



بررسی اقتصادی و بهینه سازی سیستم هیبرید تولید انرژی مستقل از شبکه شامل پیل سوختی

امین اکبری، پویا غنی و رسول کاظم زاده

سازي تلاش شده است تا از همه روش های ممکن استفاده شود تا بتوان در جاهای مختلف نسبت به امکانات موجود مقرون به صرفه ترین این منابع انرژی را انتخاب کرد.

2- سیستم مورد مطالعه

از واحدهای سلول خورشیدی¹ (PV) و ژنراتورهای بادی² (WG) در تغذیه بار مناطق دور افتاده به طور گسترده ای استفاده می شود. با توجه به اینکه مشخصه این سیستمها تقریباً مکمل یکدیگر می باشند به اینصورت که سلول خورشیدی در طول روز انرژی تولید می کند و توربین بادی در طول شب که سرعت باد بیشتر است تولید انرژی عمده ای دارد، معمولاً بصورت ترکیبی (هیبرید) با یکدیگر بکار می روند. خروجی واحدها به یک باس بار DC مشترک متصل می شوند. تعدادی باتری شارژر به این باسبار متصل می باشند که وظیفه آنها شارژ باتریهای بکار رفته به عنوان سیستم ذخیره ساز است. تعداد شارژرها معمولاً با توجه به توان نامی آنها و با در نظر گرفتن ملاحظات مربوط به افزونگی سیستم تعیین میگردند. تکنولوژی مورد استفاده در شارژرها معمولاً برای استحصال بیشینه توان ممکن از سلولها و توربینها است. باتریها که معمولاً از نوع سرب-اسید هستند، مازاد انرژی سیستم را در خود ذخیره کرده و در زمان مقتضی، مانند کاهش سرعت باد یا تابش و یا پیک مصرف، آنرا بار دیگر در کوتاه مدت به سیستم باز می گرداند اما برای ذخیره بیشتر انرژی در چنین

چکیده - در این مقاله به بررسی اقتصادی و یافتن سیستم تولید انرژی بهینه از نظر قیمت تمام شده برق تولیدی، جهت مناطق دور از شبکه برق سراسری پرداخته شده است. سیستم مورد بررسی شامل منابع انرژی نو به صورت ترکیبی (هیبرید) از ژنراتور بادی، سلول خورشیدی، ژنراتور بیوگاز سوز و پیل سوختی برای تولید برق در 24 ساعت روز برای بار محلی به دور از شبکه برق در نظر گرفته شده است. آنالیزها و شبیه سازی ها در نرم افزار HOMER صورت گرفته است

واژه های کلیدی انرژی های نو، شبکه، هیبرید، ژنراتور بیوگاز سوز.

1- مقدمه

در این تحقیق به بررسی تامین اقتصادی بار یک مجموعه مستقل و دور از شبکه برق پرداخته شده است. این مجموعه می تواند یک واحد مسکونی یا یک ایستگاه تلویزیونی باشد. سیستم تولید برق باید به صورت Stand Alone (مستقل از شبکه) قادر به تامین بار در طول سال باشد. هدف از این بررسی یافتن نوع مولدها و سائز مناسب آنها برای دستیابی به اقتصادی ترین بهای برق تولیدی می باشد. عمر سیستم تولید انرژی 20 سال در نظر گرفته شده است. هزینه ها شامل هزینه سرمایه گذاری و هزینه بهره برداری و تعمیر و نگهداری سیستم تولید انرژی بوده و قیمت های موجود همگی واقعی و تجهیزات مورد استفاده نیز همگی از نظر تجاری در دسترس می باشند. داده های بادسنجی و تابش مورد استفاده مربوط به منطقه Montana از کشور آمریکا می باشد [9]. بهینه سازی بوسیله ی نرم افزار HOMER انجام شده است در این شبیه

¹ - Photovoltaic

² - Wind Generator

امین اکبری، دانشگاه صنعتی سهند amin.akbari@gmail.com
پویا غنی، دانشگاه صنعتی سهند Pgkntu@gmail.com
رسول کاظم زاده، دانشگاه صنعتی سهند r.kazemzadeh@sut.ac.ir

