





دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک
پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی

بهینه سازی فنی اقتصادی پمپ آب خورشیدی با استفاده از روش الگوریتم
NSGA-II

نگارنده: امیرحسین نیک زاد

استاد راهنما:

دکتر محمود چهارطاقی

استاد مشاور:

دکتر محمد حسین احمدی

بهمن ۱۳۹۷

شماره: ۳۰۲۸۷/۱۵۹
تاریخ: ۱۳۹۷/۱۲/۰۴

باسمه تعالی



مدیریت تحصیلات تکمیلی

فرم شماره (۳) صور جلسه نهایی دفاع از پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

با نام و یاد خداوند متعال، ارزیابی جلسه دفاع از پایان نامه کارشناسی ارشد خانم/ آقای امیرحسین نیک زاد با شماره دانشجویی ۹۵۱۵۶۳۴ رشته مهندسی مکانیک گرایش سیستم‌های انرژی تحت عنوان بهینه سازی فنی اقتصادی پمپ آب خورشیدی با استفاده از روش الگوریتم NSGA-II که در تاریخ ۱۳۹۷/۱۱/۰۹ با حضور هیأت محترم داوران در دانشگاه صنعتی شاهرود برگزار گردید به شرح ذیل اعلام می-گردد:

<input type="checkbox"/> مردود <input checked="" type="checkbox"/> قبول (با درجه: عالی)			
<input type="checkbox"/> عملی <input checked="" type="checkbox"/> نظری			
امضاء	مرتبه علمی	نام و نام خانوادگی	عضو هیأت داوران
	دانشیار	دکتر محمود چهارطاقی	۱- استاد راهنمای اول
	-	-	۲- استاد راهنمای دوم
	استادیار	دکتر محمدحسین احمدی	۳- استاد مشاور
	دانشیار	دکتر علی جباری مقدم	۴- نماینده تحصیلات تکمیلی
	استادیار	دکتر علی عباس نژاد	۵- استاد ممتحن اول
	استادیار	دکتر احمد نظری	۶- استاد ممتحن دوم

نام و نام خانوادگی رئیس دانشکده: دکتر محمد محسن شاه مردان

تاریخ و امضاء و مهر دانشکده:

تقدیم

خدای را بسی شاکرم که از روی کرم پدر و مادری فداکار نصیبم ساخته تا در سایه درخت پر بار وجودشان بیایم

و از ریشه‌ی آن ما شاخ و برگ گیرم و از سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش بهره‌مند گردم.

به پاس قلب‌های بزرگشان که فریادس است و سرگردانی و ترس در پناهشان به شجاعت می‌گراید و

به پاس محبت‌های بی‌دینشان که هرگز فروکش نمی‌کند...

این مجموعه را به پدر و مادر عزیزم تقدیم می‌کنم.

سپاس گزاری

سپاس و ستایش سزاوار پروردگاری است که به آراستن انسان به زیور علم و معرفت او را اشرف مخلوقات گرداند. اینک که به لطف و عنایت خداوند متعال موفق به انجام و ارائه‌ی پروژه‌ی خود شده‌ام لازم می‌دانم که از راهنمایی‌های علمی و زحمات بی‌دریغ اساتید گران قدر و فرهیخته، جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی و جناب آقای دکتر محمد حسین احمدی، صمیمانه تشکر و قدردانی نمایم که همواره و در تمامی عرصه‌های تحصیلی و انجام پروژه‌ی حاضر بنده را از راهنمایی‌های خود بهره‌مند نمودند. از خداوند منان برای این بزرگواران آرزوی توفیق و سربلندی روز افزون را خواستارم.

همچنین از سایر اساتید و دوستانی که در طول دوره‌ی تحصیل راهنما و همراه بنده بوده‌اند کمال تشکر و قدردانی

دارم.

تعهدنامه

اینجانب امیرحسین نیک زاد دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک و مکاترونیک دانشگاه صنعتی شاهرود نویسنده پایان نامه با عنوان " بهینه سازی فنی اقتصادی پمپ آب خورشیدی با استفاده از روش الگوریتم NSGA-II " تحت راهنمایی جناب آقای دکتر محمود چهارطاقی متعهد می شوم:

- تحقیقات در این پایان نامه توسط اینجانب انجام شده است و از صحت و اصالت برخوردار است.
- در استفاده از نتایج پژوهش های محققان دیگر به مرجع مورد استفاده استناد شده است.
- مطالب مندرج در پایان نامه تاکنون توسط خود یا فرد دیگری برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی در هیچ جا ارائه نشده است.
- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد و مقالات مستخرج با نام «دانشگاه صنعتی شاهرود» و یا «Shahrood University of Technology» به چاپ خواهد رسید.
- حقوق معنوی تمام افرادی که در به دست آمدن نتایج اصلی پایان نامه تأثیرگذار بوده اند در مقالات مستخرج از پایان نامه رعایت می گردد.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که از موجود زنده (یا بافتهای آن) استفاده شده است، ضوابط و اصول اخلاقی رعایت شده است.
- در کلیه مراحل انجام این پایان نامه، در مواردی که به حوزه اطلاعات شخصی افراد دسترسی یافته یا استفاده شده است اصل رازداری، ضوابط و اصول اخلاق انسانی رعایت شده است.

