ستاد محیط زیست و توسعه پایدار شهرداری تهران
سازمان حفاظت محیط زیست
وزارت صنعت،معدن و تجارت دفتر HSE
دانشکده محیط زیست
انجمن مهندسی محیط زیست ایران
ششمین همایش ملی و نمایشگاه تخصصی مهندسی محیط زیست
The 6th National Conference & Exhibition on Environmental Engineering
تهران - 1391

طراحی سیستم ترکیبی پنل خورشیدی - توربین بادی - سیستم هیدروژنی مطالعه موردی: الیگودرز

مهدی جهانگیری
دانشجوی دکترای مهندسی مکانیک،دانشگاه صنعتی اصفهان
M.Jahangiri@me.iut.ac.ir
احمد صداقت
استادیار مهندسی مکانیک،دانشگاه صنعتی اصفهان،
Sedaghat@cc.iut.ac.ir

چکیده

در این مقاله به پتانسیل‌سنجی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در یک سیستم ترکیبی پنل خورشیدی-توربین بادی-سیستم هیدروژنی، در شهر الیگودرز با استفاده از نرم‌افزار HOMER پرداخته شده است. ورودی‌های سرعت باد و تابش خورشید از نرم‌افزار RETSCREEN4 استخراج شده است. نتایج نشان می‌دهند هیچگونه توجیه اقتصادی در استفاده از این سیستم ترکیبی وجود ندارد که به این دلیل است که راندمان سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن کمتر از 50% است و از آنجایی‌که قدرت زیادی در سیستم هدر می‌رود، تولید انرژی توسط پنل‌های خورشیدی باید بسیار زیاد باشد تا بار الکتریکی مورد نیاز تامین گردد. همچنین هزینه‌ی اولیه الکترولیز و تانک هیدروژن بسیار زیاد است. از نتایج مشخص است که در سرعت‌های باد تا 7 متر بر ثانیه، میزان برقی که می‌توان با استفاده از سیستم ترکیبی توربین باد-پیل سوختی-پنل خورشیدی-الکترولایزر تولید کرد نسبت به توربین باد-پیل سوختی-الکترولایزر هزینه پایین‌تری دارد. با توجه به نتایج در صورت عدم استفاده از پنل‌های خورشیدی، هزینه‌ها تقریبا 2/5 برابر می‌شوند. درصد برق تولیدی توسط باد، خورشید و پیل سوختی در ماههای مختلف سال، سهم هر دستگاه در هزینه‌ها، میزان هزینه نیروگاههای مختلف و میزان آلاینده‌های تولیدی ناشی از پیل سوختی پارامترهای دیگری هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند.

کلمات کلیدی

الیگودرز، الکترولایزر، انرژی خورشید، پیل سوختی، تانک هیدروژن، HOMER.

1. مقدمه

امروزه گرم شدن روز افزون هوای کره زمین به خاطر اثرات منفی گازهای گلخانه‌ای، یکی از مسائل مهم است. استفاده از سوخت‌های فسیلی جهت تامین سوخت مورد نیاز نیروگاه‌ها علاوه بر تمام شدن سریع آن‌ها باعث افـزایش آلـودگی محـیط زیست می‌گردد[1]. عدم حضور شبکه سراسری برق در مناطق دورافتاده و هزینه‌ی بالای احداث خط انتقال جدیـد بـه دلیـل مسافت طولانی و عوارض نا مناسب جغرافیایی اغلب منجر به جستجوی راه‌حلی جایگزین میگردد .از طرف دیگر، افزایش نرخ مصرف انرژی برق و وجود تعداد زیادی مصرف کننده‌ی دور از هم یکی از بزرگترین مشکلات شرکتهای برق میباشـد. امـروزه سیستم ترکیبی مستقل به یکی از امید بخش‌ترین راه‌حل‌ها برای مرتفع کردن نیاز برق مناطق مختلف تبدیل شده است[2]. با توجه به ناپیوسته بودن انرژی تولیدی منابع تجدیدپذیر، در عمل ثابت شده است که استفاده از سیستمهای ترکیبی، میتوانـد راه حلی مناسب باشد .با ترکیب مناسب منابع میتوان به سیستم تولیدی مقرون به صرفه، پاک و مطمئن رسـید[3]. انتخـاب دیزل ژنراتور به مدت طولانی بهترین راه حل برای برق دار کردن مناطق دوردسـت در نظـر گرفتـه میشـد .امـا امـروزه بنـابر سیاستهای جهانی و نگرانیهای زیست محیطی تولید انرژی الکتریکی توسط منابع انرژی تجدیدپـذیر قـوت بیشـتری بـه خـود گرفته و به پرطرفدارترین راه حل تکنیکی دوستدار محیط زیست تبدیل شده است[4]. یکی از اساسی‌ترین نیازها در سیسـتم ترکیبی تضمین تداوم تغذیه با ذخیره‌ی انرژی اضافی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد .اگرچه تکنولـوژی بـاتری بـه سـطح نسبتاً مطلوبی رسیده است، با این حال اندازه، هزینه و در دسترس بودن، فاکتورهای محدود کننده‌ای برا ی کاربرد بـاتری در مناطق دوردست بشمار می‌آیند.دشارژ خودبخود باتری در مناطق سردسیر یکی دیگر از مشکلات اساسی میباشـد. پیشـرفتهای اخیر در عرصه‌ی تکنولوژی پیل سوختی و الکترولایزر زمینه جدیدی برای استفاده از هیدروژن به عنوان محیط ذخیره‌ی انرژی ایجاد کرده است. سیستم انرژی ترکیبی بر اساس چنین تکنولوژی‌های جایگزینی که بصورت موازی با منابع تجدیدپـذیر کـار میکنند میتواند راه‌حلی مناسب برای تولیدات کوچک باشد[5]. در این مقاله با بکارگیری نـرم‌افـزار HOMER تمـام بـرق مصرفی یک خانه در شهر الیگودرز با استفاده از انرژی باد و خورشید تأمین گردیده و در پایان مقایسه‌ای با هزینه بـرق تولیـدی از نیروگاه انجام شده است.

