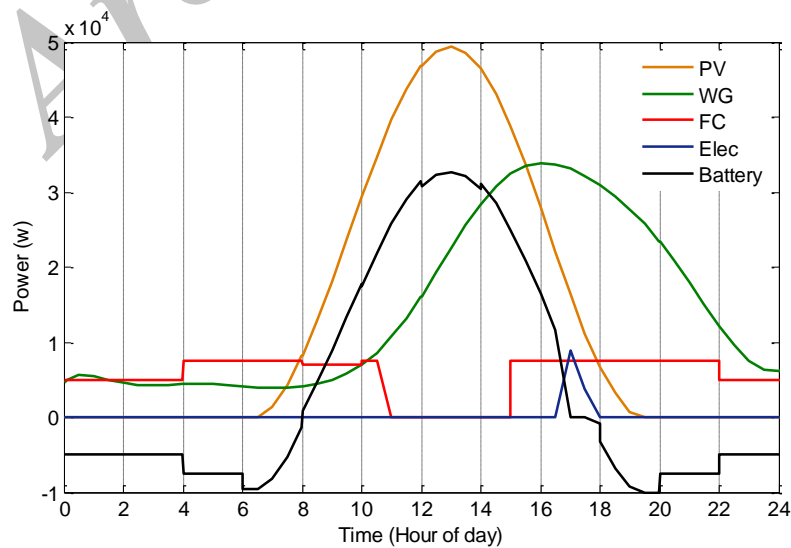
تا وقتی که شدت تابش به حد مطلوب نرسیده، عملکرد سیستم به همین منوال است. با افزایش شدت تابش خورشید، باتری در حالت شارژ قرار گرفته و در تأمین بار دخالت ندارد. بعد از اینکه باتری به حد مطلوب شارژ شد، FC از مدار خارج می شود و این در هنگامی است که PV قادر به تأمین بار است. پس از اینکه شارژ باتری به مقدار حداکثر خود رسید، باتری از حالت شارژ خارج شده و الکترولیزور تا هنگام پر شدن تانک هیدروژن روشن می شود. پس از اینکه تانک هیدروژن پر شد، الکترولیزور خاموش شده و توان اضافی به Dump load داده می شود. در اواخر روز به دلیل کاهش تولید توربین بادی و PV، باتری مجدداً روشن شده و بخشی از بار را تأمین می کند. مقدار انرژی باتری مطابق با شکل (۱۳)، در انتهای روز نباید از مقدار مشخصی پایین تر رود.