تاریخ

امضای دانشجو

مالکیت نتایج و حق نشر

- کلیه حقوق معنوی این اثر و محصولات آن (مقالات مستخرج، کتاب، برنامه های رایانه ای، نرم افزارها و تجهیزات ساخته شده) متعلق به دانشگاه صنعتی شاهرود می باشد. این مطلب باید به نحو مقتضی در تولیدات علمی مربوطه ذکر شود.
- استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مرجع مجاز نمی باشد.

چکیده

یکی از عمده مشکلات فراگیر نشدن سیستم‌های پمپ آب فتوولتائیک (PVWPS^۱)، هزینه اولیه بالای این سیستم‌ها و قابلیت اعتماد آنها تحت شرایط جوی متغیر در طول زمان آبیاری است. بنابراین طراحی اصولی و تعیین ظرفیت صحیح اجزاء برای یک عملکرد پایدار و کارآمد ضروری بوده و باعث کاهش چشمگیر در هزینه‌ها خواهد شد. از این‌رو در این مطالعه با هدف تامین نیاز آبی محصول برنج در زمینی به مساحت یک هکتار واقع در شمال ایران توان مورد نیاز پمپاژ بر اساس میزان دبی مورد نیاز محصول محاسبه شده است. در ادامه با تعیین شیب بهینه نصب ماژول‌های خورشیدی و سپس با استفاده از الگوریتم بهینه سازی NSGA-II، تعداد بهینه ماژول‌های PV مورد نیاز جهت راه اندازی و تامین برق مجموعه موتورپمپ تعیین شده است. همچنین برای افزایش قابلیت اطمینان و پایداری سیستم در روزهای ابری یا بارانی، یک بانک باتری به عنوان سیستم پشتیبان و نیز شارژکنترلر برای محافظت از باتری‌ها در برابر شارژ و دشارژ بیش از حد در نظر گرفته شده است. اما مهمترین بخش این مطالعه ضمن مقایسه اقتصادی دو سیستم PVWPS و سیستم پمپاژ متداول، بررسی طرح فروش برق به شبکه در ماه‌های غیر آبیاری سال برای جبران هزینه‌های اولیه بالای PVWPS نسبت به سیستم‌های پمپاژ متداول است. نتایج نشان می‌دهد که اگرچه هزینه های اولیه PVWPS مستقل و متصل به شبکه در این مطالعه به ترتیب ۲/۱۴۱ و ۲/۴۱ برابر هزینه های اولیه سیستم پمپاژ متداول است اما در مدت زمان ۲۵ ساله طول عمر پروژه، هزینه های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ متداول نسبت به سیستم‌های مذکور به ترتیب ۱/۲۶۸ و ۲/۴۴ برابر خواهد بود. همچنین در ادامه در بخش تحلیل اثرات زیست محیطی، نتایج نشان داد که PVWPS تنها در طول دوره آبیاری توانست به میزان ۸/۷۲۸ تُن در تولید گاز کربن دی اکسید به عنوان یکی از عوامل اصلی در پدیده گرمایش زمین به جو جلوگیری کند که این میزان معادل با حدوداً ۱۶ درخت بالغ (یا ۳۰ درخت جوان) می‌باشد. این در حالیست که PVWPS متصل به شبکه در تمام طول سال در دو زاویه شیب ۱۵ و ۵۳ درجه پس از

^۱ Photovoltaic Water Pump System

۲۵ سال به ترتیب بیش از ۲۱ و ۲۳ تن باعث کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید به جو خواهد شد. از طرفی طی یک آزمایش مشخص شد که سیستم پمپاژ متداول بطور میانگین ۸۶ دسیبل صدا تولید می کند که مطابق با استانداردها در رنج صداهای آزاردهنده محسوب می شود. این موضوع برگ برنده دیگری برای PVWPS در زمینه انتشار آلودگی صوتی نسبت به رقیب خود محسوب می شود.