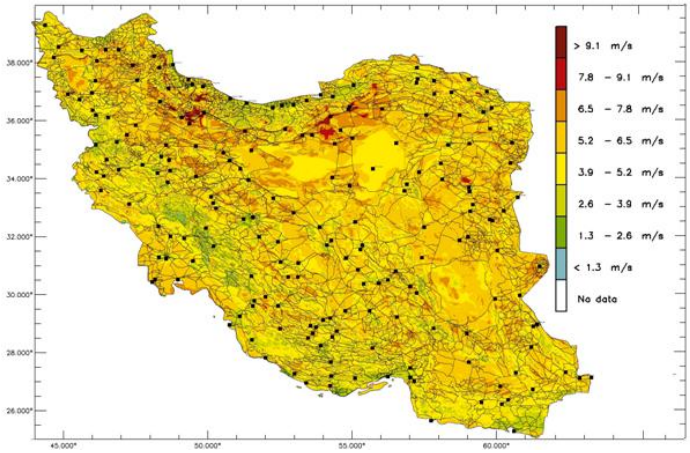
2. پتانسیل انرژی باد و خورشیدی در ایران

ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی و قرارگرفتن در یک منطقه کم‌فشار نسبت به مناطق پرفشار شمال و شمال غرب در زمستان و تابستان در مسیر بادهای زیادی قراردارد. ایران در آسیا بین شرق و غرب و نواحی گرم جنوب و معتدل شمالی واقع شده و در مسیر جریان‌های عمده هوایی بین آسیا، اروپا، آفریقا، اقیانوس‌اطلس و اقیانوس‌هند است. در شکل 1 شماتیکی از اطلس سرعت باد ایران در ارتفاع 60 متری نشان داده شده است[6]. میزان تابش خورشید در نقاط مختلف ایران بین 1800 تا 2200 کیلووات ساعت بر مترمربع در سال تخمین زده شده می‌شود که بالاتر از میزان متوسط جهانی می‌باشد. این پتانسیل انرژی خورشید، زمینه مناسبی جهت استفاده از تجهیزات وابسته به این انرژی در بسیاری از نقاط کشور فراهم نموده است. نمودار متوسط تابش سالیانه خورشید در نقاط مختلف ایران نیز در شکل 2 ارائه شده است[7].

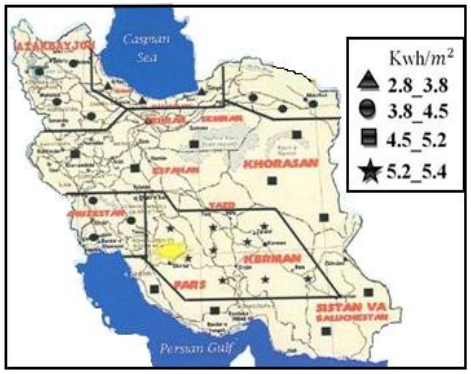
3. منطقه و ایستگاه مورد مطالعه

استان لرستان یکی از استان‌های غربی ایران است. این استان 28294 کیلومتر مربع مساحت دارد و در سرشماری سال 1385، جمعیت آن 1716527 نفر گزارش شده‌است. این استان سیزدهمین استان ایران از نظر جمعیت می‌باشد. خرم‌آباد مرکز استان است. شهرستان الیگودرز یکی از شهرستان‌های استان لرستان است. مرکز این شهرستان، شهر الیگودرز است. جمعیت این

شهرستان 145000 نفر و وسعت آن 5870 کیلومتر مربع است. الیگودرز دارای طول وعرض جغرافیایی 49 درجه و 42 دقیقه و عرض جغرافیایی 33 درجه و23 دقیقه است. ارتفاع این شهر از سطح دریا 1998 متر است[8]. موقعیت منطقه مورد بررسی و تقسیمات آن در شکل‌های 3 و 4 آمده است[8].



