

## مدل سازی سیستم ترکیبی توربین بادی- پیل سوختی و سهم پیل سوختی در تأمین تقاضای الکتریکی در یک منطقه نمونه

سمیه احمدی<sup>۱</sup>، محمد رضایی میرقائد<sup>۲</sup>، رامین روشندل<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> کارشناس ارشد مؤسسه مطالعات بین المللی انرژی- تهران- ایران  
sepide.ahmadi2006@gmail.com

<sup>۲</sup> کارشناس ارشد دانشکده مهندسی انرژی- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران  
m\_rezaei@energy.sharif.edu

<sup>۳</sup> استادیار دانشکده مهندسی انرژی- دانشگاه صنعتی شریف- تهران- ایران  
roshandel@sharif.edu

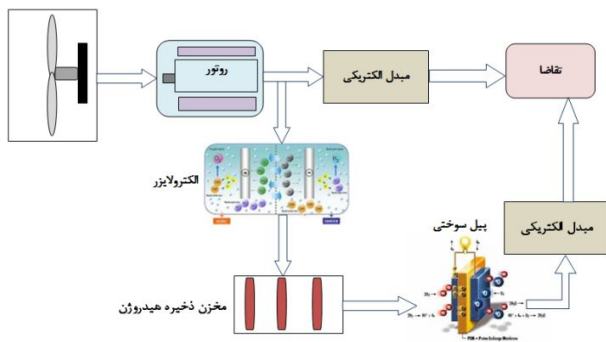
دریافت مقاله: ۹۰/۱۱/۵ اصلاحیه: ۹۱/۶/۲۸

پذیرش مقاله: ۹۱/۸/۲۳

**چکیده:** سیستم ترکیبی یکی از مناسب ترین گزینه های تأمین تقاضای الکتریکی در مناطق دور از شبکه است. در این سیستم ها باتری ها به دلیل ناکارآمد بودن در ذخیره سازی بلندمدت استفاده نمی شوند، از این رو، سیستم ترکیبی پیل سوختی- توربین بادی برای تأمین تقاضای الکتریکی مناطق با وزش باد موسمی معرفی می گردد. در مقاله حاضر، این سیستم ترکیبی مورد تحلیل انرژی قرار گرفته است. برای منطقه ای از کشور با فراوانی بادهای موسمی این سیستم مورد بررسی قرار گرفته و اتلاف انرژی و امکان کاستن از آن مورد توجه بوده است. در این کار، با توجه به اطلاعات باد منطقه مورد نظر برای تأمین تقاضا، مشخصات اجزا تعیین و مدلی توسعه داده می شود که بتواند مزاد یا کمبود توان و میزان انرژی تولیدی در هر بازه از سال را برآورد کند. در منطقه مورد بررسی نمونه (ابركوه)، با توجه به مدل توسعه داده شده، ۵۶٪ از تقاضا توسط توربین بادی و ۴۴٪ توسط پیل سوختی تأمین می شود.

**واژه های کلیدی:** تحلیل انرژی، سیستم ترکیبی، توربین بادی، پیل سوختی، استراتژی مدیریت انرژی.

در این پژوهش، بر روی سیستم ترکیبی توربین بادی-پیل سوختی مدل‌سازی فنی و سیستمی، تحلیل انرژی انجام گرفته است (برای منطقه نمونه‌ای از کشور ایران که دارای باد موسمی می‌باشد). در ساعاتی از روز که سرعت باد به اندازه کافی زیاد است، توربین‌های سیستم ترکیبی پیل سوختی-توربین بادی قادر به تأمین تقاضا هستند. مازاد انرژی تولیدی در این ساعات، وارد الکتروایزر شده و هیدروژن تولید شده در یک مخزن ذخیره هیدروژن، ذخیره می‌گردد. در ساعاتی که وزش باد پایین است و توربین بادی قادر به تولید انرژی نیست، پیل سوختی وارد مدار شده و با استفاده از هیدروژن ذخیره شده در مرحله قبل به عنوان سوخت، تأمین‌کننده تقاضا می‌باشد. شکل (۱) پیکره‌بندی سیستم را نشان می‌دهد.



شکل (۱): پیکره‌بندی سیستم ترکیبی

## ۲. مدل‌سازی

هدف از مدل‌سازی، ارائه یک مدل ریاضی جامع با استفاده از معادلات حاکم بر فرآیندهای درون سیستم است تا با کمک آن بتوان فناوری‌های نوین در زمینه تبدیل انرژی باد به الکتریکی، فناوری‌های پیشرفته تبدیل انرژی مانند پیل سوختی و الکتروایزر و همچنین فناوری‌های ذخیره‌سازی انرژی مانند انواع باتری‌ها و مخازن ذخیره هیدروژن را مدل‌سازی کرد. در این تحقیق، معادلات حاکم بر عملکرد هر یک از اجزای سیستم بررسی شده و بر اساس آن، مدل جداگانه‌ای برای هر کدام از اجزای سیستم توسعه داده شده است تا امکان تغییر فناوری در هر یک از عوامل سیستم فراهم شود.

### ۱.۲. معادلات حاکم بر توربین بادی

توربین‌های بادی، وسایل تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی‌اند که از دو نوع عمودی و افقی ساخته می‌شوند. هدف از مدل‌سازی توربین بادی، محاسبه توان خروجی از توربین بادی و بررسی فرآیندها و برهم‌کنش‌های مختلف میان اجزای آن است. روتور، گیربکس و شفت متصل به آن و همچنین ژنراتور، اجزای اصلی توربین بادی هستند که بر اساس آن‌ها مدل توربین بادی توسعه داده می‌شود. با توجه به اجزای نامبرده و فرآیندهای صورت گرفته، مدل‌سازی توربین بادی در سه قسمت آیرودینامیک، مکانیک و الکتریکی بنا بر شکل (۲) صورت گرفته است [۱۲].