کلمات کلیدی: ماژول PV، پمپ آب خورشیدی، بانک باتری، شارژ کنترلر، بهینه سازی،

NSGA-II، فروش برق به شبکه، تحلیل اقتصادی، تحلیل زیست محیطی

لیست مقالات مستخرج از پایان نامه

◀ مدلسازی فنی و زیست محیطی پمپ آب خورشیدی فتوولتائیک مستقل از شبکه
برای آبیاری محصول برنج، کنفرانس بین المللی عمران، معماری و مدیریت توسعه شهری در
ایران، تهران، دانشگاه تهران، ۱۳۹۷

فهرست مطالب

۱ فصل اول: مقدمه و معرفی سیستم پمپ آب خورشیدی فتوولتائیک	۱
۱-۱ مقدمه	۲
۱-۲-۱ تاریخچه‌ی سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک	۴
۱-۳-۱ محاسن و معایب استفاده از سیستم های تولید برق فتوولتائیک	۵
۱-۴-۱ ضرورت استفاده از انرژی خورشیدی در حوزه کشاورزی	۶
۱-۵-۱ دلایل انتخاب استان مازندران	۷
۱-۶-۱ بررسی وضعیت پتانسیل انرژی خورشیدی ایران و استان مازندران	۸
۲ فصل دوم: مروری بر کارهای پیشین	۱۱
۲-۱-۱ مروری بر پژوهش‌های پیشین	۱۲
۲-۲-۲ برجستگی مطالعه حاضر	۱۸
۳ فصل سوم: مدل‌سازی فنی، اقتصادی و زیست محیطی اجزای مختلف سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک	۱۹
۳-۱-۱ مدل‌سازی سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک	۲۰
۳-۲-۱ مشخصات جغرافیایی منطقه مورد بررسی	۲۰
۳-۳-۱ وضعیت هواشناسی مورد مطالعه	۲۱
۳-۴-۱ نیاز آبی محصول و تعیین دبی بهینه جهت پمپاژ	۲۶
۳-۵-۱ انتخاب زوایای بهینه نصب ماژولهای خورشیدی	۳۰
۳-۶-۱ مجموعه موتورپمپ	۳۵
۳-۷-۱ پنل خورشیدی	۴۰
۳-۸-۱ تعداد بهینه ماژولهای فتوولتائیک از طریق بهینه سازی با استفاده الگوریتم NSGA-II	۴۸
۳-۹-۱ سیستم پشتیبان	۵۰
۳-۱۰-۱ شارژ کنترلر	۵۲
۳-۱۱-۱ مشخصات زمین در دسترس برای نصب تجهیزات	۵۳

۵۳	۱۲-۳-مدلسازی اقتصادی پروژه
۵۶	۱۳-۳-سیستم پمپاژ آب متداول
۵۹	۱۴-۳-طرح فروش برق به شبکه
۶۲	۱۵-۳-مدلسازی اثرات زیست محیطی
۶۵	۴ فصل چهارم: بحث و نتایج
۶۶	۱-۴-مقدمه
۶۶	۲-۴-دبی بهینه
۶۸	۳-۴-تعیین توان مورد نیاز پمپاژ و نوع مجموعه موتورپمپ
۷۱	۴-۴-تعداد بهینه ماژولهای فتوولتائیک و ظرفیت نهایی نیروگاه
۷۴	۵-۴-آنالیز حساسیت توان و راندمان خروجی از آرایه فتوولتائیک
۷۶	۶-۴-نوع و تعداد بهینه باتری(ها)
۷۸	۷-۴-نوع و ظرفیت بهینه شارژکنترلر
۸۳	۸-۴-نتایج و تحلیل اقتصادی مطالعه حاضر
۸۶	۹-۴-فروش برق به شبکه
۹۲	۱۰-۴-نتایج اثرات زیست محیطی در مطالعه حاضر
۹۷	فصل پنجم: نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۸	۱-۵-نتیجه گیری
۱۰۰	۲-۵-پیشنهادات
۱۰۱	مراجع

فهرست اشکال

- شکل ۱-۱- مقایسه میانگین تابش خورشیدی روی سطح افق ایران و آلمان..... ۹
- شکل ۱-۳- متوسط دمای محیط در ماه های دوره آبیاری برای ساری (۲۰۱۶-۲۰۱۷) [۴۱]..... ۲۲
- شکل ۲-۳- میانگین رطوبت نسبی در ماه های مختلف سال برای ساری (۲۰۱۶-۲۰۱۷) [۴۱]..... ۲۳
- شکل ۳-۳- میانگین میزان بارندگی ماه های مختلف سال برای ساری (۲۰۱۶-۲۰۱۷) [۴۱]..... ۲۴
- شکل ۴-۳- بازه تغییرات شاخص شفافیت آسمان در شرایط جوی مختلف..... ۲۴
- شکل ۵-۳- تغییرات میانگین شاخص شفافیت آسمان برای شهرستان ساری در ماه های مختلف سال در نرم افزار PVsyst..... ۲۵
- شکل ۶-۳- تغییرات میانگین شاخص شفافیت آسمان برای شهرستان ساری در روزهای دوره آبیاری در نرم افزار PVsyst..... ۲۶
- شکل ۷-۳- تابش کل روی سطح پنل PV در ساعات مختلف روز با زاویه شیب صفر برای شهر ساری در نرم افزار PVsyst..... ۳۳
- شکل ۸-۳- تابش کل روی سطح شیبدار پنل PV با زاویه ۱۵ درجه در ساعات مختلف روز برای ساری در نرم افزار PVsyst..... ۳۳
- شکل ۹-۳- منحنی عملکرد پمپ گریز از مرکز و جابجایی مثبت در هدهای مختلف برای یک آرایه PV در روز آفتابی [۶۵]..... ۳۷
- شکل ۱۰-۳- نحوه عملکرد الگوریتم MPPT در نمودارهای جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ..... ۳۹
- شکل ۱۱-۳- عملکرد الکتریکی پنل PV با تغییرات تابش..... ۴۱
- شکل ۱۲-۳- میزان تابش دریافتی روی سطح پنل با شیب ۱۵ درجه در روزهای میانگین ماه برای ساری در نرم افزار PVsyst..... ۴۳
- شکل ۱۳-۳- شکل سمت راست استراکچر یکپارچه، شکل سمت چپ استراکچرهای مجز..... ۴۵