شکل 1: اطلس باد ایران در ارتفاع 60 متری



شکل2: متوسط تابش سالیانه خورشید در ایران

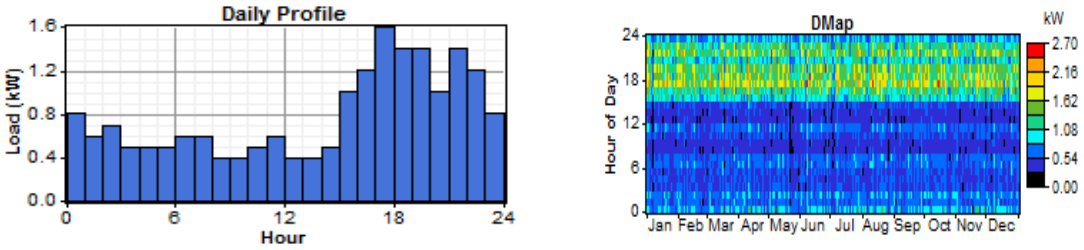
شکل 3: موقعیت استان لرستان در کشور

شکل 4: موقعیت الیگودرز در استان لرستان

4. مدلسازی توسط نرم افزار

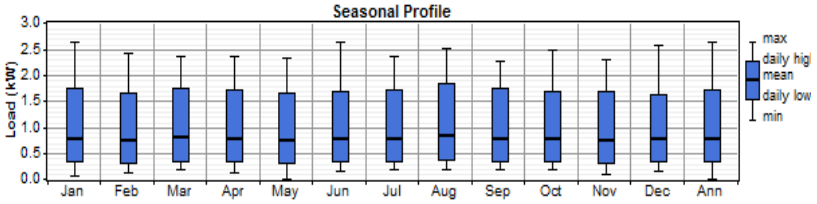
داده‌های وارد شده به نرم‌افزار HOMER مصرف برق در یک روز از سال 1391 یک منزل مسکونی می‌باشد که پروفایل

آن به‌صورت زیر می‌باشد. نرم افزار قادر است مصرف برق در روزهای دیگر سال را تخمین بزند.



شکل5: پروفایل بار مصرفی

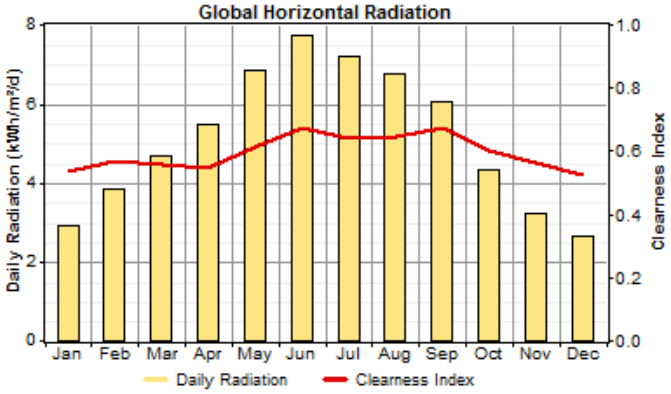
همانطور که در شکل سمت راست قابل مشاهده می‌باشد، پیک مصرفی قسمت زرد رنگ شکل می‌باشد و شکل سمت چپ نشان‌دهنده برق مصرفی در یک روز می‌باشد. میزان بار مصرفی در ماه‌های دیگر به صورت شکل زیر است که نرم‌افزار با تخمین مطلوبی و در نظر گرفتن شرایط آب و هوایی و فصول به دست می‌آورد.



شکل 6: پروفایل برق مصرفی در ماههای مختلف سال

4.1.تابش و شدت خورشید در منطقه

از آن‌جایی که سیستم طراحی شده خورشیدی خواهد بود، لازم است میزان شدت نور در منطقه در طی فصول بررسی شود. از آن‌جایی‌که داده‌های انرژی خورشیدی شهر الیگودرز در دسترس نبود، از این‌رو با توجه به موقعیت محل از داده‌های خورشیدی شهر خرم‌آباد با مختصات عرض جغرافیایی 33/5 و طول جغرافیایی 48/4 استفاده شده است. میانگین ماهیانه شدت تابش نور خورشید از نرم‌افزار RETSCREEN به صورت شکل زیر به دست می‌آید.