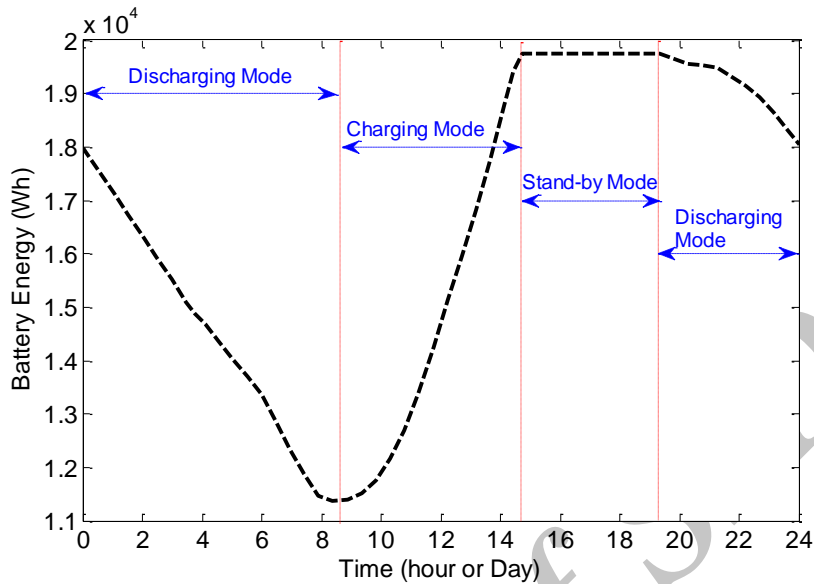
شکل ۱۰- توان تولیدی توسط PV



شکل ۱۱- توان تولیدی توسط WG

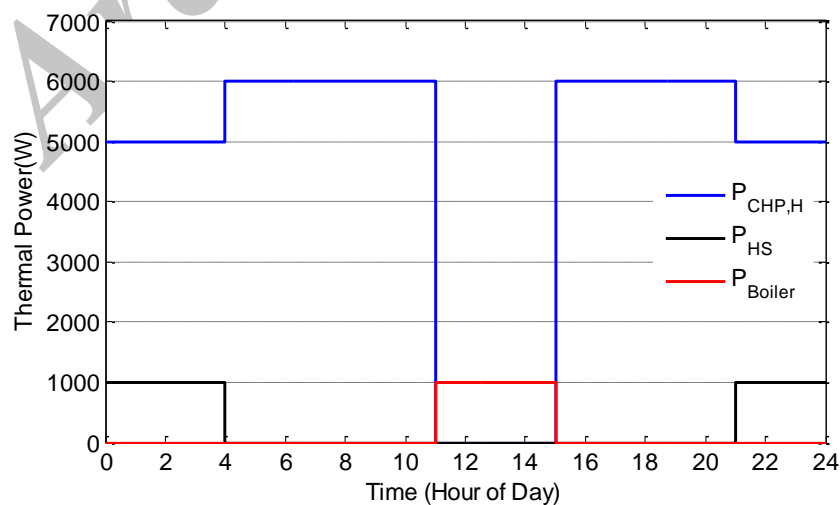


شکل ۱۲- عملکرد سیستم در یک شبانه روز جهت تأمین بار الکتریکی



شکل ۱۳- تغییرات انرژی باتری در یک شبانه روز

شکل (۱۴) توان حرارتی تولید شده توسط CHP، ذخیره‌ساز گرمایی و بویلر کمکی را در طول ۲۴ ساعت نشان می‌دهد. در ساعات اولیه و انتهایی روز با توجه به اینکه CHP پیل سوختی جهت تأمین بار الکتریکی فعال می‌باشد، تقاضای بار حرارتی نیز توسط CHP تأمین می‌شود و مازاد انرژی تولید شده در ذخیره‌ساز انرژی گرمایی ذخیره می‌شود. در محدوده زمانی ۱۱ الی ۱۵ با توجه به اینکه CHP غیر فعال می‌باشد و تقاضای بار حرارتی نیز قابل توجه نمی‌باشد (۱ KW) بدلائل اقتصادی از بویلر کمکی جهت تأمین بار حرارتی استفاده می‌شود.



شکل ۱۴- عملکرد سیستم در یک شبانه روز جهت تأمین بار حرارتی

## آنالیز اقتصادی

با توجه به مشخصه غیر پیوسته تابش خورشید و وابستگی زیاد آنها به شرایط جوی [۱۲ و ۳۱]، مهمترین بحث، طراحی سیستم با قابلیت اطمینان مناسب در تأمین بار می‌باشد [۱۵ و ۳۱]. در این راستا توجه به هزینه سیستم اجتناب‌ناپذیر است، لذا هدف از طراحی بهینه سیستم هیبرید، تأمین بار با قابلیت اطمینان بالا و هزینه مناسب می‌باشد. در سیستم هیبرید مورد مطالعه، پنل‌های PV، تعداد توربین‌های بادی و ظرفیت باتری باید به صورت بهینه تعیین گردد. بدین منظور از برنامه‌های در Matlab استفاده شده است که با توجه به عملکرد سیستم، هزینه تمام اجزای سیستم را در حالت‌های قابل قبول محاسبه نماید. بنابراین سیستم به گونه‌ای طراحی می‌گردد که علاوه بر هزینه مقرون به صرفه، انرژی باتری را برای روز بعد نگه داشته و هیدروژن مورد نیاز را از طریق الکترولیزور تولید نماید.

هزینه سیستم شامل هزینه خرید و نصب، هزینه جایگذاری، هزینه نگهداری و تعمیرات اجزا در طول ۲۰ سال عملکرد سیستم می‌باشد که از معادله زیر محاسبه می‌شود [۶]:

$$C_i = N_i * [CCost_i + RCost_i * K_i + OMCost_i], \quad i = PV, WG, Battery, FC, Electrolyser \quad (15)$$

که  $N_i$  تعداد یا اندازه تجهیزات سیستم،  $CCost_i$  هزینه سرمایه اولیه شامل هزینه خرید و نصب،  $RCost_i$  هزینه جایگذاری،  $K_i$  تعداد جایگذاری در ۲۰ سال عملکرد سیستم،  $OMCost_i$  هزینه عملکرد و نگهداری در ۲۰ سال عملکرد سیستم می‌باشد.

