# مدل‌سازی و آنالیز فنی ـ اقتصادی سیستم هیبرید فتوولتاییک / باد با ذخیره هیدروژن در سایت طالقان

ابوالفضل شیرودی*[۱]، الهه شفیعی[۲]، ارسطو صادقیان[۱]، آریا یونسی[۱]

**تاریخ دریافت مقاله:**
۸۸/۱۰/۲۴
**تاریخ پذیرش مقاله:**
۸۸/۱۲/۱۲

**چکیده:**

با توجه به نیاز روزافزون جهان به انرژی و همچنین محدود بودن منابع انرژی فسیلی، ضرورت استفاده از انرژیهای تجدیدپذیر را بیش از پیش نمایان می‌کند. یک پیشنهاد جهت غلبه بر تناوبی بودن منابع انرژی تجدیدپذیر نظیر خورشید و باد، گسترش سیستم انرژی هیبریدی است که در آن می‌توان انرژی الکتریکی اضافی را تبدیل و ذخیره نمود. این منابع به همراه ذخیره انرژی می‌توانند سیستمی با قابلیت اطمینان بهتری فراهم سازند که برای کاربردهای مستقل از شبکه مناسب باشد. در این مطالعه ما به ارائه نتایج آنالیز فنی- اقتصادی سیستم انرژی هیبرید فتوولتائیک/ باد با ذخیره‌سازی هیدروژن که با نرم افزار شبیه‌ساز HOMER برای تأمین انرژی ساختمان مستقل از شبکه و روشنایی بلوار شرقی- غربی و محوطه اطراف سایت طالقان که مورد شبیه‌سازی و بهینه‌سازی قرار گرفته است، خواهیم پرداخت.

**کلمات کلیدی:**
هیدروژن، فتوولتائیک، توربین بادی، سیستم انرژی هیبرید، HOMER

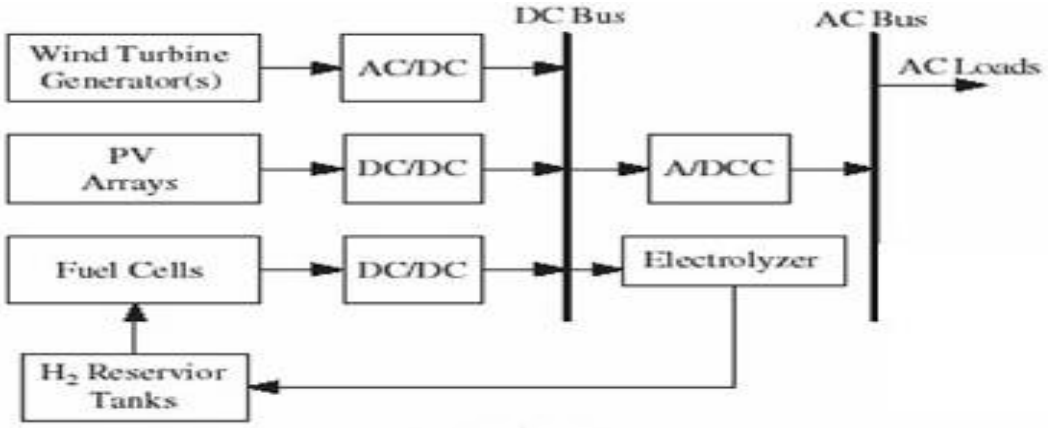
۱) وزارت نیرو ـ سازمان انرژی‌های نو ایران
۲) دانشجوی مهندسی مکانیک دانشگاه صنعتی خواجه نصیر طوسی
* نویسنده مسئول
Shiroudi_a@yahoo.com

**مقدمه**

امروزه، تأمین انرژی مورد نیاز جوامع بشری و نگرانی در مورد تداوم تـأمین آن از اهمیـت خاصـی برخـوردار اسـت. بـا توسعه صنعتی جهان و تقاضای روزافزون انرژی از یک سو و محدود بودن و لـزوم حفـظ منـابع سـوختهای فـسیلی بـرای نسل‌های آتی و جلوگیری از خسارات زیست محیطی ناشی از سوختن آنها از دیگر سوی، راهی جز روی آوردن بـه اسـتفاده از انرژیهای تجدیدپذیر نظیر خورشید و باد را باقی نگذاشته است. در حال حاضر، استفاده از این منابع انرژی در جایگزینی با انرژیهای فسیلی با توجه به ویژگیهای زیست محیطی و اقتصادی آنها یکی از دغدغه‌های سیاستگذاران بخش انرژی است. در طی سالیان اخیر تکنولوژیهای انرژیهای تجدیدپذیر نظیر باد و خورشید از رشد چـشمگیری برخـوردار بـوده‌انـد و از آنهـا می‌توان در نزدیکی مراکز مصرف به منظور حذف خطوط انتقال ولتاژ بالا استفاده نمود. گروهی از سیستمهای تولید برق که از منابع مختلف انرژی تغذیه می‌شوند و به صورت ترکیبی و مکمل با یکدیگر کار می‌کنند، به عنـوان سیـستمهای هیبریـد شناخته می‌شوند. از آنجا که این سیستمها از دو یا چند منبع مختلف انرژی تغذیه می‌شوند، در مقایسه بـا سیـستمهایی کـه یک منبع برای تولید برق دارند از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار هستند. خورشید و باد یکی از عمومی‌تـرین ایـن منـابع انرژی می‌باشند. هیبرید سیستمهای فتوولتائیک و توربین بادی می‌تواند به طور وسیع و مناسـبی نیازهـای شـبکه را تـأمین نماید. در بعضی از سیستمهای هیبرید برای برطرف نمودن نوسانات روزانه از باتری خانه نیز استفاده می‌گردد.

**معرفی سیستم انرژی هیبرید سایت طالقان**

سایت انرژیهای نو طالقان در منطقه‌ای کوهستانی با طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۳۴ دقیقه، عرض جغرافیایی ۳۶ درجه و ۸ دقیقه و در ارتفاع ۱۷۰۰ متری از سطح دریا قرار دارد. متوسط تابش سالیانه نور خورشید معـادل $۴/۵kWh/m^2/day$ و بـر اساس اطلاعات به دست آمده از ایستگاه بادسنجی مستقر در سایت، متوسط وزش سالیانه بـاد $۴/۳m/s$ مـی‌باشـد کـه بـاد غالب در محدوده شمال تا شمال غربی واقع است. سیستم انرژی هیبرید مورد نظر متشکل از یـک دسـتگاه تـوربین بـادی، سلولهای فتوولتائیک، دستگاه الکترولیز آب، سیستم پیل سوختی، مخزن ذخیره گاز هیـدروژن و مبـدلهای DC/AC اسـت که از اجزای این سیستم انرژی، تنها نیاز به تهیه یک دستگاه توربین بادی است که آن نیز با استفاده از اطلاعات حاصـل از دکـل بادسـنجی و بررسـی میـزان سـرعت بـاد در ارتفاعـات ۱۰، ۲۰ و ۴۰ متـری، نـصب یـک دسـتگاه تـوربین بـادی بـه ظرفیت ۲۰kW در ارتفاع ۴۰-۳۰ متری پیشنهاد می‌شود. در این مطالعه، با استفاده از نرم‌افزار HOMER ، سیـستم انـرژی هیبرید شبیه‌سازی گردیده و اطلاعات فنی و اقتصادی آن مورد بررسی قرار گرفته است.