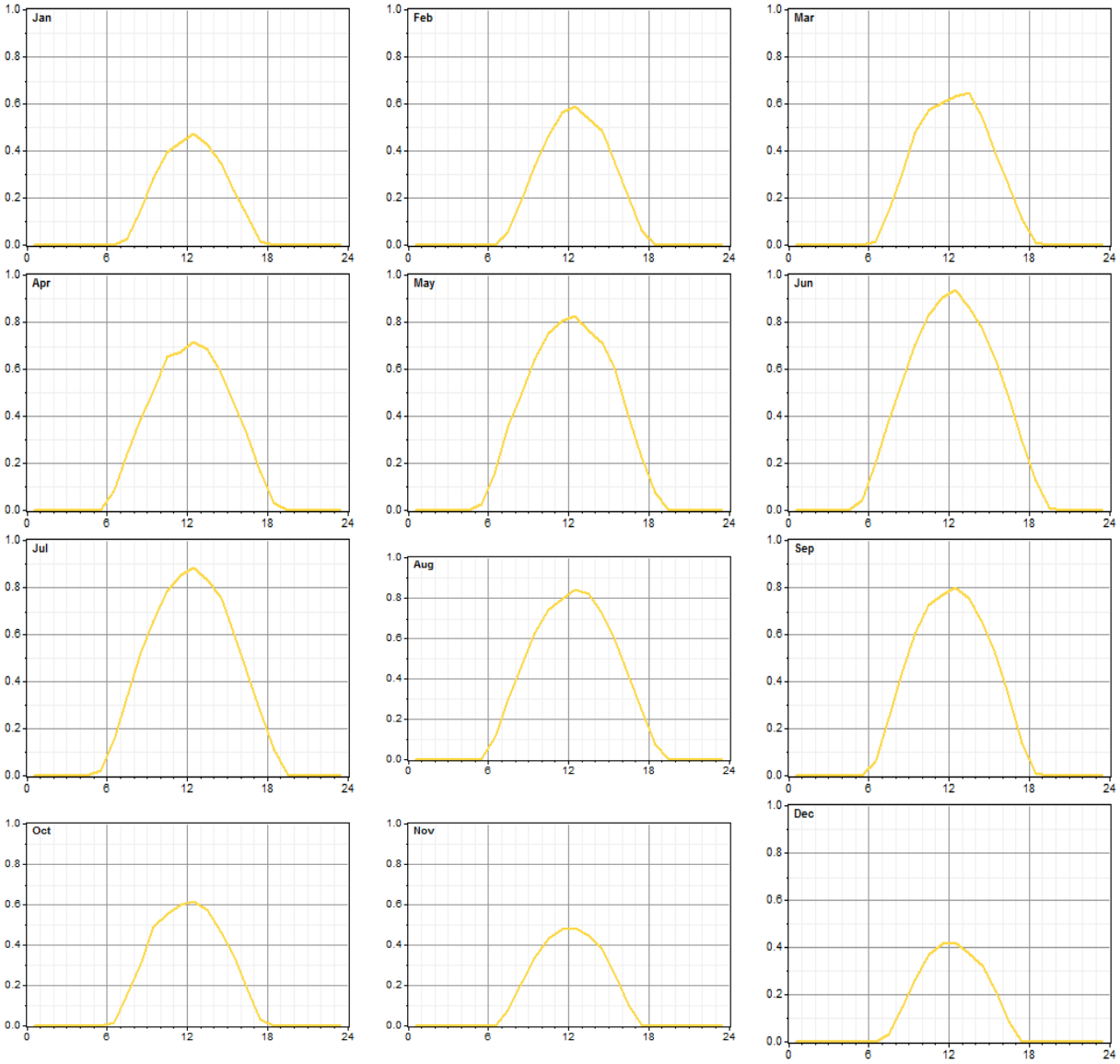


شکل 7: پروفیل تابش خورشید در یک سال

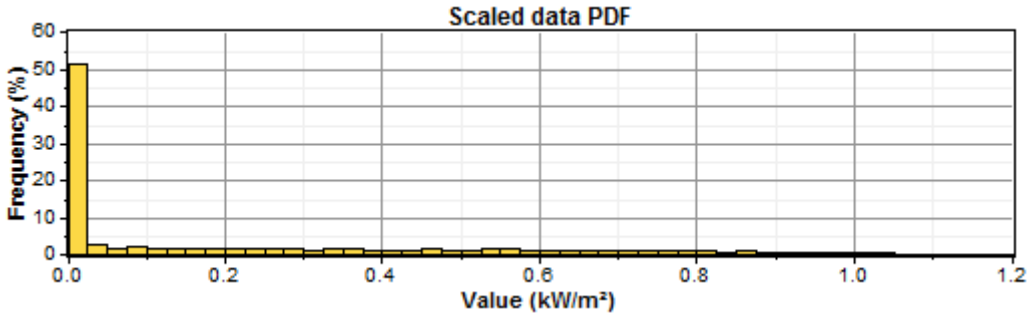
با وارد کردن میانگین سالانه تابش خورشید در نرم‌افزار HOMER، با توجه به ارتفاع محل سایت مورد بررسی شاخصی به نام

شاخص شفافیت معرفی میشود که یک معیار برای صاف بودن آسمان است. این شاخص برابر کسری از انرژی خورشید است که از اتمسفر عبور کرده و به سطح زمین می‌رسد. این ضریب در نرم‌افزار به‌صورت ماهیانه محاسبه می‌شود و در یک ماه بسیار آفتابی برابر 0/75 و در یک ماه بسیار ابری برابر 0/25 است. برای شهر خرم آباد همانطور که در شکل 7 مشخص است، شاخص شفافیت بین 0/52 تا 0/67 است.

پروفایل تابش خورشید در هر ماه در طول 24 ساعت، در طول یک سال به‌صورت شکل 8 می‌باشد. میانگین تابش در این منطقه در طول سال برابر 5/15 کیلووات ساعت بر متر مربع در یک روز می‌باشد. همچنین تابع توزیع تجمعی تابش خورشید در شکل 9 نشان داده شده است. نتایج نشان‌دهنده این است که بیش از 50% تابش کمتر از 0/1 کیلووات بر متر مربع می‌باشد.