نگرانی‌های زیست‌محیطی جهانی و افزایش نیاز به استفاده از انرژی، همراه با پیشرفت پایدار در زمینه فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر باعث ایجاد قالب‌های جدیدی برای استفاده عمومی از منابع انرژی تجدیدپذیر گشته است. در این میان، انرژی باد نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر، رشد سریع‌تری را دارا بوده است [۱]. به کارگیری توربین بادی، سیستم تولید پراکنده را به سمت سیستمی با تولید متغیر سوق می‌دهد. همچنین این امر از قابلیت اطمینان سیستم تولید به صورت قابل ملاحظه‌ای می‌کاهد. بزرگ‌ترین مشکل در استفاده از انرژی باد، متغیر بودن سرعت باد و در پی آن متغیر بودن توان تولیدی توربین‌های بادی است [۲]. این در حالی است که ترکیب توربین‌های بادی با سایر منابع انرژی، سبب افزایش قابلیت اطمینان سیستم تولید انرژی می‌گردد و انرژی الکتریکی خروجی از سیستم را تقریباً مستقل از زمان می‌نماید. باتری‌های اسید سرب، مناسب‌ترین گزینه برای ذخیره انرژی تولیدی در کوتاه‌مدت هستند که برای ذخیره‌سازی در بلندمدت قابل استفاده نیستند. درازمدت، با تبدیل انرژی الکتریکی به هیدروژن توسط الکتروایزر، می‌توان آن را به عنوان سوخت پیل سوختی برای استفاده در زمان‌های آتی، ذخیره کرد [۳]. بنابراین تولید هیدروژن، مسیری مناسب برای تولید الکتریسته بر پایه انرژی باد را مهیا می‌کند و از اهمیت سوخت‌های فسیلی در این زمینه می‌کاهد [۴ و ۵].

تاکنون، سیستم ترکیبی پیل سوختی-توربین بادی توسط برخی از محققان و دانشمندان مورد بررسی قرار گرفته‌اند. فابویی و همکاران، مدل سیستم توربین بادی را توسعه دادند و با استفاده از بهینه‌سازی اندازه توربین بادی، به مزایای ذخیره انرژی در صرفه‌جویی سوخت پرداختند [۶]. پس از آن، روی و محققان دیگر، شبیه‌سازی دینامیکی بر روی سیستم ترکیبی بادی-باتری انجام دادند و به بهینه‌سازی اندازه اجزای سیستم ترکیبی پرداختند [۷]. همچنین یانگ و همکاران به بررسی تئوری سیستم ترکیبی هیدروژن-بادی پرداختند و مدلی را برای اندازه‌گیری میزان توان تولیدی توسط توربین بادی و هیدروژن تولیدی از مازاد تقاضا ارائه دادند [۸]. در سال‌های اخیر نیز، تحقیقاتی بر روی این سیستم‌ها انجام شده است که می‌توان به کار پینو اشاره کرد. آن‌ها مدلی را برای طراحی، آنالیز و اندازه‌گیری سیستم ترکیبی توربین بادی-هیدروژن ارائه کردند و تأثیر دمای الکتروایزر و نمودار تولید توان توربین بادی بر روی میزان هیدروژن تولیدی را نشان دادند [۹]. اونار و همکاران، مدلی دینامیکی برای سیستم ترکیبی توربین بادی-پیل سوختی و ابر خازن‌ها ارائه دادند. سیستم پیشنهادی آن‌ها در تغییرات سریع و ناگهانی سرعت، نتایج خوبی برای تأمین تقاضای منطقه مورد مطالعه نشان داد [۱۰]. کاسیریز و همکاران، سیستم توربین بادی پیل سوختی را پیشنهاد کردند و میزان افزایش ضریب عملکرد سیستم را با ترکیب سیستم نشان دادند [۱۱].

1. Ultra capacitor
2. Plant factor

**ضریب توان:** انرژی الکتریکی تولیدی توسط توربین بادی برابر حاصل ضرب انرژی جنبشی باد در ضریبی است که فاکتور توان و یا ضریب قانون بتز<sup>۴</sup> نامیده می‌شود. ضریب توان به سرعت متوسط باد، سرعت زاویه‌ای روتور و شرایط جغرافیای بستگی دارد [۱۴].

$$C_p = c_1 \left( \frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left( \frac{c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda \quad (5)$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (6)$$

**زاویه گام:** ضریب توان به ازای یک نسبت سرعت بالای مشخص به بیشترین مقدار خود می‌رسد. به عبارت دیگر، در سرعت زاویه‌ای خاصی برای روتور، ضریب توان ماکزیمم می‌شود. زاویه پیچ یا گام، زاویه‌ای است که سرعت زاویه‌ای را به آن حد خاص نزدیک می‌کند.

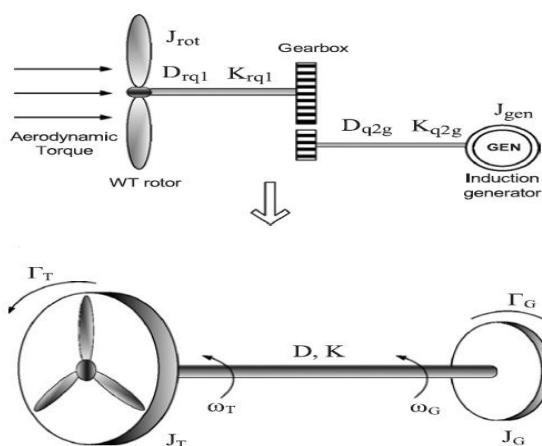
**گشتاور آیرودینامیکی:** توان تولیدی توسط توربین بادی و گشتاور روتور بنا به روابط زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{rotor} = 0.5 C_p \rho v_{wind}^3 \pi R_{rotor}^2 \quad (7)$$

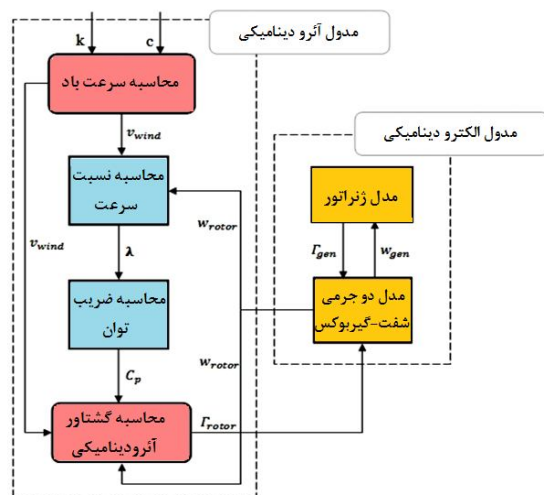
$$\Gamma_{rotor} = \frac{0.5 C_p \rho v_{wind}^3 \pi R_{rotor}^2}{\omega_{rotor}} \quad (8)$$