متان است که سهم بیشتر این گاز یعنی 60 تا 70 درصد آن را شامل می شود. دمای احتراق بیوگاز حدود 700 درجه سانتیگراد (دمای احتراق گازوئیل 350 درجه سانتیگراد و نفت و پروپان 500 درجه سانتیگراد) و دمای شعله حاصل از آن 870 درجه سانتیگراد است. بیوگاز مانند سایر سوخت های گاز قابل احتراق بوده و با نسبت 1-20 با هوا مخلوط شده و سرعت اشتعال آن بالا می باشد. ارزش حرارتی آن در حدود 6 کیلووات ساعت بر مترمکعب است (یعنی برابر ارزش حرارتی نیم لیتر سوخت گازوئیل) ارزش حرارتی متان خالص در حدود 9000 کیلو کالری بر متر مکعب می باشد [5] که در قیاس با سایر مواد سوختی، رقم قابل توجهی است. از مزیت های مهم متان به دیگر سوخت ها این است که هنگام سوختن، گاز سمی و خطرناک منواکسید کربن تولید نمی کند؛ بنابراین از آن می توان به عنوان سوخت ایمن و سالم در محیط خانه استفاده کرد. تجزیه و تبدیل فضولات و مواد گندیده آلی که می تواند محصول حیوانات اهلی و یا گیاهان باشد، به وسیله باکتری ها در دو مرحله به بیوگاز و بیوماس تبدیل می شود. از بیوگاز برای تولید برق، و از بیوماس هم به عنوان کود آلی می توان بهره برد. در مرحله نخست این واکنش بیولوژیک، باکتری های بی هوازی مواد آلی گندیده را، به اسیدهای آلی تبدیل می کنند. در مرحله دوم، گروه دیگری از باکتری ها اسیدهای آلی به وجود آمده را تجزیه می کنند، که در نتیجه آن بیوگاز که بخش عمده آن متان است، تولید می شود. در مناطق روستایی هر خا نوار می تواند، به طور انفرادی یک دستگاه بیوگاز داشته باشد، و یا چند خا نوار ساکن در کنار هم می توانند به طور اشتراکی یک دستگاه بیوگاز بسازند. براساس محاسبات انجام شده، کود حاصل از سه راس گاو و یا چند راس گوسفند، پاسخگوی تولید گاز مصرفی هر خانوار در طول سال است [4].

سیستمی می توان از پیل سوختی نیز استفاده کرد. یک مبدل DC/AC نیز پل ارتباطی AC مصرفی می باشد. انرژی تولیدی WG ها و PV ها از طریق مبدل به مصرف کننده منتقل می گردد. مزاد انرژی موجود نیز در اختیار بانک باتری و الکتروایزر برای تولید هیدروژن قرار می گیرد تا در موقع نیاز از هیدروژن برق تولید شود. هیدروژن در طبیعت به وفور در اشکال مختلف یافت می شود ولی چون به صورت عنصر تنها نمی ماند پس از آن نمی توان به عنوان منبع انرژی استفاده کرد یعنی ما ابتدا باید با صرف انرژی هیدروژن را تولید و بعنوان ذخیره کننده انرژی از آن استفاده کنیم. با پیشرفت تکنولوژی و کاهش قیمت پیل سوختی از آنها می توان به عنوان منبع ایده آل برای ذخیره انرژی استفاده کرد و چون هیدروژن گاز بیست سبک و غیر سمی می توان آن را به راحتی ذخیره و جابجا کرد.

هیدروژن را از طرق مختلفی می توان تولید کرد که به صورت عمده می توان از الکترولیز آب یعنی با استفاده از انرژی الکتریکی آب را به دو عنصر هیدروژن و اکسیژن تجزیه نمود و یا توسط روشهای ترموشیمیایی با استفاده از یک منبع حرارت و طی یک سری از واکنشهای شیمیایی تولید کرد [10]. به علت مشخصه منقطع وزش باد و تابش آفتاب، مهمترین مساله در طراحی اینگونه سیستمها تامین مطمئن بار تحت شرایط جوی متفاوت، با توجه به هزینه های مربوطه است. متغیرهای دیگری از جمله ارتفاع نصب توربین، زاویه پنلها و نوع باتری شارژر نیز مطرح است. بهترین ارتفاع نصب در بیشتر موارد حداکثر ارتفاع ممکن است. از طرفی، می توان زاویه نصب پنلها نیز با توجه به عرض جغرافیایی سایت مورد مطالعه را بگونه ای محاسبه نمود که بیشترین میزان انرژی تابشی ممکن را در طول سال دریافت نمایند.