**شکل ۱: شماتیک سیستم انرژی هیبرید فتوولتائیک/ توربین بادی با ذخیره هیدروژن در سایت طالقان**

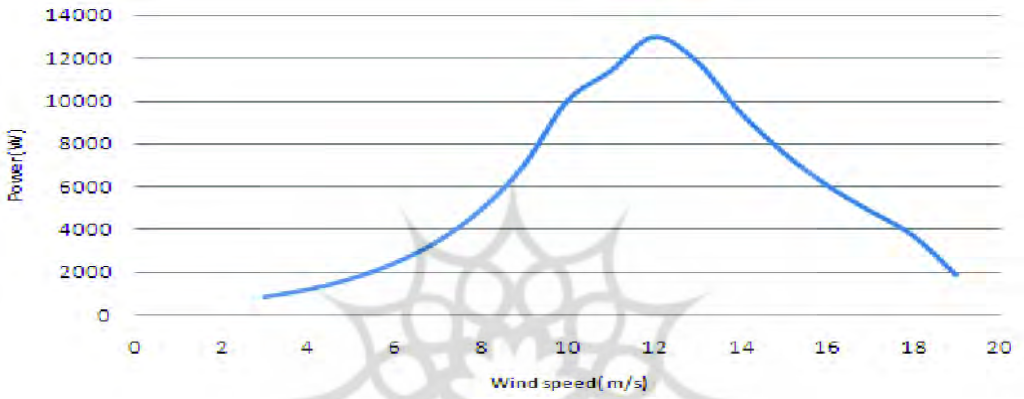
***توربین بادی***

چشم‌انداز آینده انرژی باد، به عنوان یک منبع انرژی قابل بهره‌برداری و مطمئن جایگاهی حایز اهمیت در سناریوی درازمدت تأمین انرژی جهان کسب نموده است. چرخش صدها توربین بادی در سراسر جهان واقعیت غیر قابل اغماضی است که رویای دیرینه تولید برق از باد را به حقیقت تبدیل نموده است. امروزه میلیونها کیلووات ساعت انرژی الکتریکی توسط نیروگاههای برق بادی تولید و به شبکه‌های محلی و یا سراسری تزریق می‌گردد؛ از سوی دیگر توجه روزافزون به توسعه نیروگاههای برق بادی موجب گردیده است تا انرژی باد به عنوان یک منبع مهم جایگزین سوختهای فسیلی (که تهدید کننده محیط زیست محسوب می‌شوند) گردد[۲].

باد یکی از منابع انرژی پایان ناپذیر جهان است که بر اثر اختلافات ترمودینامیکی نظیر اختلاف دما و فشار بین نواحی مجاور به وجود می‌آید. یکی از بهترین روشهای بهره‌برداری از انرژی باد، تولید انرژی الکتریکی از باد است. توربین بادی، انرژی جنبشی موجود در باد را به انرژی مکانیکی تبدیل می‌کند که این انرژی می‌تواند برای اهداف مختلفی به کار گرفته شود. به این صورت که با قرار دادن یک توربین بادی در مسیر باد و انتقال انرژی مکانیکی توربین به یک ژنراتور، جریان مستقیم یا متناوب سنکروه یا آسنکرون بطور مستقیم یا از طریق جعبه دنده با نسبت تبدیل مناسب، انرژی الکتریکی حاصل می‌شود[۹]. برآورد میزان انرژی قابل اخذ از یک سایت بادی یکی از مهمترین قسمتهای نصب و راه‌اندازی دستگاه توربین بادی می‌باشد. چگالی انرژی باد یک روش مناسب برای براورد مقدار پتانسیل موجود در هوا در یک سایت بادی می‌باشد. چگالی توان باد بیانگر مقدار انرژی است که توربین بادی می‌تواند آنرا از هوا جذب نماید. از آنجا که هوا جرم دارد و با حرکت کردن، تولید باد می‌کند لذا، دارای انرژی جنبشی می‌باشد. توان باد ناشی از انرژی جنبشی آن است که با سرعت

ثابت V از سطح A عبور می‌کند و از رابطه زیر به دست می‌آید که در آن A مساحت ناحیه جاروب شده توسط پروانه توربین بادی بر حسب متر مربع، ρ چگالی هوا و P توان بر حسب وات یا کیلووات بیان می‌شود[۴].

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \qquad (۱)$$




**شکل۲: منحنی انرژی توربین بادی مدل FD8.0-10K-20 [٤]**

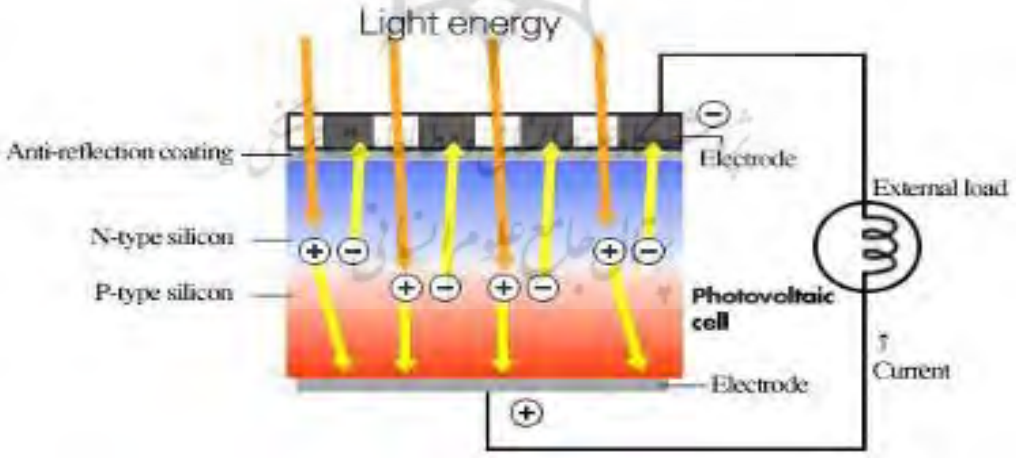
توربین بادی مورد نظر در این طرح از نوع محور افقی و دارای سه پره می‌باشد. پروانه توربین بادی سه پره‌ای در خلاف جهت باد عمل می‌کند و در مقابل جریان باد قرار می‌گیرد. توربین بادی دارای محور افقی از نوع بسیار معمولی هستند که امروزه به کار گرفته می‌شوند. پارامترهای فنی توربین بادی مدل FD8-10K-20 به ظرفیت ۱۰kW در جدول ذیل ارائه شده است.