### ۲.۱.۲. مدل الکترومکانیکی

مدل مکانیکی توربین بادی شامل شفت روتور، شفت ژنراتور و گیربکس است که شفت و گیربکس با استفاده از اینرسی دو-جرمی<sup>۵</sup> مدل می‌شود. از آنجا که اینرسی لحظه‌ای گیربکس در مقایسه با روتور و ژنراتور کوچک است، ضرایب استهلاک<sup>۶</sup> و سختی<sup>۷</sup> آن نادیده گرفته می‌شود. معادلات گشتاور، رفتار مکانیکی توربین بادی را نشان می‌دهد که به صورت معادلات دو جسمی نوشته می‌شود؛ بنابراین، گشتاور آیرودینامیکی در تقابل با گشتاور الکترومکانیکی قرار داده می‌شود که با استفاده از جفت معادله کوپل شده زیر حل می‌شود. شکل (۳) پیکره‌بندی از محورهای موجود داخل توربین و آثار متقابل آن‌ها را نشان می‌دهد:



شکل (۳): پیکره‌بندی محورهای روتور و ژنراتور و انتقال آن‌ها به سمت ژنراتور



شکل (۲): نمودار توربین بادی

### ۱.۱.۲. مدل آیرودینامیک

مدل آیرودینامیکی از ۵ بخش سرعت باد، نسبت سرعت ( $TSR^1$ ), زاویه پیچ (زاویه گام<sup>۲</sup>), ضریب توان و گشتاور آیرودینامیک تشکیل شده است.

**سرعت باد:** تابش غیر یکنواخت نور خورشید به سطح زمین باعث اختلاف دما و فشار می‌شود. همین عامل باعث جابجایی هوای سرد و گرم و به وجود آمدن باد نیز می‌شود. در مدل بیان شده، سرعت باد می‌تواند از طریق سری زمانی اندازه‌گیری شده توسط اداره هواشناسی منطقه و یا در صورت عدم دسترسی به داده‌های هواشناسی، بنا بر محاسبه ریاضی در مدل قرار گیرد. سرعت باد در هر منطقه از تابع توزیع ویبال<sup>۳</sup>، بنا بر معادلات (۱) و (۲) محاسبه می‌شود [۱۳]:

$$f_v(v) = \frac{k}{c} \left( \frac{v}{c} \right)^{k-1} \exp \left[ - \left( \frac{v}{c} \right)^k \right] \quad (1)$$

$$v_m = \int_0^{\infty} v f_v(v) dv \quad (2)$$

پارامترهای شکل و مقیاس در مناطق مختلف، مقادیر متفاوتی خواهند داشت. در صورتی که سرعت باد در یک ارتفاع خاص در دسترس باشد، می‌توان بنا بر رابطه<sup>۳</sup> (۳)، سرعت باد در دیگر مناطق را محاسبه کرد:

$$v(h_2) = v(h_1) \frac{\ln(h_2) / \ln(h_0)}{\ln(h_1) / \ln(h_0)} \quad (3)$$

**نسبت سرعت ( $TSR$ ):** نسبت سرعت باد در بالای پره نسبت به

سرعت باد منطقه را نسبت سرعت بالا می‌نامند که برابر است با:

$$\lambda = \frac{\text{blade speed}}{\text{wind speed}} = \frac{\omega_{rotor} R_{rotor}}{v_{wind}} \quad (4)$$

4. Betz Law  
5. Two-mass inertia  
6. Damping  
7. Stiffness

1. Tip-speed ratio  
2. Pitch-angle  
3. Weibull

از طرفی، راندمان و لتاژی فرآیند الکترولیز نسبت و لتاژ برگشت‌پذیر سلول و لتاژ گرماخشی الکترولیز محاسبه می‌شود.

$$\eta_u = \frac{U_{rev}}{U_{th}} \quad (19)$$

### ۳.۲.۲. بخش الکتروشیمیایی

ولتاژ واقعی الکترولیز بنا بر رابطه زیر به جریان عبوری از الکترودها، دمای پیل و ولتاژ برگشت‌پذیر وابسته است [۱۵].

$$U = U_{rev} + \frac{r_1 + r_2 T}{A} I + S \log\left(\frac{t_1 + \frac{t_2}{T} + \frac{t_3}{T^3}}{A} I + 1\right) \quad (20)$$

بازدهی فاراده الکترولیز به صورت میزان واقعی و بیشینه مقدار تئوری هیدروژن تولیدشده در الکترولیز به دست می‌آید. این بازدهی که به آن، بازدهی جریان نیز گفته می‌شود، به دلیل افت جریان پارازیتی<sup>۲</sup> در لوله‌های گاز به وجود می‌آید. جریان پارازیتی با کاهش چگالی جریان، به دلیل افزایش به اشتراک گذاشتن الکترولیت و همچنین یک مقاومت الکتریکی پایین‌تر، افزایش می‌یابد [۱۵]:

$$\eta_F = \frac{\left(\frac{I}{A}\right)^2}{f_1 + \left(\frac{I}{A}\right)^2} f_2 \quad (21)$$

بنا بر قانون فاراده، نرخ تولید هیدروژن در یک الکترولیز به طور مستقیم با نرخ انتقال الکترون در الکترودها وابسته است؛ بنابراین، کل هیدروژن تولیدشده در سلول‌های الکترولیز که به صورت سری با یکدیگر متصل شده‌اند، برابر است با:

$$\dot{n}_{H_2} = \eta_F \frac{n_c I}{zF} \quad (22)$$

از طرفی، بازدهی انرژی الکترولیز، به صورت نسبت و لتاژ گرماخشی به و لتاژ کل الکترولیز محاسبه می‌گردد.

$$\eta_e = \frac{U_{th}}{U} \quad (23)$$

### ۳.۲. معادلات حاکم بر ذخیره‌ساز هیدروژن

مخازن هیدریدهای فلزی، به دلیل عدم نیاز به فشار بالا و حجم پایین، مناسب‌ترین گزینه برای ذخیره‌سازی هیدروژن در سیستم‌های مستقل از شبکه‌اند [۱۶ و ۱۷]. از این رو در این مقاله، از این مخازن برای ذخیره‌سازی هیدروژن استفاده می‌شود. در این مخازن، بین هیدروژن و فلز واکنشی انجام می‌شود که سست می‌باشد و در هنگام دشارژ شدن مخزن شکسته می‌شود. واکنش انجام‌شده در این مخازن در رابطه زیر نشان داده شده است [۱۷]. افزایش فشار با افزایش غلظت همراه است و بنا بر معادله‌های زیر بیان می‌شود:

$$\sqrt{P} = K_S x \quad (24)$$

$$\ln(P) = \frac{a}{T} + \frac{\Delta H^{\alpha \rightarrow \beta}}{xR} \quad (25)$$