در این بررسی همچنین امکان استفاده از ژنراتور بیو گاز در باس بار AC نیز لحاظ شده است. استفاده از ژنراتور بیو گاز در مواردی که شرایط جوی مناسب وجود نداشته باشد امری ضروری می باشد. در سال های اخیر به دلیل مشکلات ناشی از وابستگی گسترده به نفت، و محدودیت منابع تجاری انرژی، به استفاده از بیوگاز بیشتر توجه شده است. بیوگاز بر اثر واکنش های تجزیه ای بی هوازی میکروارگانیسم های زنده، در محیطی که مواد آلی وجود دارد، تولید می شود. بیوگاز مخلوطی از سه ترکیب به نام های متان، دی اکسید کربن و سولفید هیدروژن است. ترکیب عمده و قابل اشتعال بیوگاز

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 بهره ای که کار کاربر وارد می کند، نرخ بهره واقعی (i) است که طبق رابطه زیر محاسبه می شود. i' نرخ بهره نامی و f نرخ بهره تورم است. [1]

$$(1) \quad i = \frac{i' - f}{1 + f}$$

هزینه کلی شبکه (NPC) خروجی اصلی اقتصادی نرم افزار HOMER می باشد. NPC طبق رابطه (2) محاسبه می شود.

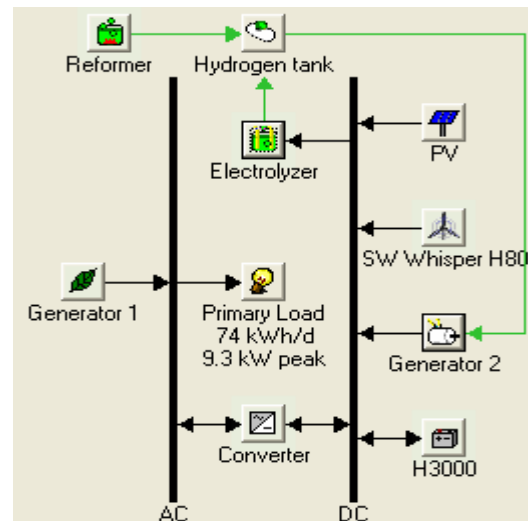
$$C_{NPC} = \frac{C_{ann,tot}}{CRF(i, R_{pro})} \quad (2)$$

که در آن $C_{ann,tot}$ هزینه سالیانه کلی، $CRF()$ فاکتور بازگشت سرمایه، R_{pro} طول عمر پروژه، i نرخ بهره واقعی می باشد. فاکتور بازگشت سرمایه طبق رابطه (3) قابل محاسبه است. که در آن N تعداد سال ها است.

$$CRF(i, N) = \frac{i(1+i)^N}{(1+i)^N - 1} \quad (3)$$

در فرایند شبیه سازی HOMER تمام حالات ممکن (غیر از حالات غیر قابل تحقق) را شبیه سازی می کند و سپس آنها را طبق NPC مرتب می کند و در نهایت آرایش قابل تحقق توسط کمترین NPC را بعنوان آرایش بهینه معرفی می کند [8].

اقتصاد مهمترین پارامتر تأثیر گذار در فرایند شبیه سازی و بهینه سازی HOMER است. منابع انرژی فسیلی و تجدیدپذیر دارای مشخصه های اقتصادی متفاوتی هستند. منابع انرژی تجدیدپذیر دارای هزینه اولیه بالا و هزینه بهره برداری پایین هستند در حالی که منابع انرژی تجدیدناپذیر متداول دارای هزینه اولیه پایین و هزینه بهره برداری بالا هستند. در فرایند بهینه سازی HOMER، آرایشهای متفاوت از سیستم را که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر هستند را از نظر اقتصادی بررسی می کند. این مقایسه باید هزینه های اولیه و بهره برداری را در نظر بگیرد. تحلیل هزینه چرخه عمر این سیستم را با لحاظ نمودن تمام هزینه هایی که در بازه فعالیت رخ می دهد، انجام می دهند. در این بررسی تغذیه یک بار خانگی مد نظر است. بار روزانه متوسط 7.4Kwh



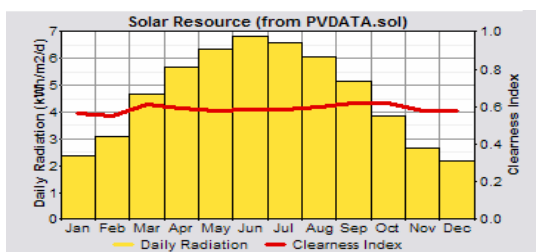
شکل 1: بلوک دیاگرام سیستم مورد بررسی در نرم افزار HOMER

این میزان تولید گاز، حدود 500 لیتر به ازای هر کیلوگرم فضولات تجزیه شده است. بلوک دیاگرام سیستم مورد بررسی در نرم افزار HOMER در شکل 1 نشان داده شده است. در این شکل، PV سلول خورشیدی، Primary Load بار، Generator 1 ژنراتور بیوگاز، SW Whisper H80 ژنراتور بادی، Electrolyzer، Reformer، Hydrogen tank، بدست آوردن هیدروژن و Generator 2 برای تولید برق از هیدروژن و Converter مبدل می باشند.