**جدول۱: مشخصات فنی توربین بادی مورد مطالعه مدل FD8-10K-20 [٤]**

| Type | 3 Blade Upwind |
|---|---|
| Rotor Diameter | 8 m |
| Start-up Wind Speed | 2.5 m/s |
| Cut-in Wind Speed | 3 m/s |
| Rated Wind Speed | 10 m/s |
| Rated Power | 10 kW |
| Maximum Power | ~ 12 kW |
| Cut-Out Wind Speed | 15 m/s |
| Timing manner | automatically adjust the |
| Generator | Permanent Magnet Alternator |

**سلولهای فتوولتائیک**

استفاده از انرژی خورشیدی به عنوان منبعی فناناپذیر و کاربرد آن در سیستمهای فتوولتائیکی برای تبدیل به انرژی الکتریکی به طور کامل فراگیر شده است. سلولهای فتوولتائیک، در حقیقت بلورهای نیمه‌هادی سیلیکونی و شکل غیربلوری آن هستند که پردازش شده و عملیاتی روی آنها انجام می‌گیرد بطوری که با برخورد یک فوتون خورشیدی به سطح یک سلول سیلیکون، الکترون از مدار خارج شده و جریان الکتریسیته بوجود می‌آید. هنگامی که نور وارد کریستال می‌شود، الکترونها بوسیله نور تحریک شده و از میادین خود جدا می‌شوند و میان وجوه بالا و پایین سلول اختلاف پتانسیل بوجود می‌آید. در صورتی که مدار بین دو لایه کامل شود، آنگاه این اختلاف پتانسیل جریان مستقیمی را بوجود می‌آورد که مکانیسم فتوولتائیک نامیده می‌شود [ ۱۳و۱۲و۱۱]. سلولهای فتوولتائیک جهت تأمین انرژی الکتریکی مورد نیاز از پتانسیل مناسبی در کاربردهای مستقل از شبکه برخوردارند و می‌توان از آنها جهت تولید انرژی پایدار به همراه سیستمهای مکمل هیدروژنی استفاده نمود. از مزایای استفاده این سیستمها می‌توان به جلوگیری از آلودگی محیط زیست، عدم احتیاج به خطوط وسیع انتقال و توزیع و سهولت در نگهداری و بهره‌برداری اشاره نمود[ ۱۳و۱۱]. با توجه به طول عمر ۲۵-۲۰ سال سیستمهای فتوولتائیک، این تکنولوژی به عنوان یکی از ابزارهای مهم و کارآمد در کاربرد انرژیهای نو، می‌تواند پاسخگوی مناسبی برای تأمین انرژی الکتریکی در مناطق خارج از شبکه سراسری و صعب العبور باشد[۸].




**شکل۳: نحوه تبدیل انرژی در سلول خورشیدی**

در این سیستم انرژی مستقل از شبکه، ماژولهای خورشیدی از نوع پلی‌کریستال، مدلMA36/45 و ساخت شرکت فیبر نوری ایران می‌باشد. در این طرح، ماژولها با زاویه ۴۵ درجه نسبت به جنوب قرار داده شده‌اند که این زاویه به دلیل

جهت تابش نور خورشید و موقعیت جغرافیایی کشور ایران که در نیمکره شمالی قرار گرفته شده است که بر طبق محاسبات صورت گرفته در فصول مختلف سال، زاویه مناسب از ۳۰ تا ۶۰ درجه تغییر می‌نماید[ ۳و۲]. در جدول(۲ )، مشخصات فنی ماژولهای خورشیدی در شرایط استاندارد (شدت تابش نور خورشید $۱۰۰۰W/m^2$ و دمای $۲۵\ ^oC$) ارائه شده است.

**شکل٤: نمایی از سلولهای فتوولتائیک نصب شده در سایت طالقان**

**جدول۲: مشخصات فنی ماژولهای خورشیدی مدلMA36/45 ساخت شرکت فیبر نوری ایران**

| نوع | پلی کریستال |
|---|---|
| توان نامی تابش در شرایط استاندارد | ۴۵ وات |
| ولتاژ در توان ماکزیمم | ۱۶/۵ ولت |
| جریان در توان ماکزیمم | ۲/۸ آمپر |
| ولتاژ مدار باز ماژول($V_{OC}$) | ۲۰/۵ ولت |
| جریان اتصال کوتاه ماژول($I_{SC}$) | ۲/۹۸ آمپر |
| ضریب حرارتی جریان اتصال کوتاه آرایه($\alpha_{SC}$) | $۲/۰۸۶*۱۰^{-۳}\ A/^oC$ |
| ضریب حرارتی ولتاژ مدار باز آرایه($\beta_{OC}$) | $۰/۰۷۷۹\ V/^oC$ |
| راندمان نامی ماژول | ۱۱/۵ درصد |
| طول عمر متوسط | ۲۵ سال |

**مبدل**

مبدل در واقع تبدیل کننده برق از نوع DC به AC و یا بالعکس می‌باشد. در این طرح برق مورد نیاز دستگاه الکترولیز آب از نوع جریان سه فاز و ولتاژ ۳۸۰ ولت می‌باشد؛ بنابراین برق حاصل از سلولهای فتوولتائیک نیز باید مطابق با مشخصات و

نیاز مصرف‌کننده تأمین شود، لذا می‌بایست از مبدل جریان مستقیم به جریان متناوب استفاده نمود. مبدل، ولتاژ DC از ماژول خورشیدی را به ولتاژ AC جهت تأمین انرژی مورد نیاز مصرف کننده تبدیل می‌کند. در این سیستم جریان برق مستقیم تولید شده از ماژولهای نصب شده توسط تعداد متناسبی از مبدلهای مدل Sunny Boy به جریان برق متناوب تبدیل می‌شود که از مزایای انتخاب این مبدلها می‌توان به حجم کوچک، راندمان بالا و سرعت عمل بالا اشاره نمود. این مبدلها در ظرفیتهای۱، ۱/۷، ۲/۱،۱/۸، ۲/۵، ۳/۳، ۳/۸و ... کیلووات موجود می‌باشد و متناسب با میزان انرژی هر پایلوت، نیاز هر یک از سیستمهای مورد نظر را تأمین می‌کند. در جدول(۳)مشخصات فنی مبدلSunny Boy مدل۲۵۰۰ که در این پروژه مورد استفاده قرار گرفته، ارائه گردیده است[۱۴].