- شکل ۳-۱۴- حداکثر سرعت باد در ماه های مختلف سال برای ساری [۴۱]..... ۴۶
- شکل ۳-۱۵- مازول فتوولتائیک سیلیکون کریستالی نوع مونوکریستال در مطالعه حاضر [۷۹]..... ۴۷
- شکل ۳-۱۶- ابعاد زمین در دسترس برای نصب سیستم پمپ خورشیدی..... ۵۳
- شکل ۳-۱۷- نمایی از سیستم پمپاژ متداول دیزل در زمین های کشاورزی استان مازندران..... ۵۷
- شکل ۳-۱۸- اینورتر انتخابی در مطالعه حاضر [۱۰۳]..... ۶۰
- شکل ۴-۱- متوسط ساعات آفتابی در ماه های مختلف سال برای شهر ساری [۴۱]..... ۶۷
- شکل ۴-۲- متوسط ساعات آفتابی در روزهای دوره آبیاری برای شهر ساری [۴۱]..... ۶۸
- شکل ۴-۳- موتورپمپ مورد مطالعه به همراه کنترلر (PCU) [۷۹]..... ۷۰
- شکل ۴-۴- جبهه پارتو مسئله بهینه سازی دو هدفه در مطالعه حاضر..... ۷۲
- شکل ۴-۵- تعیین نقطه بهینه در فرآیند بهینه سازی با استفاده از روش تاپسیس..... ۷۳
- شکل ۴-۶- تغییرات توان خروجی آرایه فتوولتائیک با دما محیط و در شدت تابشهای متفاوت..... ۷۵
- شکل ۴-۷- تغییرات راندمان آرایه PV با دمای محیط و در شدت تابشهای مختلف..... ۷۵
- شکل ۴-۸- باتری انتخابی در مطالعه حاضر [۱۱۱]..... ۷۸
- شکل ۴-۹- شارژ کنترلر انتخابی در مطالعه حاضر [۱۱۲]..... ۸۰
- شکل ۴-۱۰- نمای کلی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد مطالعه..... ۸۳
- شکل ۴-۱۱- میزان آلودگی صوتی سیستم پمپاژ آب متداول نوع دیزل در زمین های کشاورزی کشت برنج ساری ۹۲
- شکل ۴-۱۲- نمودار خطی ضمانت مقدار توان خروجی پنل های خورشیدی با گذشت زمان ۹۳

فهرست جداول

- جدول ۱-۳- توزیع فراوانی آب مصرفی برنج در ماه های مختلف سال به ازای یک هکتار..... ۲۷
- جدول ۲-۳- توزیع فراوانی آب مصرفی برنج در ماه های مختلف سال به ازای میزان اراضی در دسترس (متر مکعب) ۲۷
- جدول ۳-۳- متوسط تابش کل روی سطح افق و روی سطح شیبدار پنل و شیب بهینه در ماه های مختلف سال برای ساری [۴۲]..... ۳۱
- جدول ۴-۳- مقایسه تابش کل دریافتی روی سطح پنل با سه زاویه شیب متفاوت در ماه های دوره آبیاری برای ساری [۴۲] ۳۲
- جدول ۵-۳- میزان تلفات موثر در توان خروجی ماژول PV [۷۰ و ۷۱]..... ۴۰
- جدول ۶-۳- مشخصات ماژول PV انتخابی [۷۹]..... ۴۶
- جدول ۷-۳- پارامترهای ثابت در فرآیند بهینه سازی..... ۴۹
- جدول ۸-۳- مشخصات سیستم پمپاژ متداول دیزلی [۹۸]..... ۵۶
- جدول ۹-۳- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ مرسوم مورد مطالعه..... ۵۸
- جدول ۱۰-۳- مشخصات اینورتر انتخابی [۱۰۱]..... ۵۹
- جدول ۱۱-۳- شاخص انتشار گاز کربن دی اکسید از نیروگاه های مختلف برق ایران در سال ۲۰۱۴ [۱۰۳] ۶۳
- جدول ۱-۴- مشخصات موتور پمپ خورشیدی انتخابی [۷۹]..... ۶۹
- جدول ۲-۴- مشخصات کنترلر مجموعه موتور پمپ انتخابی [۷۹]..... ۷۱
- جدول ۳-۴- مشخصات باتری خورشیدی انتخابی [۱۱۱]..... ۷۷
- جدول ۴-۴- مشخصات شارژکنترلر انتخابی [۱۱۲]..... ۷۹
- جدول ۵-۴- نحوه عملکرد شارژکنترلر انتخابی در دماهای مختلف محیط برای شارژ بانک باتری..... ۸۰