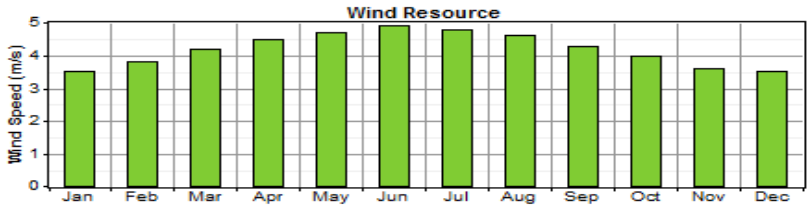
شکل 8: پروفایل تابش خورشید در هر ماه



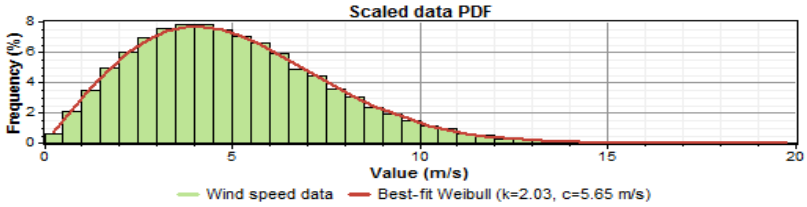
شکل 9: تابع توزیع تجمعی تابش خورشید

4.2. شدت وزش باد در منطقه

از آن‌جایی که سیستم طراحی شده بادی خواهد بود، لازم است سرعت باد منطقه در طی فصول بررسی شود. از آن‌جایی که داده‌های انرژی باد شهر الیگودرز در دسترس نبود، از این‌رو با توجه به موقعیت محل از داده‌های بادی شهر خرم‌آباد با مختصات عرض جغرافیایی 33/5 و طول جغرافیایی 48/4 استفاده شده است. نمودار میزان متوسط باد در ارتفاع 10 متری از ارتفاع زمین از نرم‌افزار RETSCREEN4 استخراج شده و به صورت شکل 10 است. همچنین تابع توزیع تجمعی سرعت باد که نشاندهنده‌ی درصد فراوانی هر مقدار سرعت باد است، در شکل 11 نشان داده شده است.



شکل 10: میزان متوسط وزش باد در ماههای مختلف سال



شکل 11: تابع توزیع تجمعی سرعت باد

4.3. پنل خورشیدی

هزینه نصب پنل‌های خورشیدی می‌تواند از $6 تا $10 به‌ازای هر کیلووات تغییر کند[9-10]. پنل خورشیدی انتخاب شده دارای هزینه اولیه 6900 دلار، هزینه جایگزینی 6900 دلار و هزینه تعمیر و نگهداری صفر دلار به ازای هر سال می‌باشد. عمر پنل خورشیدی 25 سال و فاقد سیستم ردیاب خورشید می‌باشد و منحنی ارزشی آن به صورت شکل 12 است.

4.4. پیل سوختی

هزینه‌ی پیل سوختی بسته به نوع تکنولوژی ، تجهیزات جانبی و مبدل توان آن به شدت تغییر میکند. در حال حاضر هزینه پیل سوختی از $3000 تا$6000 متفاوت است[9]. با این‌وجود تحقیقات جاری در زمینه‌ی خودروهای برقی میتواند

نویدبخش کاهش هزینه 195 تا 325 دلار به‌ازائ هر کیلووات است. پیل‌سوختی انتخاب شده دارای هزینه اولیه 2500 دلار، هزینه جایگزینی 2500 دلار و هزینه تعمیر و نگهداری 0/1 دلار به ازای هر ساعت می‌باشد. عمر پیل‌سوختی 40000 ساعت و منحنی ارزشی آن به صورت شکل 13 است.

4.5. الکترولایزر

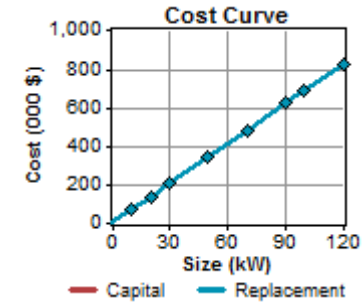
در حال حاضر هزینه‌ی الکترولایزر بین 1500 تا 3000 دلار به ازائ یک کیلووات می‌باشد[۹،11]. با پیشرفت‌های موجود در زمینه تکنولوژی پلیمر، سیستمهای کنترلی و الکترونیک قدرت انتظار میرود که در 10 سال آینده هزینه‌ها کاهش بیشتری پیدا کند[9]. الکترولایزر انتخاب شده دارای هزینه اولیه 1500 دلار، هزینه جایگزینی 1500 دلار و هزینه تعمیر و نگهداری صفر دلار به ازای هر سال می‌باشد. عمر الکترولایزر 15 سال، راندمان آن 85% و منحنی ارزشی آن به صورت شکل 14 است.

4.6. تانک هیدروژن

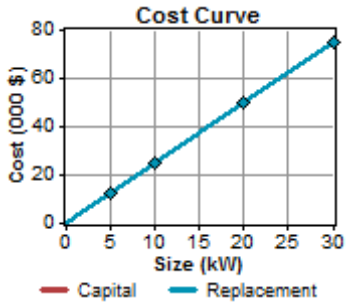
تانک هیدروژن انتخاب شده دارای هزینه اولیه 1200 دلار، هزینه جایگزینی 1200 دلار و هزینه تعمیر و نگهداری صفر دلار به ازای هر سال می‌باشد. عمر تانک هیدروژن 25 سال و منحنی ارزشی آن به صورت شکل 15 است.

4.7. توربین باد

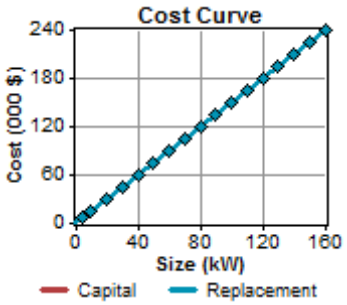
توربین باد مورد استفاده مدل BWC XL12 با قدرت 1/24 کیلو وات و جریان مستقیم می‌باشد. هزینه اولیه و جایگزینی آن 3900 دلار و سالانه 100 دلار هزینه دارد. عمر توربین 25 سال و در ارتفاع 10 متری از سطح زمین قرار دارد و منحنی ارزشی آن به صورت شکل 16 است.