همچنین با در نظر گرفتن محور ژنراتور به عنوان یک جسم سخت، سرعت زاویه‌ای ژنراتور و نرخ گشتاور آن بنا بر رابطه‌های زیر محاسبه می‌شوند:

$$\omega_T = \left(\frac{1}{J_T}\right) [I_T - D(\omega_T - \omega_G) - K(\theta_T - \theta_{G0})] \quad (9)$$

$$\omega_G = \left(\frac{1}{J_G}\right) [-I_G + D(\omega_T - \omega_G) + K(\theta_T - \theta_{G0})] \quad (10)$$

$$J_T = \frac{J_{rotor}}{GR^2} \quad (11)$$

$$D = D_{q2g} + D_{rq1}(1/GR)^2 \quad (12)$$

$$K = K_{rq1}(1/GR)^2 \quad (13)$$

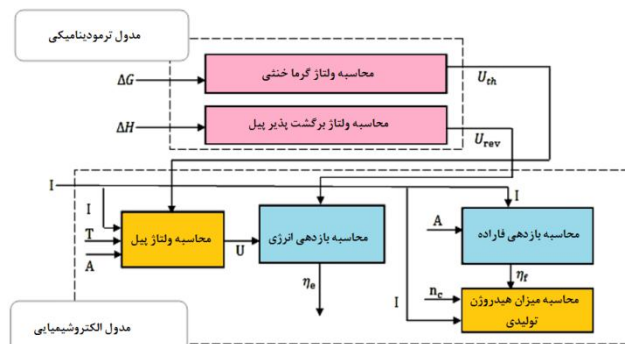
$$\Gamma_{gen-rated} = \frac{P_{mec}}{\omega_n} \quad (14)$$

$$\omega_n = \frac{120\pi}{P} \text{ for 60Hz power frequency} \quad (15)$$

$$\omega_n = \frac{100\pi}{P} \text{ for 50Hz power frequency}$$

### ۲.۲. معادلات حاکم بر الکترولیز

با استفاده از جریان مستقیم به الکترودها در یک سلول الکترولیز، آب به دو قسمت هیدروژن و اکسیژن تبدیل می‌شود. مدل‌سازی الکترولیز بر اساس دو قسمت ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی انجام شده است که در شکل (۴) نشان داده شده است.



شکل (۴): نمودار مدل الکترولیز

### ۱.۲.۲. بخش ترمودینامیکی

برای انجام واکنش تجزیه، باید یک و لتاژ کمینه به دو الکترودها وارد شود. میزان این و لتاژ کمینه و یا و لتاژ برگشت‌پذیر با استفاده از انرژی آزاد گیبس و بنا بر رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد:

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (16)$$

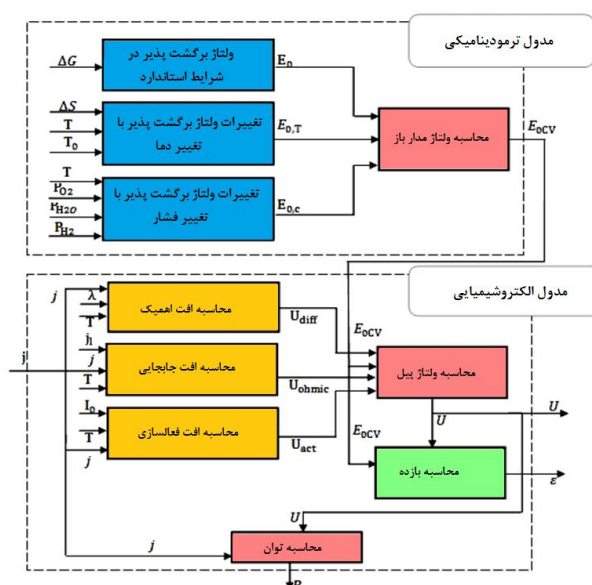
$$U_{rev} = \frac{\Delta G}{zF} \quad (17)$$

که در آن،  $F$  عدد فارادی و  $H$  و  $S$  به ترتیب، بیانگر آنتالپی و آنتروپی سیال‌اند.  $z$  نیز بیانگر تعداد الکترون سیال کاری (هیدروژن) برابر با ۲ است. انرژی مورد نیاز برای الکترولیز آب برابر با تغییرات آنتالپی است؛ بنابراین، و لتاژ گرماخشی<sup>۱</sup> سلول برابر است با:

$$U_{th} = \frac{\Delta H}{zF} \quad (18)$$

## ۴.۲. معادلات حاکم بر پیل سوختی

مدل سازی پیل سوختی، اهمیت ویژه‌ای در پیشرفت این تکنولوژی و آگاهی از فرآیندهای مختلف پیل سوختی دارد. مدل ارائه شده به دو قسمت ترمودینامیکی و الکتروشیمیایی تقسیم شده که در شکل (۵) نشان داده شده است.



شکل (۵): نمودار مدل پیل سوختی

یک پیل سوختی همانند هر پیل الکتروشیمیایی دیگر بین آند و کاتد اختلاف پتانسیل وجود دارد. مقدار انرژی الکتروشیمیایی تبدیل شده، برابر تغییر انرژی آزاد ناشی از واکنش شیمیایی است که به طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. اختلاف پتانسیل برگشت پذیر در پیل سوختی از سه قسمت پتانسیل در شرایط استاندارد، اختلاف پتانسیل به دلیل اختلاف دما و اختلاف پتانسیل ناشی از تغییرات غلظت حاصل می‌گردد؛ بنابراین، پتانسیل برگشت پذیر از رابطه زیر محاسبه می‌شود که در آن، عبارت اول نشان دهنده اختلاف پتانسیل در شرایط استاندارد، عبارت دوم نشان دهنده اختلاف فشار ناشی از گرادیان دما و بخش سوم ناشی از گرادیان غلظت (معادله نرنست<sup>۱</sup>) است [۱۸].

$$U_{rev,T} = \frac{\Delta g}{2F} - \frac{\Delta S}{2F}(T - T_0) + \frac{RT}{2F} \ln \left[ \frac{P_{H_2} P_{O_2}^{0.5}}{P_{H_2O}} \right] \quad (26)$$

ولتاژ مدار باز در یک پیل سوختی غشاپلیمری، حدوداً ۱/۲ ولت است، ولی در عمل این مقدار ۰/۶ تا ۰/۷ ولت را نشان می‌دهد. به این مقدار، پتانسیل کارکردی یا ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌گویند. دلیل این مسئله، انواع برگشت ناپذیری‌هایی است که برای پیل سوختی اتفاق می‌افتد که در قسمت الکتروشیمیایی مدل مورد بررسی قرار می‌گیرد.