- جدول ۴-۶- نحوه مدیریت ولتاژ خروجی آرایه PV برای شارژ بانک باتری توسط شارژکنترلر انتخابی در دماهای مختلف محیط..... ۸۲
- جدول ۴-۷- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مستقل از شبکه برای شرایط ایران..... ۸۴
- جدول ۴-۸- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مستقل از شبکه برای کشورهای منتخب جهان..... ۸۵
- جدول ۴-۹- اطلاعات مربوط به تزریق برق به شبکه برای نیروگاه مورد مطالعه با زاویه شیب ۱۵ به کمک نرم افزار PVsyst..... ۸۶
- جدول ۴-۱۰- اطلاعات مربوط به تزریق برق به شبکه برای نیروگاه مورد مطالعه با زاویه شیب ۵۳ به کمک نرم افزار PVsyst..... ۸۷
- جدول ۴-۱۱- متوسط نرخ رسمی یورو و قیمت خرده فروشی مواد در سال های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ [۹۴]..... ۸۹
- جدول ۴-۱۲- قیمت خرید هر کیلووات ساعت برق فتوولتائیک و سود حاصل از فروش آن در مدت زمان قرارداد ۲۰ ساله..... ۹۰
- جدول ۴-۱۳- هزینه های چرخه عمر PVWPS با هدف فروش برق به شبکه در ماه های غیر آبیاری در ایران..... ۹۱
- جدول ۴-۱۴- میزان خروجی موثر آرایه ۱/۲ کیلوواتی مورد مطالعه بعد از کسر تلفات پیری در دوره آبیاری..... ۹۴
- جدول ۴-۱۵- مقایسه میزان کربن دی اکسید صرفه جویی شده در سناریوهای مختلف در مدت زمان طول عمر پروژه..... ۹۵

فهرست علائم و اختصارات

A_{array}	مساحت آرایه فتوولتائیک	L_T	تلفات دما
A_{module}	مساحت ماژول فتوولتائیک	n	تعداد سال
$A_{Batt, bank}$	مساحت بانک باتری	N_{Batt}	تعداد کل باتری‌ها
A_{DE}	ضریب مصرف سوخت موتور دیزل	$N_{Batt, parallel}$	تعداد رشته باتری موازی
B_{DE}	ضریب مصرف سوخت موتور دیزل	$N_{irr, days}$	تعداد روزهای آبیاری
C_0	قیمت تجهیزات در سال جاری	N_{max}	حداکثر ماژول خورشیدی سری در هر رشته
CB	موازنه انتشار کربن دی اکسید	N_{min}	حداقل ماژول خورشیدی سری در هر رشته
$C_{Capital}$	هزینه‌های اولیه	$NIWR$	نیاز خالص آبیاری گیاه
$C_{installation}$	هزینه‌های نصب	N_P	تعداد رشته پنل خورشیدی موازی
C_{MP}	هزینه موتور پمپ	$N_{PV, req}$	تعداد ماژول خورشیدی مورد نیاز
C_P	ضریب دمایی پنل	N_S	تعداد ماژول خورشیدی سری
CPW	ارزش حال تجمعی	P	متوسط بارندگی در ماه
$C_{replacement}$	هزینه‌های تعویض تجهیزات	P_{eff}	بارش موثر ماهانه
d	نرخ تنزیل	P_{DE}	توان لحظه ای موتور دیزل
$E_{eff, PV}$	انرژی موثر خروجی از آرایه فتوولتائیک	P_{DEr}	حداکثر توان موتور دیزل
array			
ER	بارش موثر	$P_{max, actual}$	توان واقعی خروجی ماژول خورشیدی
ET_0	تبخیر و تعرق پتانسیل گیاه	$P_{max, PV panel}$	حداکثر توان نامی ماژول خورشیدی
ET_C	نیاز آبی گیاه	P_{pump}	توان پمپاژ
F_{DEC}	مصرف سوخت موتور دیزل	$P_{T, loss}$	تلفات دمایی توان
F_{safe}	ضریب اطمینان	$PVWPS$	سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک
g	شتاب گرانش زمین	PW	ارزش حال
G_{ref}	تابش در شرایط استاندارد	Q	دبی پمپاژ
G_{tilted}	تابش کل روی سطح شیبدار پنل	SD	میزان تقاضای ذخیره سازی
h	هد پمپاژ	SH	ساعات آفتابی
i	نرخ تورم	T_a	دمای محیط
I_{CC}	ظرفیت شارژ کنترلر	T_m	دمای ماژول
I_{SC}	جریان اتصال کوتاه پنل	$T_{m, ref}$	دمای ماژول در شرایط استاندارد
I_{mpp}	جریان پنل در حداکثر توان	TDH	هد دینامیکی کل
K_C	ضریب گیاهی	TDL	کل بار روزانه
L	طول	$V_{Batt, bank}$	ولتاژ بانک باتری
L_B	تلفات باتری	V_{mpp}	ولتاژ پنل در حداکثر توان
L_C	تلفات کابل کشی	V_{OC}	ولتاژ مدار باز پنل