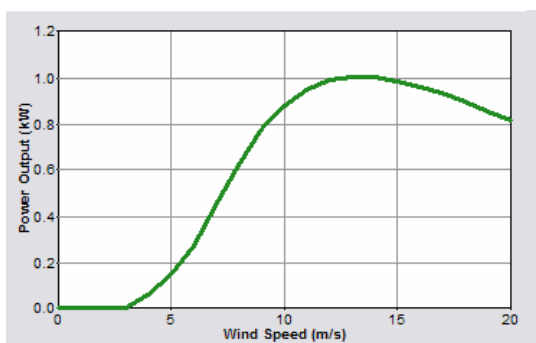
3- پارامترهای سیستم مورد مطالعه

در فرایند بهینه سازی، HOMER تمام آرایشهای مختلف تأمین قدرت که محدودیتهای تکنیکی را ارضا می کند جهت دستیابی به اقتصادی ترین حالت برای هزینه چرخه عمر، جستجو می کند [1]. نرم افزار در مدل سازی طبق گامهای یک ساعته میزان انرژی منابع را محاسبه می کند و برای بیشتر انواع سیستمهای انرژی کوچک، خصوصاً آنهایی که شامل منابع انرژی تجدیدپذیر متناوب هستند، گامهای یک ساعته برای تحلیل، مقیاس دقیقی به نظر می رسد. نرم افزار HOMER از معادله هزینه شبکه (NPC)³ برای هزینه چرخه عمر استفاده می کند که شامل هزینه های تأسیس اولیه، هزینه جایگزینی، تعمیرات، سوخت، خرید برق از شبکه، جریمه های ناشی از آلودگی هوا و فروش برق به شبکه است در این نوع ارزیابی جهت اثر دادن تورم در محاسبات در انتهای فرایند تحلیل و

³ - Net Present Cost



شکل 4: متوسط انرژی تابشی بر سطح در روز برای ماههای سال



شکل 5: منحنی مشخصه ژنراتور بادی

4- نتایج بهینه سازی

با توجه به پارامترهای بار، سرعت باد و شدت تابش خورشید در طول سال که در قسمت قبل اشاره شد و قیمت تجهیزات که در جدول 2 نشان داده شده است به بررسی بهینه سازی در انتخاب نوع منابع و اندازه آنها بوسیله نرم افزار HOMER می پردازیم. نتایج بهینه سازی در جدول 3 به ترتیب اولویت نشان داده شده است. همانطور که مشاهده می شود مجموعه ژنراتور بیو گاز سوز، سلول خورشیدی، باتری و مبدل با اندازه نشان داده شده در جدول 3 کمترین هزینه برق تولیدی را دارا می باشد و حالت بهینه با توجه به شرایط مسئله است. پارامترهای سطر اول جدول به شرح زیر می باشند. PV توان سلول

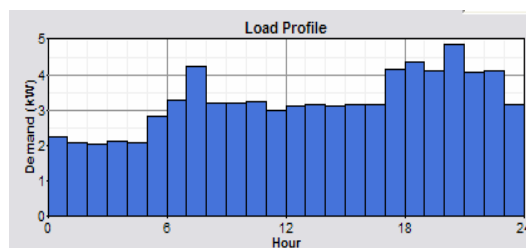
و حداکثر آن 9.3Kw می باشد. منحنی بار برای ماه آگوست در شکل 2 نشان داده شده است. [6]

پارامتر بعدی سرعت متوسط باد در هر ماه سال می باشد که در شکل 3 نشان داده شده است. بر اساس این منحنی نرم افزار سرعت باد را برای تمام 8760 ساعت سال تولید می کند. در منطقه مورد مطالعه متوسط سالانه سرعت باد 5.7 m/s می باشد. [7]