۱. افت فعال سازی: افت فعال سازی، ناشی از مقدار انرژی لازم برای انجام واکنش است. این انرژی باعث کاهش سرعت واکنش در

سطوح الکترودها می‌شود و ولتاژ خروجی از پیل سوختی را کاهش می‌دهد. این افت ولتاژ نسبت به جریان تولیدی به شدت غیر خطی است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{act} = \frac{RT}{2\alpha F} \log \left[ \frac{I}{I_0} \right] \quad (27)$$

۲. افت اهمی: مقاومت الکتریکی در مقابل الکترون‌ها در

الکترودها و همچنین مقاومت در برابر عبور یون‌ها در الکترولیت موجب افت ولتاژی اهمیک می‌شود. قسمت عمده این افت پتانسیل ناشی از غشاء پیل سوختی است و از آنجا که انتقال یون به وسیله جریان آب در غشاء صورت می‌گیرد، افت پتانسیل اهمی بنا بر رابطه‌های زیر محاسبه می‌گردد [۱۹].

$$U_{ohmic} = \frac{l_m}{(0.005193\lambda - 0.00326)a_0} \quad (28)$$

$$a_0 = \exp \left( 1268 \left( \frac{1}{303} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (29)$$

$$\lambda = 0.0043 + 17.81\alpha - 39.85\alpha^2 + 36\alpha^3 \quad 0 \leq \alpha < 1 \quad (30)$$

$$\lambda = 14 + 1.4(\alpha - 1) \quad 1 \leq \alpha \leq 3 \quad (31)$$

۳. افت انتقال جرم: در نتیجه کاهش و یا افزایش غلظت

واکنش دهنده‌ها، ولتاژ پیل سوختی می‌تواند کم یا زیاد شود. در واقع به دلیل محدودیت انتقال جرم در لایه متخلخل، غلظت واکنش دهنده‌ها در مجاورت الکترودها در چگالی جریان الکتریکی بالا، کاهش می‌یابد. این امر باعث کاهش ولتاژ خروجی پیل سوختی می‌شود. به این افت ولتاژ، افت پتانسیل انتقال جرم و یا نفوذی می‌گویند که بنا بر رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$U_{diff} = -\frac{RT}{2F\alpha} \log \left( \frac{j_L - I}{j_L} \right) \quad (32)$$

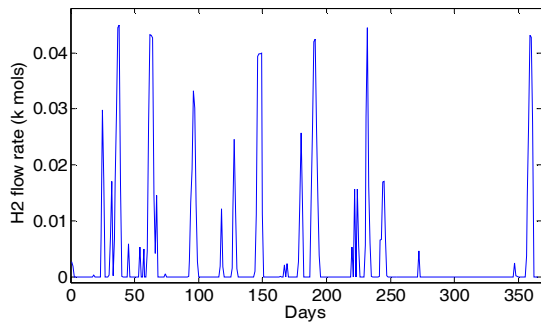
بنابراین ولتاژ خروجی پیل سوختی برابر است با:

$$U = U_{rev,T} - U_{act} - U_{ohmic} - U_{diff} \quad (33)$$

## ۳. تحلیل نتایج

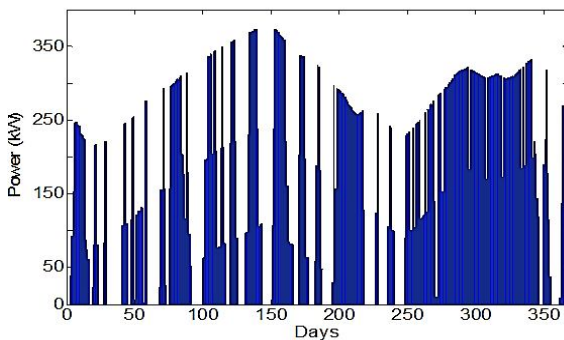
در این مقاله، یک مدل کامپیوتری به وسیله نرم افزار MATLAB برای شبیه سازی سیستم ترکیبی پیل سوختی- توربین بادی توسعه پیدا کرده که نتایج آن برای هر جزء سیستم و همچنین کل سیستم، در این بخش نشان داده شده است. و منطقه ابرکوه از توابع استان یزد، به عنوان مطالعه موردی در نظر گرفته شده است.

اولین گام برای تأمین تقاضای الکتریکی توسط سیستم‌های ترکیبی توربین بادی، دنبال کردن روند وزش باد در منطقه مورد مطالعه و انتخاب پیل سوختی و یا باتری به عنوان سیستم پشتیبان است. شکل (۶) روند تغییرات سالانه باد ابرکوه را نشان می‌دهد که با استفاده از سایت سازمان انرژی نو ایران رسم شده است [۲۰]. همان گونه که دیده می‌شود، حدوداً تا ۲۵۰ روز سال، وزش باد در چند روز زیاد و در چند

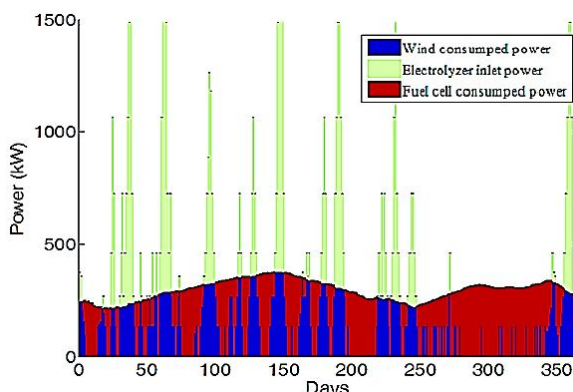


شکل (۸): میزان هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر

توان تولیدی توسط پیل سوختی در شکل (۹) نشان داده شده است. همان‌گونه که دیده می‌شود، تجمع تولید توان در ماه‌های پایانی سال، به دلیل پایین بودن سرعت باد در بازه زمانی مذکور، بالاست. از طرفی، میزان برآورده شدن کل تقاضای سالیانه و همچنین میزان مازاد انرژی تولیدی توسط توربین بادی در شکل (۱۰) نشان داده شده است که در آن، نواحی آبی رنگ، مربوط به تأمین تقاضای تولیدی توسط توربین بادی، نواحی قرمز رنگ مربوط به تأمین تقاضا توسط پیل سوختی و نواحی سبزرنگ مازاد توان ورودی به الکترولایزر است. همان‌گونه که دیده می‌شود، مجموع نواحی قرمز و آبی رنگ تقاضای مورد نیاز را می‌دهد که در شکل (۷) نشان داده شد.