L_{CC}	تلفات شارژ کنترلر	$V_{PV, array}$	ولتاژ آرایه فتوولتائیک
L_{CC}	هزینه‌های چرخه عمر	W	پهنا
LCE_{Grid}	چرخه عمر آلاینده‌گی شبکه برق	W_p	نیاز آبی آب تخت
LCE_{PV}	چرخه عمر آلاینده‌گی پنل خورشیدی	$\eta_{coulomb}$	بازده کولومب
L_{Mis}	تلفات ناهمگونی پنل	η_p	راندمان پمپ
L_{PC}	تلفات کنترلر پمپ	ρ	چگالی آب
L_{PMT}	خطای شرکت سازنده پنل در راندمان اعلامی	μ_V	ضریب دمایی ولتاژ پنل
L_S	تلفات گرد و خاک		

۱ فصل اول:

مقدمه و معرفی سیستم پمپ آب خورشیدی فتوولتائیک

برق مهمترین شکل انرژی است که در دنیای مدرن استفاده می‌شود. تقاضای برق در سراسر جهان به ویژه در کشورهای در حال توسعه و کمتر توسعه یافته به طور مداوم با نرخ ۳٪ در سال در حال افزایش است [۱] به طوریکه به منظور تکمیل تقاضای برق در سراسر جهان، تولید برق از سال ۱۹۷۳ تا ۲۰۱۳ به ترتیب از ۶۱۴۴ تراوات ساعت به ۲۳۳۹۱ تراوات ساعت افزایش یافته است [۲] که این باعث رشد سالانه‌ی بازار انرژی‌های تجدیدپذیر در جهان در حدود ۲/۲ درصد از سال ۱۹۹۰ تا ۲۰۱۳ و جدای از آن تولید انرژی خورشیدی فتوولتائیک رشد سالانه حدود ۴۶/۶ درصد را تجربه کرده است [۳]. ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک در جهان تا پایان سال ۲۰۱۷ حدود ۴۰۲ گیگاوات بوده که حدود ۱/۹ درصد تولید برق جهان را تأمین می‌کرد [۴]. در ایران نیز صنعت برق در سه دهه گذشته، رشد متوسط سالیانه ۸ تا ۱۰ درصدی را تجربه کرده و از این رو مجبور بوده هر ۱۰ سال یکبار ظرفیت نیروگاه‌ها و شبکه انتقال و توزیع خود را دو برابر کند که این مهم موجب شده تا در تمام ۳۰ سال گذشته، پارادایم حاکم بر صنعت برق کشور «پارادایم توسعه» باشد و نتیجه این پارادایم عدم تمرکز کافی بر کاهش شدت مصرف برق، توسعه انرژی‌های نو و کاهش آلاینده‌ها بوده است (بر اساس تحقیقات به عمل آمده توسط وزارت انرژی ایران، ظرف ۱۵ سال آینده باید ۱۵۰۰۰ تا ۲۰۰۰۰ مگاوات ظرفیت جدید برای پوشش تقاضای رو به افزایش برق اضافه شود [۵]). همچنین با توجه به اینکه حدود ۶۷/۲ درصد از تولید برق ناخالص جهانی باعث آلودگی زیست محیطی ناشی از سوخت‌های فسیلی (شامل نفت، ذغال سنگ و گاز) می‌شود [۱]، بنابراین تولید برق با استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر به علت گسترش صنعتی شدن، افزایش جمعیت و بهبود روزافزون سطح آسایش انسان و نیز محدودیت‌های زیست محیطی، باید در دستور کار قرار گیرند [۶]. در این بین تولید برق خورشیدی فتوولتائیک^۱ به عنوان یک منبع انرژی ایمن و پاک یکی از گزینه‌های امیدبخش محسوب می‌شود خصوصاً که تابش خورشید به عنوان یک منبع انرژی مجانی به وفور