تابع هدفی که باید مینیمم شود تابع هزینه کل سیستم در مدت زمان عملکرد است که به صورت زیر بیان می‌گردد.

$$C_{sys} = C_{pv} + C_{wg} + C_{battery} + C_{fc} + C_{electrolyser} \quad (16)$$

## نتیجه‌گیری

هدف اصلی از طراحی سیستم هیبرید فتوولتائیک، تولید انرژی با قابلیت اطمینان مناسب در شرایط مختلف جوی با کمترین هزینه است. در این مقاله بهینه‌سازی ابعاد سیستم بر اساس قابلیت اطمینان و آنالیز اقتصادی برای سیستم هیبرید مذکور با ذخیره‌ساز باتری و الکترولیزور- پیل سوختی در مدت ۲۰ سال عملکرد سیستم انجام گرفت. استراتژی کنترل و مدیریت انرژی جامعی برای سیستم هیبرید مورد مطالعه ارائه گردید. عملکرد سیستم مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از آنالیز اقتصادی به وضوح مزایای سیستم هیبرید طراحی شده را در مقایسه با حالت‌های ذکر شده چه از لحاظ اقتصادی و چه از منظر قابلیت اطمینان نشان می‌دهد.

## مراجع

- [1] Caisheng Wang, and M. Hashem Nehrir, "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 23, No. 3, September 2008.
- [2] نشریه هیدروژن و پیل سوختی، سال هشتم، شماره ۷۶، اردیبهشت ۹۲.
- [3] Kodjo Agbossou, Mohanlal Kolhe, Jean Hamelin, and Tapan K. Bose, "Performance of a Stand-Alone Renewable Energy System Based on Energy Storage as Hydrogen" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 19, No. 3, September 2004.
- [4] F. Bonanno, A. Consoli, A. Raciti, B. Morgana, and U. Nocera, "Transient Analysis of Integrated Diesel Wind Photovoltaic Generation Systems" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 14, No. 2, June 1999.
- [5] M. Mousavi Badejani, M.A.S. Masoum and M. Kalanta, "Optimal Design and Modeling of Stand-Alone Hybrid PV-Wind Systems" *Proc. Int. Conf. on Power Engineering*. Australasia, pp. 1-6, Dec. 2007.