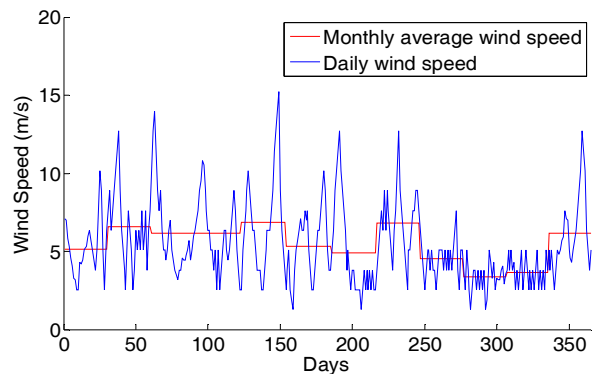
شکل (۹): توان تولیدی توسط سیستم پیل سوختی



شکل (۱۰): کل توان تولیدی توسط سیستم ترکیبی توربین بادی-پیل سوختی

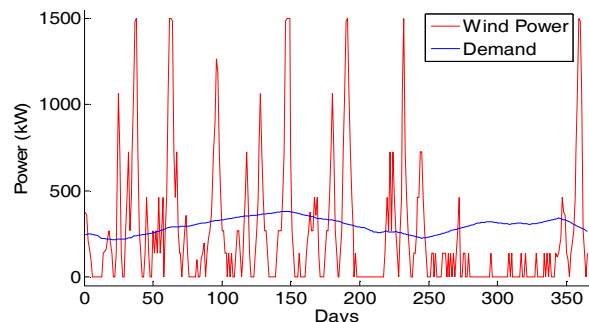
شکل (۱۱) سهم توربین بادی و پیل سوختی در تأمین تقاضای ماهیانه را نشان می‌دهد. با وجود آنکه، به جز در سه ماه سال، توربین بادی تأمین‌کننده بزرگ سیستم است، ۵۶٪ از تقاضای سالیانه توسط توربین بادی و ۴۴٪ از آن توسط پیل سوختی تأمین می‌شود؛ بنابراین

روز دیگر کم است، اما درصد روز بعدی سال وزش باد تقریباً همیشه پایین است و این خود نشان‌دهنده گزینش سیستم پیل سوختی-توربین بادی به عنوان مناسب‌ترین سیستم تولید انرژی در منطقه است، زیرا باتری‌ها قادر به شارژ و دشارژ در مدت بلند نیستند.



شکل (۶): پروفیل سالانه سرعت باد ابرکوه

با استفاده از مدل توسعه داده شده برای توربین بادی و همچنین پروفیل سرعت باد ابرکوه، توان خروجی از توربین بادی در روزهای مختلف سال محاسبه شده که به همراه روند تغییرات مصرف سالانه تقاضای الکتریکی در شکل (۷) نشان داده شده است. در بازه‌های زمانی که توان تولیدی توربین برابر با تقاضاست، توربین بادی به طور مستقیم تقاضا را تأمین کرده است. نواحی که توربین مازاد بر تقاضا تولید می‌کند، این توان مازاد برابر با میزان توان ورودی به الکترولایزر برای تولید هیدروژن است. از طرفی، در نواحی‌ای که منطقه با کمبود باد مواجه می‌شود، (تقریباً سه ماه پایانی سال) توربین بادی قادر به تأمین تقاضا نیست و پیل سوختی تأمین‌کننده تقاضاست.



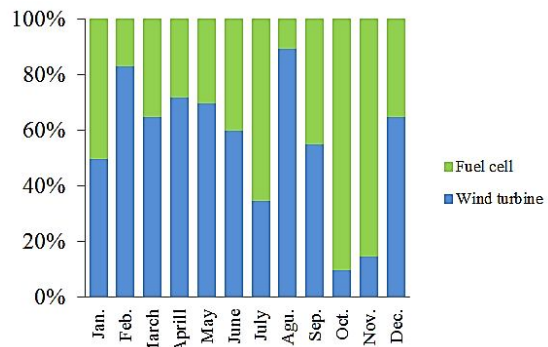
شکل (۷): توان تولیدی توسط توربین بادی و تقاضای سالیانه الکتریکی

با توجه به مازاد توان توربین بادی نسبت به تقاضا، میزان هیدروژن تولیدی توسط الکترولایزر با در نظر گرفتن بازه ۹۰ درصدی مدل الکتریکی، محاسبه و در شکل (۸) نشان داده شده است. باید توجه کرد که میزان هیدروژن تولیدی باید پاسخ‌گوی سوخت‌رسانی به پیل سوختی در زمان‌هایی باشد که از آن به عنوان سیستم تولید انرژی پشتیبان استفاده می‌شود. حجم مخزن ذخیره هیدروژن نیز با توجه به داده‌های تاریخی باد منطقه و وابسته به بیشترین مقدار هیدروژن تولیدی تخمین زده می‌شود.