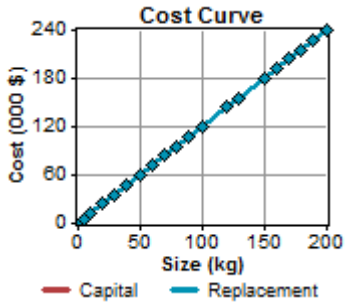
شکل12: منحنی ارزشی پنل خورشیدی



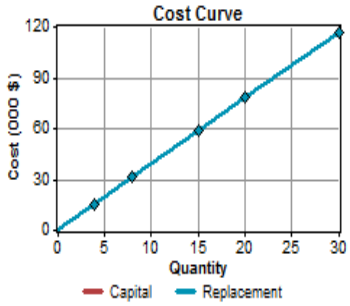
شکل13: منحنی ارزشی پیل‌سوختی



شکل 14: منحنی ارزشی الکترولایزر

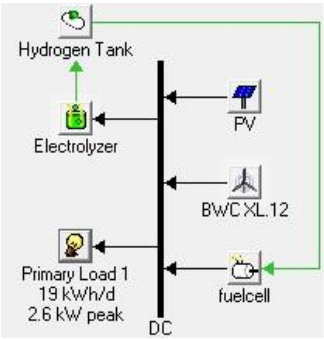


شکل 15: منحنی ارزشی تانک هیدروژن



شکل 16: منحنی ارزشی توربین باد

در شکل زیر شماتیکی از نیروگاه طراحی شده که در نرم‌افزار HOMER مورد بررسی قرار گرفته است، نشان داده شده است.



شکل 17: شماتیکی از نیروگاه طراحی شده

5. نتایج

نتایج به دست امده به صورت شکل 18 می‌باشد. همانطور که در شکل قابل رویت است باید از 10 پنل خورشیدی، 20 توربین باد، 10 عدد پیل سوختی، 25 عدد الکترولایزر و 5 عدد تانک هیدروژن استفاده نماییم که هزینه‌ی 234843 دلاری دارد. محاسبات قیمت برق شبکه شهری به این صورت می‌باشد که در مدت 68 روز، برق مصرفی منزل مسکونی مورد نظر 1283 کیلوات ساعت بوده که 121000 تومان هزینه آن شده است. با در نظر گرفتن سالانه 10 درصد در افزایش قیمت برق در طی 25 سال کل مبلغ به صورت جدول 1 می‌باشد.

Wind Speed (m/s) 7 Max. Annual Capacity Shortage (%) 10

Double click on a system below for simulation results.

PV (kW)	XL1	f.cel (kW)	Elec. (kW)	H2 Tank (kg)	Disp. Strgy	Initial Capital	Operating Cost ($/yr)	Total NPC	COE ($/kWh)	Ren. Frac.	Capacity Shortage	f.cel (hrs)
10	20	10	25	5	CC	$ 215,500	3,910	$ 234,843	7.367	1.00	0.08	1,408
	30	10	25	25	CC	$ 209,500	5,573	$ 237,075	7.202	1.00	0.04	1,996
100		10	100	100	CC	$ 985,000	7,472	$ 1,021,967	30.233	1.00	0.00	4,448

شکل18: نتایج نرم‌افزار

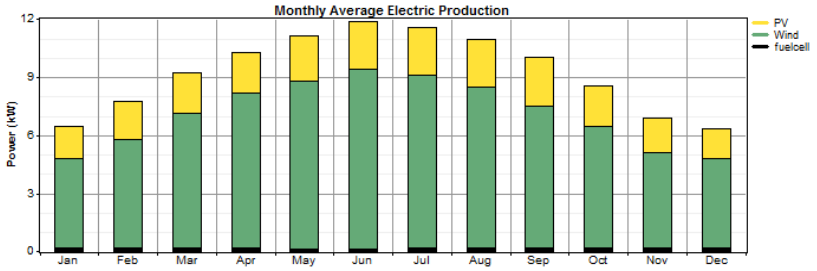
جدول 1: قیمت برق در طی 25 سال

هزینه برق(تومان)	سال	هزینه برق(تومان)	سال
2241290	چهاردهم	649222	اول
2465419	پانزدهم	714144	دوم
2711961	شانزدهم	785558	سوم
2983157	هفدهم	864114	چهارم
3281473	هیجدهم	950526	پنجم
3609620	نوزدهم	1045578	ششم
3970583	بیستم	1150136	هفتم
4367641	بیست و یکم	1265150	هشتم
4804405	بیست و دوم	1391665	نهم
5284845	بیست و سوم	1530831	دهم

5813330	بیست و چهارم	1683914	یازدهم
6394663	بیست و پنجم	1852306	دوازدهم
63849037	جمع کل	2037536	سیزدهم