^۱ Photovoltaic

در اکثر نقاط دنیا یافت می‌شود. ایران نیز با توجه به قراردادن در کمربند خورشیدی جهانی، استفاده از سیستم‌های PV در آن از سال ۱۹۸۲ آغاز شده است [۷] بطوریکه پنج سال بعد، اولین سایت PV با ظرفیت ۵ کیلووات در منطقه مرکزی ایران در روستای دربید در یزد تاسیس شد و پس از آن تعدادی از پروژه‌های PV در یزد، سمنان، خراسان، تهران و طالقان آغاز شدند. هرچند که ظرفیت این پروژه‌ها نسبت به پتانسیل کشور بسیار پایین بود [۸]. انرژی خورشیدی برای پمپاژ آب به طور کلی از طریق فرآیند تبدیل انرژی حرارتی به انرژی مکانیکی با استفاده از کلکتور خورشیدی و یا از طریق فرآیند تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به الکتریسیته با استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک مورد استفاده قرار می‌گیرد. در دهه‌های ۷۰ تا ۸۰ میلادی تحقیقات عمدتاً بر مبنای تبدیل ترمودینامیکی جهت استفاده از انرژی خورشیدی برای پمپاژ آب بود و طی این مدت مطالعات کمتری در زمینه فناوری فتوولتائیک به عنوان منبع تامین انرژی پمپاژ آب گزارش شده است [۹]. از این‌رو در این تحقیق سعی شده جنبه‌های مختلف سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد بررسی قرار گیرد. این سیستم‌ها عمدتاً شامل ماژول‌های خورشیدی فتوولتائیک، مجموعه موتورپمپ، مبدل و کنترلرها و در نهایت واحد ذخیره‌سازی همچون باتری یا مخزن ذخیره آب است. در این نوع سیستم‌ها به وسیله تابش خورشید بر روی سطح ماژول‌های PV، الکتریسیته لازم برای به حرکت درآوردن مجموعه موتورپمپ جهت آبکشی از چاه‌ها تامین می‌شود. بطور کلی سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی در مصارف خانگی، کشاورزی و دامی منجر به صرفه‌جویی در انرژی، کاهش پیک قدرت و تلفات و نیز بهبود راندمان و بهره‌وری در انتقال و توزیع برق می‌شود و در عین حال قابل اعتماد، دارای کاربری ساده و بدون هرگونه آلودگی صوتی و زیست‌محیطی در طول دوره عملیاتی خود می‌باشد [۱۰].

۱-۲- تاریخچه‌ی سیستم‌های پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک

ابتدا سیستم‌های PV در ماهواره‌ها مورد استفاده قرار می‌گرفتند اما در حال حاضر برای کاربردها و برنامه‌های متنوع از لوازم مصرفی کوچک مانند ساعت و ماشین حساب گرفته تا نیروگاه‌های متصل به شبکه مقیاس بزرگ (مگاواتی) نیز استفاده می‌شوند. یکی دیگر از کاربردهای سیستم‌های PV استفاده از آنها در سیستم‌های پمپاژ آب می‌باشد. این سیستم‌ها می‌توانند به عنوان یک جایگزین مناسب برای محافظت از محیط زیست نسبت به پمپ‌های آب معمولی دیزلی مورد استفاده قرار گیرند. از این‌رو اولین پمپ آب خورشیدی در سال ۱۹۶۴ در اتحاد جماهیر شوروی گزارش شده است. با این حال دبی و هد کاری سیستم پمپاژ آن کم بود [۹]. اما در اوایل دهه ۷۰، تلاش و مطالعاتی جهت امکان‌سنجی و ارزیابی PVWPS به عنوان ابزاری قابل قبول و مقرون به صرفه جهت پمپاژ آب صورت گرفت از این‌رو اولین سیستم پمپاژ آب مقیاس بزرگ در سال ۱۹۷۷ در روستای Mead در ایالت Nebraska آمریکا به صورت آزمایشی ساخته شد که ظرفیت پمپاژ آب آن برابر با ۳/۸ متر مکعب بر دقیقه بوده و به میزان ۱۲ ساعت در روز کار می‌کرد [۹]. این سیستم‌ها اگرچه دارای مزایای ستودنی نظیر کاهش آلاینده‌های صوتی و زیست محیطی و نیز کاهش هزینه‌های جاری در درازمدت بودند اما از مشکل هزینه‌های اولیه بالا (بخصوص ماژول‌های خورشیدی) در زمان خود رنج می‌بردند. گذشت زمان و تولید انبوه این قبیل تجهیزات بواسطه ظهور کارخانجات عمدتاً چینی باعث شکسته شدن قیمت‌های سرسام‌آور سلول‌های خورشیدی و افزایش نفوذپذیری سیستم‌های مبتنی بر PV شد. با اینحال به علت بومی نبودن صد در صدی این تجهیزات بخصوص در داخل کشورمان و نیز نوسانات شدید ارزی، طراحی بهینه اجزای مختلف PVWPS ضروری بوده و گامی مثبت جهت کاهش هزینه‌های اولیه و افزایش فراگیر شدن آنها در کشور محسوب می‌شود.