فهرست علائم

واحد	مقدار	پارامترها	علائم
Kgm	۷۹۷/۵۴۹۱۵	اینرسی روتور	$J_{rotor}$
m	۳۵	شعاع روتور	$R_{rotor}$
.....	۷۰	نسبت گیربکس	$GR$
kgm	۰/۰۸۱۲	اینرسی ژنراتور	$J_G$
kW	۱۵۰۰	توان ژنراتور	$P_{gen}$
.....	۰/۵۱۷۶	ثابت ضریب توان	$c_1$
.....	۱۱۶	ثابت ضریب توان	$c_2$
.....	۰/۴	ثابت ضریب توان	$c_3$
.....	۵	ثابت ضریب توان	$c_4$
.....	۲۱	ثابت ضریب توان	$c_5$
.....	۰/۰۰۶۸	ثابت ضریب توان	$c_6$
.....	۳	ژنراتور جفت قطب <sup>۱</sup>	$p$
.....	.....	پارامتر شکل ویبال	$K$
.....	.....	پارامتر مقیاس ویبال	$C$
.....	۲۱۰	تعداد سلول	$n_c$
$mA^2cm^{-4}$	۲۵۰	پارامتر وابسته به بازده فاراده	$f_1$
.....	۰/۰۹۶	پارامتر وابسته به بازده فاراده	$f_2$
$\Omega m^2$	$۸/۰۵ \times 10^{-۵}$	پارامتر وابسته به مقاومت اهمیک	$r_1$
$\Omega m^2$	$۲/۵ \times 10^{-۷}$	پارامتر وابسته به مقاومت اهمیک	$r_2$
$A^{-1}m^2$	-۱/۰۰۲	ثابت ولتاژ بیش از حد آلترودها	$t_1$
$A^{-1}m^2$	۸/۴۲۴	ثابت ولتاژ بیش از حد آلترودها	$t_2$
$A^{-1}m^2$	۲۴۷/۳	ثابت ولتاژ بیش از حد آلترودها	$t_3$
$V$	۰/۱۸۵	ثابت ولتاژ بیش از حد آلترودها	$s$
$V$	۱/۲۲۹	ولتاژ برگشت پذیر	$U_{rev}$
$m^2$	۵۰	سطح آلترودها	$A$
$C/mol$	۹۶۴۷۸	ثابت فاراده	$F$
.....	۲	تعداد آلترون گاز	$Z$
.....	.....	پیل سوختی	
$K$	۳۴۳	دما	$T$
$atm$	۰/۶۳	فشار اکسیژن	$P_{O_2}$
$atm$	۳	فشار هیدروژن	$P_{H_2}$
$atm$	۱	فشار آب	$P_{H_2O}$
$m$	۰/۰۱۵	طول غشا	$l_m$
$A$	۱	جریان پیشینه	$j_i$
$A$	۰/۰۰۰۱	جریان تبادل	$j_0$
واحد	پارامترها	علائم	
$ms^{-1}$	سرعت	$v$	
.....	پارامتر شکل توزیع ویبال سرعت باد	$k$	

پیل سوختی سهم زیادی در تأمین تقاضای سالیانه دارا می‌باشد.



شکل (۱۱): سهم سیستم‌های تولید توان در تأمین تقاضا

با توجه به نتایج حاصل از مدل‌سازی و سهم هر یک از خطوط انرژی تأمین‌کننده تقاضا، بازدهی سیستم ترکیبی در منطقه مذکور، ۲۲٪ محاسبه گردید. با توجه به عدم نیاز به هزینه سوخت اولیه و آلودگی زیست‌محیطی در سیستم ترکیبی توربین بادی- پیل سوختی، گزینه مناسب برای تأمین تقاضای ابرکوه و مناطقی با شرایط جغرافیایی مشابه است.

بنابراین، سیستم فوق گرچه به لحاظ اقتصادی، توجیه چندانی نداشته باشد، در مناطق دور از شبکه و دارای باد موسمی که به عدم کارایی باتری‌ها می‌انجامد، با توجه به هزینه بسیار پایین تر توربین بادی نسبت به سایر فناوری‌ها، یکی از پیشنهادات قابل توجه است. به هر ترتیب، با توجه به هزینه سرمایه‌ای و نگهداری، تخمین زده می‌شود چنین سیستمی دارای دوره بازگشت سرمایه ده ساله باشد [۲۱ و ۲۲].

۴. نتیجه گیری

سیستم‌های ترکیبی توربین بادی از مناسب‌ترین وسایل تولید انرژی الکتریکی در مناطق دور از شبکه است. در این مناطق، سیستم مورد کاربرد با توجه به نوع وزش باد از لحاظ منقطع بودن، به دو دسته سیستم ترکیبی بادی- باتری و سیستم ترکیبی بادی- پیل سوختی تقسیم می‌شود. دسته اول مربوط به مناطقی است که بازه زمانی منقطع بودن وزش باد کم و دسته دوم مربوط به مناطقی با وزش باد موسمی است که منطقه ابرکوه نیز در این دسته قرار می‌گیرد. در این منطقه، تا زمانی که سرعت باد مناسب است، توربین بادی تقاضا را تأمین می‌کند. مازاد تقاضا به آلتروولایزر وارد می‌شود و هیدروژن تولید می‌کند. در زمان‌هایی که سرعت باد پایین است، پیل سوختی تأمین‌کننده تقاضا می‌باشد. در نهایت، میزان انرژی تولیدی توسط پیل سوختی یا توربین بادی و جریان انرژی ورودی به آلتروولایزر در هر نقطه از سال، توسط مدلی که بر اساس اطلاعات باد منطقه و تقاضای مشخص تدوین شده، به دست می‌آید. در ابرکوه، ۴۴٪ از کل تقاضا توسط پیل سوختی و در خط جریان هیدروژن تولید می‌گردد. شایان ذکر است که بازده سیستم ترکیبی در منطقه مذکور ۲۲٪ می‌باشد که با توجه به عدم نیاز به سوخت اولیه و عدم آلودگی زیست‌محیطی، گزینه‌ای مناسب برای تأمین تقاضای منطقه مورد مطالعه است.