- [6] D.B. Nelson, M.H. Nehrir, and C. Wang, "Unit Sizing of Stand-Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation Systems" *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, PP 2116 – 2122, Vol. 3, 2005.
- [7] A. Kashefi Kaviani, G.H. Riahy and SH.M. Kouhsari, "Optimal Design of a Reliable Hydrogen-based Stand-alone Wind/PV Generation System" *Proc. Int. Conf. on Optimization of Electrical and Electronic Equipment*, PP. 413 – 418, 2008.
- [8] M. Hashem Nehrir, "A Course on Alternative Energy Wind/PV/Fuel Cell Power Generation" *IEEE Power Engineering Society General Meeting*, PP 6, 2006.
- [9] Tao Zhou, and Bruno Francois, "Modeling and control design of hydrogen production process for an active hydrogen/wind hybrid power system" *International journal of hydrogen energy* 34 (2009) 21 – 30.
- [10] Dimitris Ipsakisa, Spyros Voutetakis, Panos Seferlis, Fotis Stergiopoulos, and Costas Elmasides, "Power management strategies for a stand-alone power system using renewable energy sources and hydrogen storage" *International journal of hydrogen energy* (2008) 1 – 15.
- [11] Boquan Zhang, Yimin Yang, and Lu Gan, "Dynamic Control of Wind/Photovoltaic Hybrid Power Systems Based on an Advanced Particle Swarm Optimization" *Proc. Int. Conf. on Industrial Technology*. PP. 1-6, 2008.
- [12] Ahmad Zahedi, "Technical Analysis of an Electric Power System Consisting of Solar PV Energy, Wind Power, and Hydrogen Fuel Cell" *Universities Power Engineering Conference*. Australasian, PP. 1 – 5, Dec. 2007.
- [13] Mohammad saad Alam, and David W. Gao, "Modeling and Analysis of a Wind/PV/Fuel Cell Hybrid Power System in HOMER" *Proc. Int. Conf. on Industrial Electronics and Applications*, PP.1594 – 1599, 2007.
- [14] Jeremy Lagorse, Marcelo G. Simões, Abdellatif Miraoui, and Philippe Costerg, "Energy cost analysis of a solar-hydrogen hybrid energy system for stand-alone applications" *International Journal Of Hydrogen Energy* 33(2008)2871–2879.
- [15] W.D. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, and V. Gerez, "Generation Unit Sizing and Cost Analysis for Stand-Alone Wind, Photovoltaic, and Hybrid Wind/PV Systems" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 1, March 1998.
- [16] Tine Compernelle, Nele Witter, Steven Van Passel, and Theo Theo Thewys, "Analyzing a self-managed CHP system for greenhouse cultivation as a profitable way to reduce CO<sub>2</sub>-emissions" *Energy* 36(2011)1940–1947.
- [۱۷] تعیین ظرفیت بهینه و آنالیز حساسیت سیستم تولید همزمان برق، حرارت و سرما بر پایه محرک اولیه پیل سوختی برای یک آپارتمان مسکونی، محمد صادق قاضی زاده، عادل غلامی، سید میرجواد رودکی، نشریه انرژی ایران، دوره ۱۴، شماره ۲، تابستان ۱۳۹۰.
- [18] NASA Surface meteorology and Solar Energ. (<http://www.nasa.gov>)
- [19] Yao Xingjia, Liu Yingming, Bao Jieqiu, and Xing Zuoxia, "Research and Simulation of Direct Drive Wind Turbine VSCF Characteristic" *Proc. Int. Conf. on Automation and Logistics Qingdao*, China, PP.1683 - 1687 September 2008.
- [20] Lingfeng Wang, and Chanan Singh, "PSO-based Hybrid Generating System Design Incorporating Reliability Evaluation and Generation/Load Forecasting" *Proc. Int. Conf. on Power Tech*, PP.1392 – 1397, 2007.
- [21] WIND ENERGY & SOLAR POWER ([www.energymatters.com](http://www.energymatters.com))
- [22] R. Chedid, Akiki H, Saifur Rahman, "A Decision Support Technique for the Design of Hybrid Solar-Wind Power Systems" *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 13, No. 1, March 1998.
- [23] Solar Energy Research and Consultancy. (<http://www.solarbuzz.com>)
- [24] M.S.Carmeli, F.Castelli-Dezza, G.Marchegiani, and M.Mauri, "Hybrid PV-CHP Distributed System: design aspects and realization" *International Conference on Clean Electrical Power*, 2009, Page(s): 782-789.
- [25] P.Derewonko, and J.M.pearce, "Optimizing Design of Houshold Scale Hybrid Solar Photovoltaic + Combined Heat and Power System for ONTARIO" *Photovoltaic Specialists Conference (PVSC)*, 2009, Page(s): 001274 – 001279.
- [26] Shane Duryea, Syed Islam, and William Lawrance, "A Battery Management System For Stand-Alone Photovoltaic Energy Systems" *IEEE Industry Applications Conference*, PP. 2649-2654, vol.4, Oct. 1999.



- [27] Maria Stefania Carmeli, Francesco Castelli-Dezza, and Marco Mauri, “Control Strategies and Configuration of Hybrid Distributed Generation System” *Renewable Energy* (2012) 294 – 305.
- [28] M.Hatti, A.Meharrar, and M.Tioursi, “Power Management Strategy in the Alternative Energy Photovoltaic/PEMFC Hybrid System” *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (2011) 5104 – 5110.
- [29] Loc Nguyen Khanh, Jae-Jin Seo, Yun-Seong Kim, and Dong-Jun Won, “Power Management Strategies for a Grid-Connected PV/FC Hybrid System” *IEEE Trans. on POWER DELIVERY*, VOL. 25, NO. 3, JULY 2010
- [30] Erkan Dursun, and Osman Kilic, “Comparative evaluation of Different Power Management Strategies of a Stand-Alone PV/Wind/PEMFC Hybrid Power System” *International journal of Electrical Power & Energy System* (2012) 81 – 89.
- [31] Francois Giraud, and Ziyad M. Salameh, “Steady-State Performance of a Grid-Connected Rooftop Hybrid Wind-Photovoltaic Power System with Battery Storage” *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol.16, No.1, March 2001.

Archive of SID