**جدول۳: مشخصات فنی مبدلهایSunny Boy [۱٤]**

| Sunny Boy Type | | 2500 |
|---|---|---|
| Input Values | Recommended max. PV-power | 3450 $W_p$ |
| | max) Max. input voltage ($V_{DC}$, | 600 V |
| | PV-Voltage range MPPT ($V_{pv}$) | 224 … 600 V |
| | Max. input current | 12 A |
| Output Values | Max. AC-power | 2500 W |
| | Nominal AC-power ($P_{AC}$, max) | 2200 W |
| Efficiency | Max Efficiency ($\eta_{Max}$) | 94.1% |
| Power Consumption | Internal consumption in operation | < 7 W |
| | Internal consumption in standby | 0.25 W |

**دستگاه الکترولیز آب**

الکترولیز آب یکی از روشهای تولید هیدروژن است و در صورتی که الکتریسیته مورد نیاز آن جهت تجزیه آب از منابع انرژی تجدیدپذیر تأمین گردد، یک سوخت پاک تلقی می‌شود. دستگاههای الکترولیز آب به خوبی با انواع انرژیهای تجدیدپذیر سازگار شده و به سیستمهای تولید پراکنده هیدروژن اجازه می‌دهند تا در ساعات پیک، میزان مصرف را مدیریت کنند و با استفاده از هیدروژن ذخیره شده و استفاده از آن در پیل‌های سوختی، کمبود توان در شبکه سراسری را تا حدودی تأمین نمایند. در روش الکترولیز آب با عبور جریان مستقیم برق از میان آب، آنرا به اجزای سازنده‌اش یعنی گازهای $H_2$ و $O_2$ تجزیه می‌نماید. دستگاه الکترولیز آب مدلEV05/10 مورد استفاده در این طرح، از نوع قلیایی، دو قطبی و مشتمل بر تعداد۱۰سلول است و جریان آن در شرایط نامی۲۵۰ آمپر است. دستگاه الکترولیز آب به ظرفیت5kW و ساخت شرکت

HT آلمان است و قادر است در شرایط نرمال حداکثر یک متر مکعب گاز هیدروژن در ساعت تولید نماید. راندمان نامی دستگاه الکترولیز مورد استفاده در این پایلوت ۷۰٪ می‌باشد[۷].

**شکل۵: نمایی از دستگاه الکترولیز آب مدل EV05/10**

### مخزن ذخیره هیدروژن

ذخیره‌سازی هیدروژن دارای مزایای اقتصادی نسبت به باتریهای سربی جهت ذخیره‌سازی در مدت طولانی دارد. دانسیته انرژی هیدروژن در واحد جرم بسیار بالا است اما به علت دانسیته پایین گاز، دانسیته انرژی آن در واحد حجم بسیار کم است. جهت دستیابی به حداکثر مقدار انرژی، لازم است تا مقداری زیادی از هیدروژن ذخیره گردد. هیدروژن به صورت جامد، مایع و گازی ذخیره‌سازی می‌شود و ذخیره‌سازی هیدروژن گازی یکی از ساده‌ترین، متداول‌ترین و ارزان‌ترین روشهای ذخیره‌سازی است. در این طرح، از یک مخزن یک متر مکعبی جهت ذخیره‌سازی گاز هیدروژن تا فشار حداکثر ۱۰bar استفاده شده است.

### پیل سوختی

هیدروژن می‌تواند به اشکال مختلف مورد استفاده قرار گیرد اما، مهمترین ویژگی هیدروژن، امکان استفاده از آن در پیل‌های سوختی و تولید انرژی الکتریکی بدون ایجاد آلودگی زیست محیطی و راندمان بالا است. پیل سوختی، یک سیستم الکتروشیمیایی است که انرژی شیمیایی سوخت رابه طور مستقیم به انرژی الکتریکی تبدیل می‌کند و در آن سوخت به طور مداوم به الکترود آند و اکسیژن به الکترود کاتد تزریق می‌گردد و واکنش‌های الکتروشیمیایی در الکترودها انجام شده و با ایجاد پتانسیل الکتریکی جریان الکتریکی برقرار می‌گردد. در این طرح، از یک دستگاه سیستم پیل سوختی به ظرفیت ۱/۲ kW و نوع پلیمری و مدل Nexa1200، ساخت شرکت BALLARD کانادا استفاده شده است. راندمان نامی

آن حدود۵۰–۳۸ درصد و طول عمر پیش بینی شده برای آن۱۵۰۰ ساعت عملکرد مداوم یا۵۰۰ بار روشن و خاموش می‌باشد[۱۰].

**شکل٦: نمایی از سیستم پیل سوختی پلیمری مدل Nexa1200**

### برق مورد نیاز مصرف کنندگان

در این مطالعه فرض شده است تا از یک بار ثابت جهت بررسی فنی و اقتصادی سیستم هیبرید فتوولتائیک- توربین بادی با ذخیره هیدروژن در سایت انرژیهای نو طالقان استفاده شود که در این جا روشنایی محوطه دور سایت و بلوار شرقی- غربی و ساختمان مستقل از شبکه که کلیه اجزای تشکیل دهنده سیستم هیبرید در آن نصب و راه‌اندازی شده است، مورد بررسی قرار گرفته است که دارای شش اتاق است که با توجه به ابعاد هر اتاق، تعداد لامپهای مورد نیاز هر ناحیه مشخص شده است. در این جا فرض شده است که اتاقهای مختلف در ساختمان مستقل از شبکه، مجهز به یک دستگاه کامپیوتر و یک دستگاه پرینتر که از ساعت ۹ صبح لغایت ۵ بعدازظهر روشن می‌باشند. در پایان وقت اداری جهت تأمین روشنایی محوطه ساختمان، از چهار عدد لامپ۲۵۰ واتی و همچنین روشنایی محوطه دور سایت و بلوار شرقی- غربی که متشکل از۸۰ عدد روشنایی۲۵۰ واتی است، استفاده می‌شود که از ساعت۷ بعدازظهر لغایت۶ صبح روشن خواهند بود. حال با فرض ثابت بودن بارهای مصرفی موجود در طول مدت شبانه روز در این طرح به بررسی فنی و اقتصادی با استفاده از نرم‌افزار HOMER پرداخته شده است.