1. Generator pole pair  
2. Overvoltage

$atm$	فشار	$P_i$	.....	پارامتر مقیاس توزیع ویبال سرعت باد	$c$
.....	تعداد پیل‌ها در استک	$n_c$	$m$	شعاع	$R$
$V$	ولتاژ مدار باز	$E_{OCV}$	$rads^{-1}$	سرعت زاویه‌ای	$\omega$
$m$	طول غشا	$l_m$	.....	ثابت توان	$C_p$
$A.m^{-2}$	چگالی جریان	$j$	.....	زاویه پیچ	$\beta$
$A.m^{-2}$	چگالی جریان تبادل	$j_0$	$kW$	توان	$P$
$A.m^{-2}$	بیشینه چگالی جریان	$j_L$	$Kgm^{-3}$	چگالی هوا	$\rho$
.....	ثابت انتقال بار	$a$	$Nm$	گشتاور	$\Gamma$
$A.m^2.cm^{-4}$	پارامتر بازدهی فاراده	$f_1$	$Nms.rad^{-1}$	میرایی	$D$
.....	ثابت بازدهی فاراده	$f_2$	$kg\ mm$	اینرسی	$J$
.....	بازدهی	$\eta$	$Nm.rad^{-1}$	سفتی	$K$
$kJ.mol^{-1}$	ثابت گاز	$R$	$rad$	جابجایی زاویه‌ای	$\theta$
.....	رتور	$Rot$	.....	نسبت گیربکسی	$GR$
.....	ژنراتور	$Gen$	.....	ژنراتور جفت قطبی	$p$
.....	توربین	$T$	$J.mol^{-1}$	تغییرات انرژی گیبس	$\Delta G$
.....	مکانیکی	$Mec$	$J.mol^{-1}K^{-1}$	تغییرات آنتروپی	$\Delta S$
.....	برگشت‌پذیر	$Rev$	$K$	دما	$T$
.....	گرما-سختی	$Th$	$V$	ولتاژ	$U$
.....	انرژی	$E$	$C.mol^{-1}$	ثابت فارادی	$F$
.....	فارادی	$F$	$(\Omega m^2)$	پارامتر مقاومت اهمیک الکترولیت	$r$
.....	فعال‌سازی	$Act$	$V$	ثابت ولتاژ کل الکترودها	$S$
.....	اهمیک	$ohmic$	$m^2.A^{-1}$	ثابت ولتاژ کل الکترودها	$t$
.....	جابجایی	$Diff$	$m^2$	مساحت الکترودها	$A$
			$A$	جریان	$I$
			$Mol.s^{-1}$	نرخ مولی	$\dot{n}$
			$V$	ولتاژ برگشت‌پذیر	$E_0$
			$V$	ولتاژ برگشت‌پذیر با تغییرات دما	$E_{0,T}$

مراجع

[1] *The Energy Foundation Annual Report*, the Energy Foundation. San Francisco, CA, <http://www.sff.org>, 2001.

[2] Khan, M. J., Iqbal, M. T. "Dynamic Modeling and Simulation of a Small Wind-Fuel Cell Hybrid Energy System", *Renewable Energy*. Vol. 30, pp. 421-439. 2005.

[3] "Electric Power Research Institute Web-site", [www.epri.com](http://www.epri.com); 09-04-2011.

[4] Costamagna, P., Srinivasan, S., "Quantum Jumps in the PEMFC Science and Technology from the 1960s to the Year 2000", Part II, Engineering Technology Development and Application Aspects. *Journal of Power Sources*, Vol. 102, pp. 253-69. 2000.

[5] Agbossuo, K., Chahine, R., Hamelin, J., Laurencelle, F., Hamelin, J., "Renewable Energy Systems Based on Hydrogen for Remote Applications", *Journal of Power Sources*, Vol. 96, pp. 168-72, 2001.

[6] U.S. Department of Energy, *Energy Efficiency and Renewable Energy, Wind & Hydropower Technologies Program*, Wind Energy Research Area; <http://www.eere.energy.gov>. 2010.

[7] Williams, M.C., Strakey, JP., Singhal, SC., "U.S. Distributed Generation Fuel Cell Program", *Journal of Power Sources*, Vol. 131, pp. 79-85, 2004.

[8] Nfaoui, H., Buret, J., Sayigh, A. A. M., Dunnt, P. D. "Modeling of a wind/diesel system with battery storage for R Tangiers and Morocco", *Renewable Energy*, Vol. 4, pp. 155-167, 1994.

[9] Roy, A., Kedare, SH. B., Bandyopadhyay, B., "Application of Design Space Methodology for Optimum Sizing of Wind-Battery Systems", *Applied Energy*, Vol. 86, pp. 2690-2703, 2009.

[10] Yang, W. J., Aydin, O., "Wind Energy/Hydrogen Storage Hybrid Power Generation", *International Journal Energy Research*, Vol. 25, pp. 449-463, 2001.

[11] Pino, FJ., Valverde, L., Rosa, F., "Influence of Wind Turbine Power Curve and Electrolyzer Operating Temperature on Hydrogen Production in Wind-Hydrogen Systems", *Journal of Power Sources*, Vol. 196, pp. 4418-4426, 2010.

[12] Santoso, S., Le, H. T., "Fundamental Time-Domain Wind Turbine Models for Wind Power Studies", *Renewable Energy*, Vol. 32, pp. 2436-2452, 2007.

[13] Manwell, J. F., McGowan, J. G., Rogers, A. L. "Wind Energy Explained: Theory, Design and Application", Chichester, UK: Wiley, 2002.

[14] Onar, O. C., Uzunoglu, M., Alam, M. S. "Dynamic Modeling, Design and Simulation of a Wind/Fuel Cell/Ultra-Capacitor-Based Hybrid Power Generation System", *Journal of Power Sources*, Vol. 161, pp. 707-722, 2006.

[15] Ullerberg, Y., "Modeling of Advanced Alkaline Electrolyzers: a System Simulation Approach", *International Journal of Hydrogen Energy*, Vol. 28, pp. 21-33. 2008.

[16] [http://www.bnl.gov/est/erd/hydrogen storage](http://www.bnl.gov/est/erd/hydrogen%20storage), 20-7-2011.

[17] Reilly, J.J., "Metal Hydrides as Hydrogen Energy Storage Media and Their Application, in *Hydrogen: Its Technology and Implications*", Cleveland: CRC Press, Vol. 2, pp. 13-48. 1999.

[18] Larminie, J., Dicks, A., *Fuel Cell System Explained. Second Edition*, Wiley: 2000.

[19] Ghadamian, H., Saboohi, Y., "Quantitative Analysis of Irreversibilities Causes Voltage Drop in Fuel Cell (Simulation & Modeling)", *Electrochemical Acta*, Vol. 50, pp. 699-704. 2004.

[20] <http://www.sunat.ir/ationoffice-windenergyoffice-fa.html>. 09-08-2010.

[21] L. J. M. J. Blomen, Michael N. Mugerwa, *Fuel Cell Systems*, Plenum Press, Second Edition, New York. 2001.

[22] Nelson, D.B., Nehrir, M.H., Wang, C., "Unit Sizing and Cost Analysis of Stand-Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation Systems," *Energy*, Vol. 31, pp. 1641-1656. August 2006.