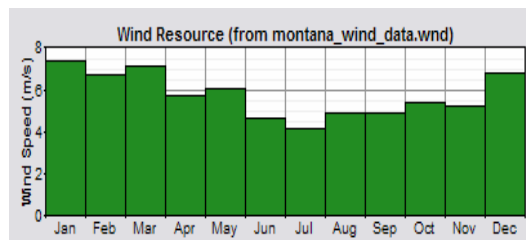
در منحنی شکل 4 متوسط انرژی تابشی بر سطح در روز برای ماههای سال نشان داده شده است. خط قرمز شاخص شفافیت محاسبه شده بوسیله نرم افزار را نشان می دهد. متوسط سالانه انرژی تابشی بر سطح در روز 4.63 Kwh/m²/day می باشد.

ژنراتور بادی مورد استفاده با توجه به سرعت باد از نوع SW Whisper H80 می باشد. منحنی مشخصه آن در شکل 5 نشان داده شده است.

منحنی بازده بر حسب درصد تولید برای ژنراتور بیوگاز مورد استفاده در شکل 6 نشان داده شده است. در این منحنی محور افقی نسبت خروجی به خروجی نامی ژنراتور و محور عمودی بازده ژنراتور را نشان می دهند. همانطور که مشاهده می شود در نزدیکی خروجی نامی بازده حداکثر است و به طور کلی بازده پایین است و حداکثر به 43% می رسد.



شکل 2: منحنی بار برای ماه آگوست

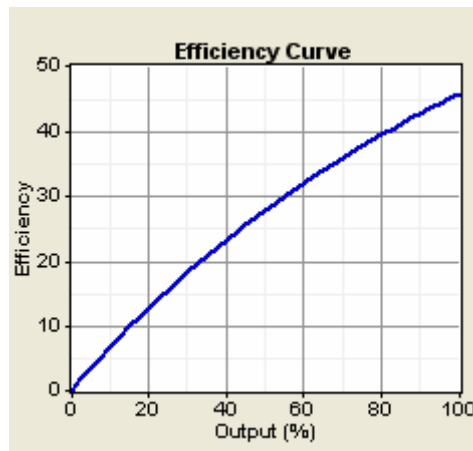


شکل 3: سرعت متوسط باد در ماههای سال

سوئد برابر 75% سوخت گازوئیل می باشد (جدول 3) و دوم آنکه در محل با ایجاد مخزن بی هوا زی و استفاده از فضولات حیوانات یا فاضلاب انسانها این گاز را تولید کرد که در عمل روش دوم ارجحیت دارد که با هزینه اولیه تقریبی \$15000 می توان چنین مخزنی را تولید و با سوختی رایگان از آن استفاده نمود که نتیجه آن در بهینه ترین وضعیت NPC 42.39 و COE 0.136 می باشد. ملاحظه می شود که هزینه این روش خیلی بیشتر از حالت قبل می باشد اما اگر در روش اول هزینه حمل و نقل نیز اضافه گردد با هم برابر خواهند بود.

5- نتیجه گیری

در این مقاله به بررسی اقتصادی و بهینه سازی یک سیستم تولید انرژی مستقل از شبکه برق بوسیله نرم افزار HOMER پرداخته شد. همانطور که مشاهده می شود به طور نسبی و کلی ژنراتور بیو گاز با وجود هزینه اولیه نسبتاً بالا می تواند در سیستم های مستقل از شبکه نقش اصلی را داشته باشد. همچنین از توربین بادی و آرایه فتوولتائیک به عنوان انرژی های مکمل یکدیگر میتوان سود جست.



شکل 6: منحنی بازده بر حسب درصد تولید ژنراتور دیزلی

جدول 1: پارامترهای باتری

Nominal capacity:	460 Ah
Nominal voltage:	6 V
Round trip efficiency:	80 %
Min. state of charge:	40 %
Float life:	8 yrs
Max. charge rate:	1 A/Ah
Max. charge current:	18 A
Lifetime throughput:	1,394 kWh
Suggested value:	1,362 kWh

خورشیدی، H80 تعداد ژنراتور بادی، Gen1 توان ژنراتور بیو گاز سوز، S6CS25P تعداد باتری، Conv توان مبدل، Elec, Reformer, H2 tank مقادیر الکترولایزرو رفورمر و مخزن ذخیره هیدروژن، Initial Capital سرمایه گذاری اولیه، Total NPC هزینه کلی شبکه، COE⁴ هزینه برق، Ren. Frac.⁵ نسبت انرژی نو به کل انرژی تولیدی مجموعه، Diesel میزان سوخت مصرفی بر حسب لیتر و Biomass میزان گاز بر حسب تن Gen1(hrs) مدت زمان روشن بودن ژنراتور، Gen2 مدت زمان کار پیل سوختی بر حسب ساعت می باشند. برای محاسبه هزینه ژنراتور بیو گاز سوز می توان از دو روش استفاده کرد. یک اینکه متوسط هزینه تولید گاز را حساب کرد که این مقدار در کشورهای پیشرفته همچون