**جدول٤: برآورد میزان مصرف روزانه ساختمان مستقل از شبکه موجود در سایت طالقان در یک روز نمونه در شهریور ماه**

| نوع مصرف | توان واحد مصرفی (W) | مدت زمان مصرف (hr/day) | انرژی (Wh/day) | توضیحات |
|---|---|---|---|---|
| دستگاه الکترولیز آب | ۳۵۰۰ | ۸ | ۲۸۰۰۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر (در این مدت زمان دستگاه الکترولیز با تمام ظرفیت ۵kW کار نمی‌کند لذا توان میانگین۳/۵kW در نظر گرفته شده است) |
| دستگاه کمپرسور هیدروژن | ۱۵۰۰ | ۲/۵ | ۳۷۵۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر (کمپرسور زمانی وارد مدار می‌شود که ۷۵٪ بافر تانک پر شده باشد و تا خالی شدن آن به میزان ۲۵٪ کمپرسور بکار خود ادامه می‌دهد) |
| روشنایی اتاق فتوولتائیک | ۲*۱۰۰ | ۸ | ۱۶۰۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی باتریخانه | ۴*۶۰ | ۸ | ۱۹۲۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی اتاق الکترولیز آب | (۸*۱۰۰)+(۲*۶۰) | ۸ | ۷۳۶۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی اتاق پیل سوختی | ۴*۱۰۰ | ۸ | ۳۲۰۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی اتاق بافر تانک | ۲*۶۰ | ۲ | ۲۴۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی اتاق کمپرسور هیدروژن | ۲*۶۰ | ۸ | ۹۶۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| دستگاههای کامپیوتر و پرینتر اتاقهای فتوولتائیک و پیل سوختی | ۴*۳۰۰ | ۸ | ۱۴۴۰۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی سرویس بهداشتی | ۲*۶۰ | ۲۴ | ۲۸۸۰ | ۹ صبح لغایت ۱۷ بعدازظهر |
| روشنایی محوطه ساختمان کانکس | ۴*۲۵۰ | ۱۱ | ۱۱۰۰۰ | ۱۹ بعدازظهر لغایت ۶ صبح |
| روشنایی محوطه دور سایت و بلوار شرقی و غربی | ۸۰*۲۵۰ | ۱۱ | ۲۲۰۰۰۰ | ۱۹ بعدازظهر لغایت ۶ صبح |
| **کل میزان مصرف کنندگان** | | | **۲۹۵،۳۱۰ Wh/day** | |

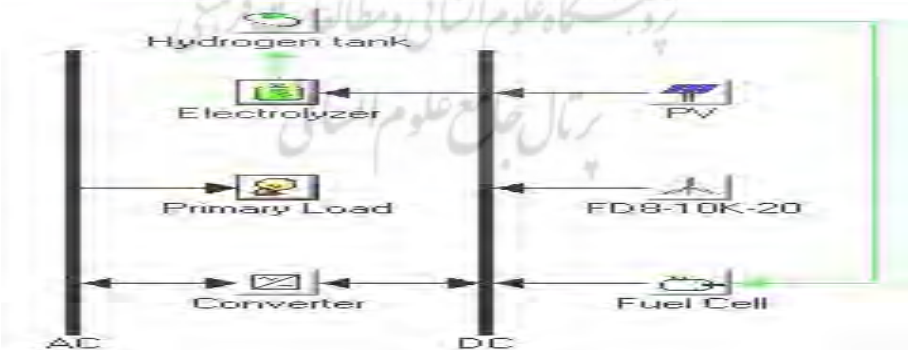
## معرفی نرم افزار شبیه‌ساز HOMER [ ۸ و ۵]

از این نرم‌افزار جهت شبیه‌سازی و ارزیابی فنی و اقتصادی سیستمهای هیبرید استفاده می‌شود که به وسیله آزمایشگاه ملی انرژی تجدیدپذیر ایالات متحده آمریکا (NREL) ایجاد شده و توسعه یافته است. نرم‌افزارHOMER کاربر را قادر می‌سازد تا گزینه‌های طراحی متفاوت بسیاری طبق اصول تکنیکی و اقتصادی را مقایسه کند، همچنین امکان اعمال تغییرات و عدم قطعیت‌های فراوانی در ورودیها را فراهم می‌کند. HOMER، عملکرد یک آرایش خاص سیستم انرژی را برای هر ساعت از سال با تعیین روشهای ممکن تأمین انرژی مورد نیاز و هزینه چرخه عمر آن مدل‌سازی می‌کند. در فرایند بهینه‌سازی HOMER تمام آرایش‌های مختلف تأمین قدرت که محدودیتهای تکنیکی را ارضا می‌کند، جهت دستیابی به اقتصادی‌ترین حالت برای هزینه چرخه عمر را جستجو می‌کند. جهت مدل‌سازی یک سیستم شامل سلولهای فتوولتائیک و توربین بادی، در نرم افزار HOMER باید اطلاعات منبع خورشیدی و میزان سرعت باد منطقه مورد نظر را در برنامه وارد نمود. نرم‌افزار در مدل‌سازی طبق گام‌های یک ساعته، میزان انرژی منابع تجدیدپذیر را محاسبه می‌کند و برای بیشتر انواع سیستمهای انرژی کوچک، به خصوص آنهایی که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب هستند، گامهای یک ساعته برای تحلیل، مقیاس دقیقی به نظر می‌رسد. نرم‌افزارHOMER از معادله NPC برای هزینه چرخه عمر استفاده می‌کند که شامل هزینه‌های تأسیس اولیه، هزینه جایگزینی، تعمیرات، سوخت، خرید برق از شبکه، جریمه‌های ناشی از آلودگی هوا و

فروش برق به شبکه است. در محاسبه NPC هزینه‌ها، مثبت و درآمدها منفی در نظر گرفته می‌شوند. HOMER تمام هزینه‌ها و درآمدها را با یک نرخ بهره ثابت در طول سال ارزیابی می‌کند. در این نوع ارزیابی جهت اثر دادن تورم در محاسبات در انتهای فرhیند تحلیل و بررسی سیستم باید با محاسبه نرخ بهره واقعی که ناشی از تورم است و طبق روابط معین، اثر تغییر نرخ بهره را بر NPC اعمال کرد. نرخ بهره‌ای که کاربر وارد می‌کند، نرخ بهره واقعی است که برابر با تفاضل نرخ بهره نامی و نرخ بهره تورم است. در فرایند شبیه‌سازی، HOMER تمام حالات ممکن (غیر از حالات غیرقابل تحقق) را شبیه‌سازی می‌کند و سپس آنها را طبق NPC مرتب می‌کند و در نهایت آرایش قابل تحقق توسط کمترین NPC را به عنوان آرایش بهینه معرفی می‌کند.