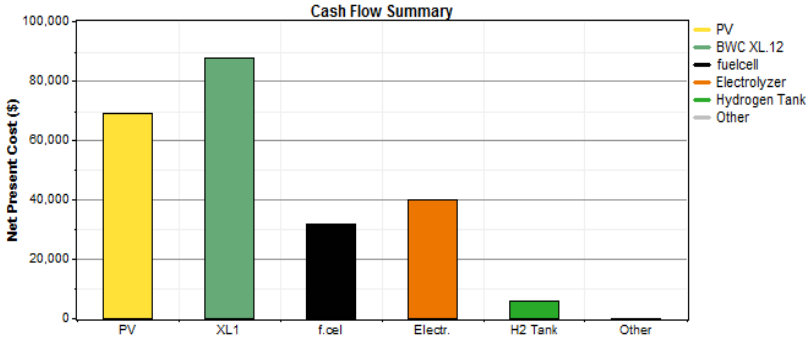
همانگونه که از جدول 1 قابل مشاهده است، مجموع هزینه‌ها در این 25 سال 63849037 تومان می‌باشد. البته دلار نیز طی 25 سال رشد خواهد داشت. اگر متوسط نرخ دلار در این 25 سال 1900 در نظر گرفته شود، مبلغ 446201700 تومان بدست خواهد آمد. همانگونه که نتایج نشان می‌دهند هیچگونه توجیه اقتصادی در استفاده از این سیستم ترکیبی وجود ندارد که به این دلیل است که راندمان سیستم ذخیره‌سازی هیدروژن کمتر از 50% است و از آنجایی‌که قدرت زیادی در سیستم هدر می‌رود، تولید انرژی توسط پنل‌های خورشیدی باید بسیار زیاد باشد تا بار الکتریکی مورد نیاز تامین گردد. به‌طور مثال اگر بار الکتریکی میانگین 8/3 کیلووات باشد، پنل‌های خورشیدی باید 80 کیلووات تولید کنند. در نتیجه هزینه‌ی انرژی بسیار زیاد است. همچنین هزینه‌ی اولیه الکترولیز و تانک هیدروژن بسیار زیاد است.

در شکل 19سهم باد، خورشید و پیل سوختی در تامین برق مصرفی نشان داده شده است. با توجه به اینکه مقدار متوسط سرعت باد و تابش خورشید در ماه‌های مختلف متفاوت است، سهم برق تولیدی نیز از این طریق تغییر می‌کند.

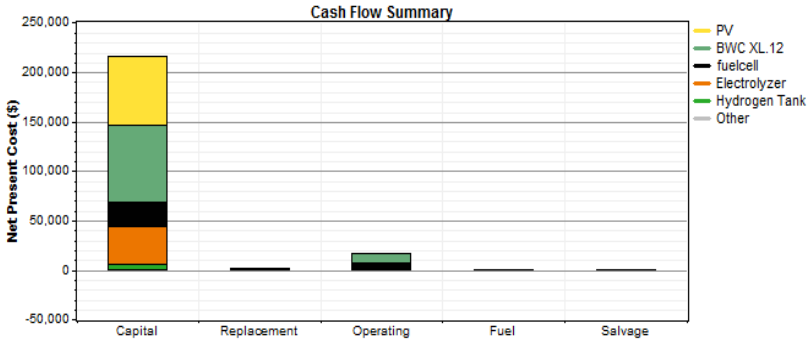


شکل 19: میزان برق تولیدی توسط باد و ژنراتور در ماههای مختلف سال

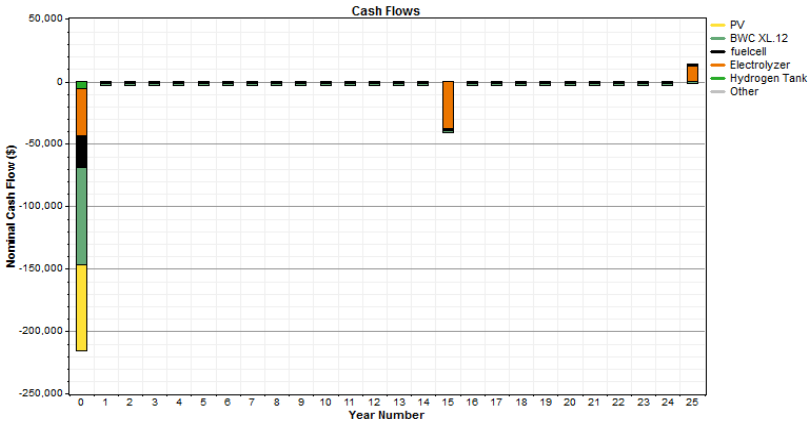
در شکل 20 سهم هر دستگاه در میزان هزینه‌ای که برای تاسیس و نگهداری نیروگاه برای ما در طی 25 سال دارد، نشان داده شده است. همانطور که مشخص است توربین باد با هزینه‌ای حدود 87895 دلاری تقریبا 38% از هزینه‌ها را شامل می‌شود و پنل خورشیدی با هزینه‌ای حدود 69000 دلاری تقریبا 30% از هزینه‌ها را شامل می‌شود. شکل 21 نشان می‌دهد که هزینه اولیه در حدود 215500 دلار است. البته هزینه عملیاتی نیز بسیار زیاد می‌باشد. همچنین شکل 22 سهم هر بخش در هزینه ها در سال های مختلف نشان می‌دهد.