⁴cost of energy-

⁵Renewable Fraction-

جدول 2: مشخصات تجهیزات

وسيله	اندازه	قيمت (دلار)	هزينه جاگزينی (دلار)	هزينه تعمير و نگهداری (دلار)	طول عمر (سال)
ژنراتور بيو گاز	6kw	1400	1400	0.015/hr	20
توربين بادی	1 kw	2590	2590	50/yr	15
آرایه فتوولتائیک	0.11kw	558	558	0	20
باطری	460Ah	424.5	424.5	1/yr	8
مبدل	3.3kw	2045	2045	6/yr	20
پیل سوختی	1kw	3000	2500	0.02	15
الکترو لایزر	1kw	1500	1300	60/yr	7
رفورمر	1kw	1400	1400	90/yr	15
تانکر هیدروژن	1kg	1300	1300	0	20

جدول 3: حالت های بهینه انتخاب تجهیزات

	PV (kW)	H80	Gen1 (kW)	Gen2 (kW)	S6CS25P	Conv. (kW)	Elec. (kW)	Reformer (kg/hr)	H2 Tank (kg)	Initial Capital	Operating Cost (\$/yr)	Total NPC	COE (\$/kWh)	Ren. Frac.	Diesel (L)	Biomass (t)	Gen1 (hrs)	Gen2 (hrs)
	2		6			2	3			\$ 15,047	1,288	\$ 29,818	0.096	1.00	0	85	8,475	
	2	1	6			1	3			\$ 16,387	1,314	\$ 31,458	0.102	1.00	0	82	8,293	
	2		6	1		2	3		2	\$ 21,047	1,210	\$ 34,329	0.113	1.00	0	85	8,475	0
	2	1	6	1		1	3		2	\$ 22,387	1,236	\$ 36,569	0.118	1.00	0	82	8,293	0
	2		6	1		2	3	2		\$ 22,047	1,269	\$ 36,597	0.118	1.00	0	85	8,475	0
	2	1	6	1		1	3	2		\$ 23,387	1,295	\$ 38,237	0.124	1.00	0	82	8,293	0
	2		6	1		2	3	2	2	\$ 25,047	1,258	\$ 39,473	0.128	1.00	0	85	8,475	0
	2	1	6	1		1	3	2	2	\$ 26,387	1,284	\$ 41,112	0.133	1.00	0	82	8,293	0
	2	4	6	3		2	2		5	\$ 42,407	1,463	\$ 59,189	0.191	1.00	0	83	8,613	132
	2	4	6	3		2	2		5	\$ 45,407	1,452	\$ 62,064	0.201	1.00	0	83	8,613	132

6- مراجع

- [1] HOMER Software \Help
- [2] G.J. Dalton, D.A. Lockington , T.E Baldock, "Case study feasibility analysis of renewable energy supply options for small to medium-sized tourist accommodations", Renewable Energy 34 (2009) 1134–1144
- [3] علی کاشفی کایانی و همکاران ، "اندازه یابی بهینه یک نیروگاه مختلط بادی - خورشیدی با استفاده از الگوریتم PSO ، " PSC 2007
- [4] Werner Kossmann, Uta Pönitz Information and Advisory Service on Appropriate Technology" Biogas Digest"
- [5] امیر رضا طلایی "فن آوری استحصال بيو گاز"
- [6] سمیرا منشی پور و ربابه عبدالهی ، " ارزیابی اقتصادی پکیج برق خورشیدی در برق رسانی به مناطق فاقد دسترسی به شبکه سراسری برق "، PSC 2007
- [7] ابوالفضل شیرودی و همکاران ، " مقایسه آنالیز فنی -اقتصادی سیستمهای انرژی مستقل از شبکه در سایت طالقان و بررسی آنها با استفاده از نرم افزار شبیه ساز HOMER " ، PSC 2007
- [8] HOMER WebSite: <https://analysis.nrel.gov/homer/>
- [9] <http://www.nrel.gov/rredc>