## شبیه‌سازی سیستم انرژی هیبرید فتوولتائیک/باد با ذخیره هیدروژن در سایت طالقان با استفاده از نرم‌افزار HOMER

هیدروژن می‌تواند در کنار منابع انرژی تجدیدپذیر به عنوان حامل انرژی، امکان ذخیره‌سازی انرژی و دریافت بازده مناسب از این سیستمها را فراهم آورد. در پایلوتهای انرژی هیدروژنی با تبدیل انرژیهای نورانی خورشید و بادی به انرژی الکتریکی، امکان تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن را به عنوان حامل انرژی فراهم میشود که می‌تواند پس از ذخیره‌شدن در هر زمان و مکان مناسب در مصرف‌کنندگان مورد استفاده قرار گیرد. در این فناوری برق مورد نیاز دستگاه الکترولیز آب جهت تجزیه آب به اجزای سازنده‌اش یعنی گازهای هیدروژن و اکسیژن از سلولهای فتوولتائیک و توربین بادی تأمین می‌گردد. هیدروژن تولید شده از دستگاه الکترولیز آب با عبور از دستگاه کمپرسور هیدروژن، فشرده شده و در مخزن یک متر مکعبی تا فشار ۱۰bar ذخیره می‌شود تا در مواقع نیاز در پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد و طی یک فرایند الکتروشیمیایی، هیدروژن و اکسیژن با هم واکنش داده و جریان برق تولید شود.



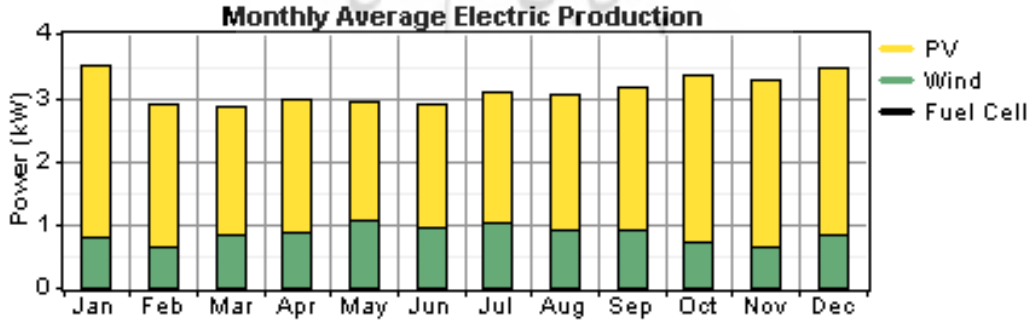

**شکل۷: نمایی شماتیک از طرح سیستم هیبرید فتوولتائیک/ باد با ذخیره هیدروژن در سایت طالقان در نرم افزار HOMER**

نتایج آنالیز شبیه‌سازی سیستم انرژی هیبرید فتوولتائیک/ باد با ذخیره هیدروژن در جداول زیر ارائه شده است که در آن هزینه‌های مربوط به سیستم انرژی با عمر بیست سال محاسبه شده است. در طول مدت پروژه، دستگاه الکترولیز آب، مخزن ذخیره هیدروژن، توربین بادی و مبدلها تا پایان مدت پروژه قابل استفاده خواهند بود و نیازی به تعویض ندارند؛

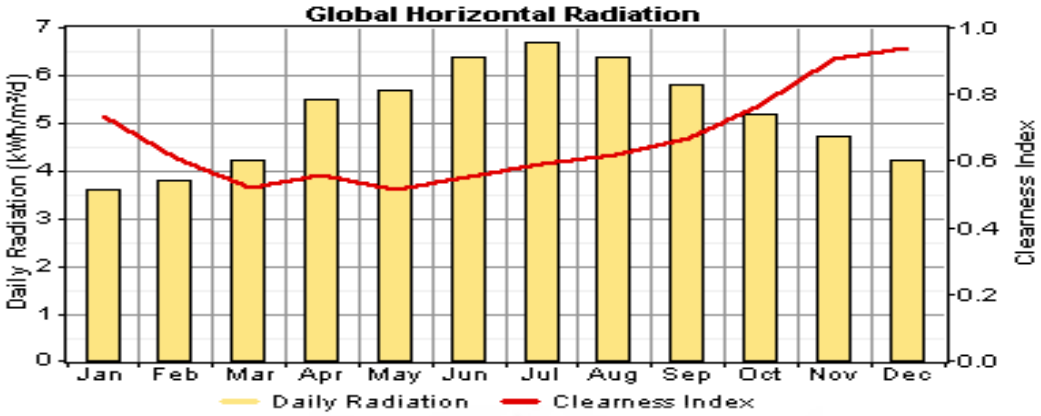
همچنین، هزینه برخی از موارد نظیر نصب ماژولهای خورشیدی، سیم‌کشی جریان مستقیم، نصب ماژولها در مقابل هزینه کل مربوط به سیستم چشم‌پوشی و صرفنظر شده است[۸]. برای انجام آنالیز فنی و اقتصادی این طرح با استفاده از نرم‌افزار کافی است تا با وارد نمودن اطلاعات دقیق هر یک از اجزای طرح متشکل از سلولهای فتوولتائیک، توربین بادی، دستگاه الکترولیز آب، سیستم پیل سوختی، مبدلها و همچنین پارامترهایی همچون طول و عرض جغرافیایی محل سایت، طول عمر مفید پروژه، متوسط سود و بهره سالیانه، متوسط تابش سالیانه، میزان تابش روزانه، میزان سرعت باد سالیانه، انتشار آلاینده‌های زیست محیطی، میزان بار مصرف انرژی در شبانه‌روز و ... طرح مذکور مدل‌سازی گردد و بهینه‌ترین طرح پیشنهاد می‌گردد. در فرایند شبیه‌سازی، HOMER تمام حالات ممکن را شبیه‌سازی می‌نماید و سپس آنها را طبق NPC مرتب کرده و در نهایت آرایش قابل تحقق توسط کمترین NPC را به عنوان آرایش بهینه معرفی می‌کند. نتایج حاصل از محاسبات بیانگر این مسئله است که بهینه‌ترین سیستم انرژی پیشنهادی، متشکل از ۱۰kW سلولهای فتوولتائیک، ۱۰kW توربین بادی، ۴kW دستگاه الکترولیز آب، ۱۰kW مبدل، ۱kW پیل سوختی و مخزن ذخیره یک کیلوگرمی که ۰/۳kg از هیدروژن ذخیره شده در این طرح مورد استفاده قرار می‌گیرد. همچنین، هزینه چرخه عمر سیستم در این طرح ۱۲۸۳۲۲$ برآورده شده است. قیمت برق تولیدی با انتخاب این سیستم و با فرض بازگشت سرمایه بعد از ۲۰ سال برابر ۱۵/۳۲۶ $/kWh برآورد شده است. نتایج این شبیه‌سازی سیستم در جداول(۵،۶) و شکل‌های(۸،۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳) ارائه گردیده است.