شکل 20: سهم هر دستگاه در هزینه‌ها

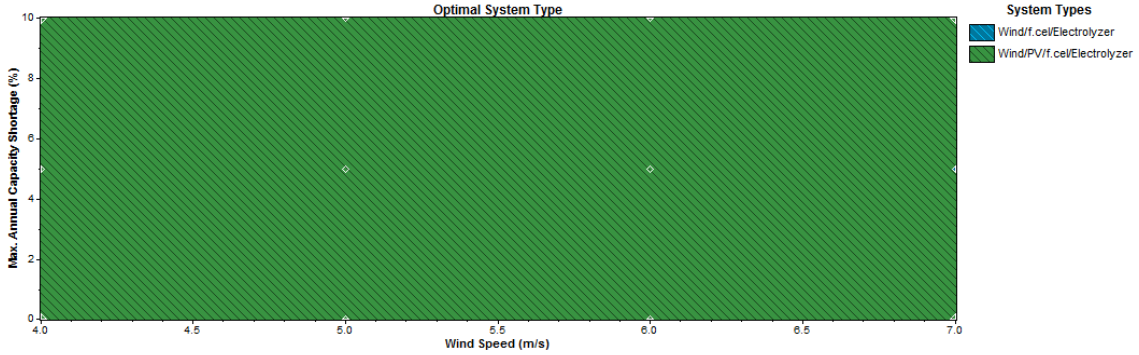


شکل 21: سهم هر بخش در هزینه ها

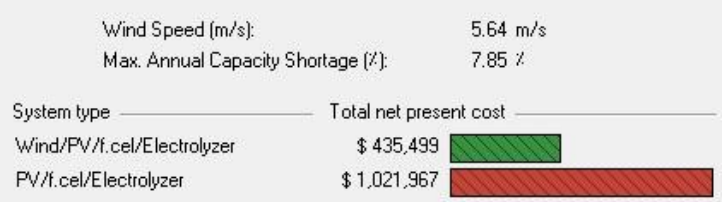


شکل 22: سهم هر بخش در هزینه ها در سال های مختلف

شکل 23 نشان می‌دهد که در سرعت‌های باد تا 7 متر بر ثانیه، میزان برقی که می‌توان با استفاده از سیستم ترکیبی توربین باد-پیل سوختی-پنل خورشیدی-الکترولایزر تولید کرد نسبت به توربین باد-پیل سوختی-الکترولایزر هزینه پایین‌تری دارد. شکل 24 میزان هزینه نیروگاههای مختلف در سرعت 5/64 متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. از این شکل مشخص است که در صورت عدم استفاده از پنل‌های خورشیدی، هزینه‌ها تقریبا 2/5 برابر می‌شوند.



شکل 23: هزینه بر حسب سرعت باد



شکل 24: میزان هزینه نیروگاههای مختلف

از جدول 2 مشاهده می‌شود که مقداری آلاینده نیز به دلیل استفاده از پیل سوختی وجود خواهد داشت که سهم اکسیدهای نیتروژن بسیار زیاد است، با توجه به اینکه هدف ما از ایجاد این نیروگاه عدم تولید آلاینده بود.

جدول 2: میزان آلاینده‌ها

نوع آلاینده ها	میزان الاینده ها(کیلوگرم بر سال)
دی‌اکسید کربن	-9/13
مونواکسید کربن	5/81
هیدروکربن نسوخته	0/644
ذرات	0/438
دی اکسید سولفور	0
اکسیدهای نیتروژن	51/9

6. جمع‌بندی

در این مقاله به پتانسیل‌سنجی استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بادی و خورشیدی در شهر الیگودرز با استفاده از نرم‌افزار HOMER پرداخته شده است. نتایج نشان داد استفاده از این سیستم ترکیبی در مقایسه با برق تولیدی توسط نیروگاه توجیه اقتصادی ندارد. میزان برق تولیدی توسط باد، خورشید و پیل سوختی در ماههای مختلف سال، سهم هر دستگاه در هزینه‌ها، میزان هزینه نیروگاههای مختلف و میزان آلاینده‌های تولیدی ناشی از پیل سوختی پارامترهای دیگری هستند که در این مقاله مورد بررسی قرار گرفتند.

7. منابع و مراجع

[1] سماعی، م.، صادقی، ح.، بررسی عملکرد و بهبود توربین‌های بادی کلاسیک، چهارمین کنفرانس سراسری روستا و انرژی، چابهار،

.1379

[2] Francois Giraund, and Zyiad M.Salameh, "Steady state performance of a grid-connected rooftop hybrid wind-photovoltaic power system with battery storage", IEEE transactions on energy conversion, vol. 16, NO. 1, March 2001.

[3] Lingfeng Wang and Chanan Singh, "PSO Based Multi-Criteria Optimum Design of A Grid-Connected Hybrid Power System with Multiple Renewable Sources of Energy", Proceedings of the 2007 IEEE Swarm Intelligence Symposium (SIS) 2007.

[4] S. Diaf, G. Notton, M. Belhamel, M. Haddadi A. Louche, "Design and techno-economical optimization for hybrid PV/wind system under various metrological conditions", Applied Energy 85 (2008) 968-987.

[5] Mann MK. Economics of renewable hydrogen it's about more than production. Renewable hydrogen energy forum, Washington, DC; April 10–11, 2003

[6] گندمکار، ا.، ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران، بیست و یکمین کنفرانس بین‌المللی برق، 1387.

[7] اطلاعات پتانسیل انرژی خورشیدی در ایران، انجمن صنایع انرژی خورشیدی ایران، *www.irseia.com*

[8] http://fa.wikipedia.org/wiki

[9] Cotrell J., Modeling the feasibility of using fuel cells and hydrogen internal combustion engines in remote renewable energy systems, National Renewable Energy Laboratory. URL: http://www.osti.gov/bridge

[10] Siemens Solar Panels, BULLNET, Unit D, Henfield Business Park, Henfield, Sussex, BN5 9SL.URL:http://www.siemenssolar.co.uk/index.htm

[11] Proton Energy Systems, 10 Technology Drive Wallingford, CT06492, URL:http://www.protonenergy.com/