**جدول۵: میزان مصرف سالیانه انرژی الکتریکی طرح**

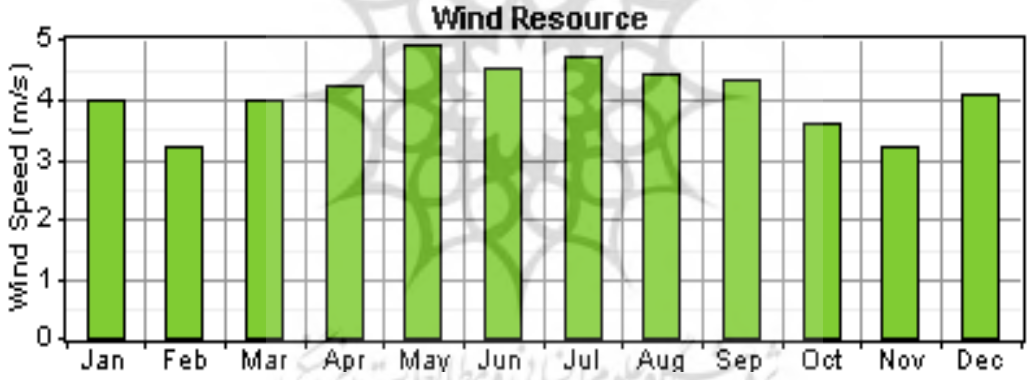
| Load | Consumption (kWh/year) |
|---|---|
| AC primary load | 730 |
| Electrolyzer load | 29 |
| Total | 759 |



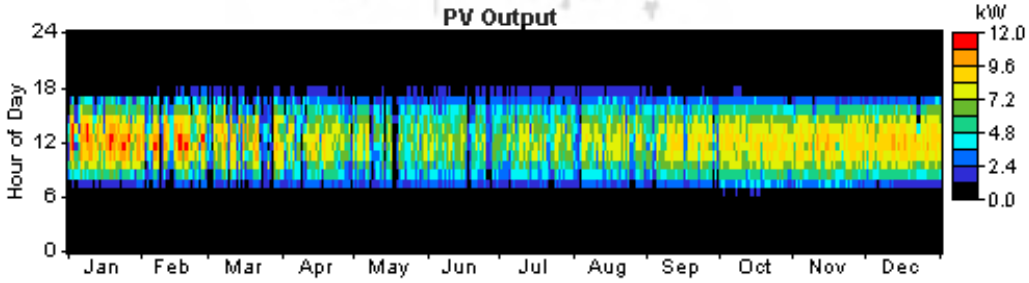

**شکل۸: نمودار متوسط میزان تولید انرژی الکتریکی در طی یک سال**




**شکل۹: متوسط روزانه تابش نور خورشید و شاخص شفافیت سایت طالقان در طی یک سال**



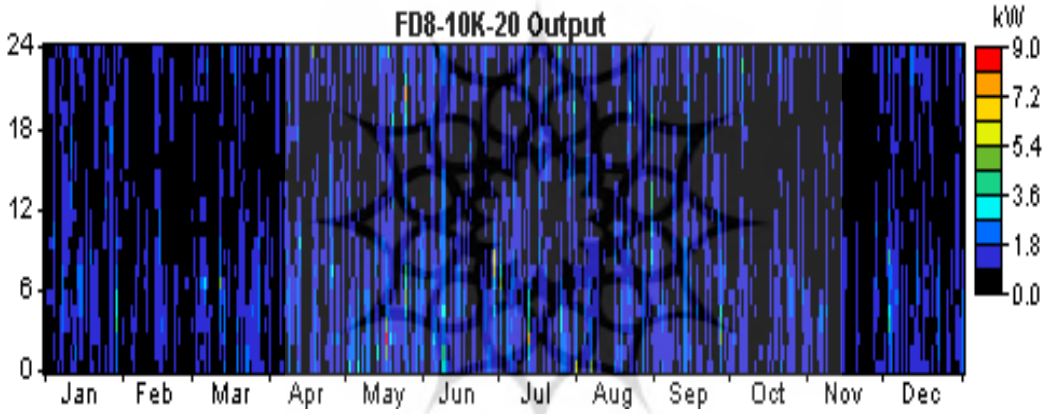

**شکل۱۰: سرعت باد در سایت طالقان در طی یک سال**



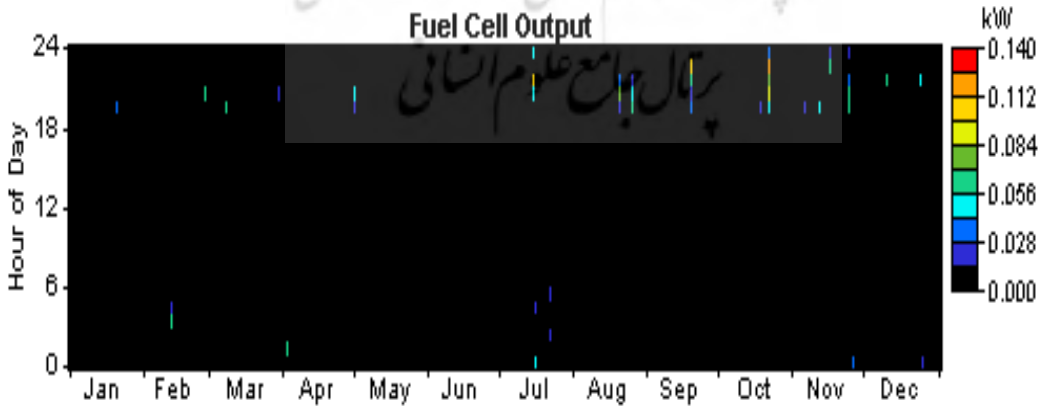

**شکل۱۱: میزان انرژی تولید شده از سلولهای فتوولتائیک در یک سال**

**جدول٦: میزان تولید سالیانه انرژی الکتریکی طرح**

| Component | Production (kWh/year) |
|---|---|
| PV array | 19943 |
| Wind turbine | 7451 |
| Fuel cell | 4 |
| Total | 88548 |




**شکل۱۲: میزان انرژی تولید شده از توربین بادی در یک سال**




**شکل۱۳: میزان توان تولیدی توسط سیستم پیل سوختی در طی یک سال**

## نتیجه گیری

در سیستم انرژی هیبرید، تولید برق از منابع مختلف انرژی تغذیه می‌شود و به صورت ترکیبی با یکدیگر کار می‌کنند و در مقایسه با سیستمهایی که از یک منبع برای تولید برق استفاده می‌کنند، از قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است. خورشید و باد یکی از متداول ترین این منابع انرژی می‌باشند. هیبرید سیستمهای فتوولتائیک و توربین بادی می‌تواند به طور وسیع و مناسبی نیازهای شبکه را تأمین نماید. در بعضی از سیستمهای هیبرید، برای برطرف نمودن نوسانات روزانه از باتریخانه نیز استفاده می‌گردد. در این راستا، پایلوت انرژی مستقل از شبکه سایت طالقان (که متشکل از ۱۰kWسلولهای فتوولتائیک، 5kW دستگاه الکترولیز آب و ۱/۲ kW سیستم پیل سوختی بود و در سال۱۳۸۴ نصب و راه‌اندازی شده بود)، با هدف قابلیت اطمینان بیشتر جهت تأمین نیاز مصرف کنندگان، مدل‌سازی سیستم هیبرید فتوولتائیک/ باد با استفاده از نرم افزار شبیه‌ساز HOMER صورت پذیرفت.

برای بررسی دقیق سیستم هیبرید فتوولتائیک- باد با ذخیره هیدروژن در سایت طالقان، یک بار ثابت مصرفی که در این جا یک ساختمان مستقل از شبکه و همچنین روشنایی بلوار شرقی- غربی با میزان مصرف بار روزانه معین ۲۹۵/۳۱kWh/day فرض شده است و اندازه هر سیستم انرژی جهت تأمین این میزان بار با استفاده از نرم‌افزارHOMER شبیه‌سازی گردید که نتایج حاصل در جدول (۷) ارائه شده است. با عنایت به ذخیره‌سازی هیدروژن به عنوان یک حامل انرژی در این سیستم، انرژی هیبرید و همچنین افزایش میزان بار مصرفی که متأثر از وارد مدار شدن دستگاههای الکترولیز آب و کمپرسور هیدروژن است. در این سیستم هیبرید با تبدیل انرژی نورانی خورشید و انرژی بادی به انرژی الکتریکی، امکان تولید و ذخیره‌سازی هیدروژن را بعنوان حامل انرژی پاک فراهم می‌سازد که می‌تواند پس از ذخیره‌شدن در مخزن هیدروژن، در هر زمان و مکان مناسب در مصرف‌کننده پیل سوختی مورد استفاده قرار گیرد.

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی

**جدول۷: نتایج آنالیز فنی و اقتصادی سیستم انرژی هیبرید فتوولتائیک/ باد سایت طالقان**

| موارد | مشخصات سیستم انرژی | | |
|---|---|---|---|
| سیستم شبیه‌سازی شده پیشنهادی از نرم‌افزار شبیه ساز HOMER | – ۱۰ کیلووات سلولهای فتوولتائیک<br>– ۴ کیلووات دستگاه الکترولیز آب<br>– یک کیلووات سیستم پیل سوختی<br>– یک مخزن ذخیره‌سازی $m^3$ ۱ هیدروژن (که ۰/۳kg از هیدروژن آن مصرف می‌شود)<br>– ۱۰ کیلووات مبدل | | |
| هزینه چرخه عمر سیستم ($) | ۱۲۸۳۲۲ | | |
| هزینه سرمایه گذاری اولیه ($) | ۱۱۹۶۵۰ | | |
| قیمت برق تولید شده ($/kWh) | ۱۵/۳۲۶ | | |
| میزان سهم تولید انرژی الکتریکی سالیانه هر یک از مولدها (kWh/year ) | – فتوولتائیک<br>– توربین بادی<br>– پیل سوختی | ۱۹۹۴۳<br>۷۴۵۱<br>۴ | |
| میزان سهم مصرف انرژی الکتریکی سالیانه هر یک از مصرف کنندگان (kWh/year ) | – بار مصرفی<br>– الکترولیز آب | ۷۳۰<br>۲۹ | |

## منابع

[۱]حاج سقطی، اصغر. ۱۳۸۰. اصول و کاربرد انرژی خورشیدی.
[۲]قرشی، امیرحسین. ۱۳۸۳. "عملکرد مزارع برق بادی؛ واقعیتها از دیدگاه آمار و اطلاعات." سومین همایش ملی انرژی.
[۳]کاتالوگ مشخصات فنی و الکتریکی ماژول خورشیدی مدلMA36/45 ، مجتمع تولید فیبر نوری و برق خورشیدی ایران.
[۴]میرزایی ضیاپور، بهروز. ۱۳۸۳. "توربینهای بادی و چگونگی موقعیت یابی مناطق ایده ال برای نصب آنها." اولین کنفرانس اکوانرژی ایران.
[۵]نوری زاده، صابر. ۱۳۸۶. "شبیه‌سازی سیستمهای قدرت کوچک– بخش دوم: شبیه‌سازی."، ششمین همایش ملی انرژی
[۶]یعقوبی، محمود. ۱۳۸۳. "بررسی کاربردهای مختلف انرژی خورشیدی در ایران با توجه به میزان تابش تخمینی." اولین کنگره بین‌المللی اکوانرژی.
[7] "Instruction for erection operation and maintenance for hydrogen generation and compression plant" EV05/10 system. 1998. DEMAG.
[8] Mansouri, M.N., Mimouni, M.F., Benghanem, B. and Annabi, M. 2003. "Simulation model for wind turbine with asynchronous generator interconnected to the electric network." Proceedings of world renewable energy.
[9] NERL. Hybrid Optimization Model for Electric Renewable (HOMER) available freely at: www.nrel.gov.
[10] Nexa Installation and Integration Guides merged into one document"2003, MAN5100078 Nexa User's Manual - Rev 0A.

[11] Vamnderhulst, P., Lanser, H., Bergmeyer, P., Foeth, F. and Albers, R.1990. "Solar Energy, Small Application in Developing Countries." ISBN9070857197, © Stichting Tool, Amsterdam.
[12] Wenisch, A. and Pladerer, C.2003. "Energy Situation and Alternatives in Romania." The compagna per la Riforma Della Banca Mondiale, Vienna.
[13] www.ChinaBestProducts.com.
[14] www.kenes.com.
[15] www.SMA.de

پژوهشگاه علوم انسانی و مطالعات فرهنگی
پرتال جامع علوم انسانی