۱-۳- محاسن و معایب استفاده از سیستم های تولید برق فتوولتائیک

امروزه کاهش قیمت جهانی ماژول های PV (کاهش ۷۵ درصدی ماژول های فتوولتائیک در سال ۲۰۱۴ نسبت به سال ۲۰۰۹ [۱۱]) و افزایش بازده آنها و نیز طول عمر بالا باعث کاهش هزینه های نهایی تولید برق در مقایسه با هزینه های ایجاد پست های برق و یا احداث نیروگاه های حرارتی در کنار هزینه های خطوط انتقال و توزیع بخصوص در مناطق دورافتاده از شبکه سراسری برق خواهد شد. علاوه بر آن صیانت از منابع انرژی فسیلی و توسعه مشارکت بخش غیردولتی در فعالیت های اقتصادی در راستای تحقق اصل ۴۴ قانون اساسی و در عین حال تنوع بخشی به منابع انرژی و پدافند غیرعامل، نوسانات قیمت سوخت فسیلی و کاهش و به تدریج حذف یارانه های دولتی برای سوخت، توزیع نامتوازن شبکه برق در مناطق مختلف، عدم نیاز به آب برای تولید برق برخلاف نیروگاه های حرارتی با توجه به معضل کم آبی در کشور، سهولت در نصب، نگهداری و جابجایی در کنار هزینه های تعمیر و نگهداری پایین این تجهیزات به واسطه نبود قطعات متحرک در ماژول های PV، عدم نیاز به مصرف سوخت و عدم نشت آن به درون زمین های کشاورزی، عدم مشکل یخ زدگی سوخت در فصول سرد سال برخلاف موتورپمپ های دیزل [۱۲]، عدم احتیاج به حضور کاربر، کاهش آلودگی صوتی و نیز قابلیت ارتقاء در دراز مدت از دیگر مزایای تولید برق از این روش است. همچنین یکی از اصلی ترین مزایای سیستم های تولید برق فتوولتائیک برتری آنها در زمینه آلاینده های زیست محیطی است. این موضوع زمانی اهمیت پیدا می کند که بدینم ایران به عنوان نوزدهمین تولید کننده و بیستمین مصرف کننده برق در جهان [۸] تنها در سال ۲۰۱۶ حدود ۶۷۲ میلیون تُن گاز کربن دی اکسید (رتبه ۷ام در دنیا) به عنوان یکی از گازهای گلخانه ای مهم در پدیده گرمایش زمین را تولید کرده است [۱۳] و این درحالیست که این کشور با عضویت در معاهده آب و هوایی پاریس از این بابت باید مالیات سنگینی پرداخت کند که در صورت استفاده از انرژی های پاک مانند سیستم های تولید برق فتوولتائیک به میزان قابل توجهی می توان در خروج ارز از کشور جلوگیری کرد و حتی با صادرات برق تولیدی حاصل از آن ارزآوری نیز داشت. اما از معایب شاخص این سیستم ها در ایران و کشورهای در

حال توسعه می‌توان به هزینه‌های اولیه بالای آنها اشاره کرد [۱۴و۱۵]. علاوه بر این از دیگر عوامل محدود شدن گسترش استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، متناوب بودن ذاتی آنها تحت تغییرات تابش خورشید در طول روز [۱۶] و نیز پایداری نسبتاً پایین در روزهای ابری یا بارانی (در صورت در نظر نگرفتن سیستم ذخیره یا پشتیبان) می‌باشد. ذکر این نکته ضروری است که اگر یک سیستم پمپاژ فتوولتائیک به درستی طراحی شود می‌تواند کارآمدتر و رقابتی‌تر از سیستم‌های پمپاژ مبتنی بر شبکه یا دیزل ژنراتور، به ویژه در مناطق روستایی باشد [۱۷و۱۸]. از این‌رو بهینه نمودن اندازه یا ظرفیت اجزاء این سیستم‌ها در کنار طراحی یک سیستم پشتیبان باعث افزایش توجیه پذیری اقتصادی و قابلیت اعتماد آنها در شرایط جوی متغیر خواهد شد که از اهداف اصلی این پروژه نیز می‌باشد.

۱-۴- ضرورت استفاده از انرژی خورشیدی در حوزه کشاورزی

گزارش منتشر شده توسط بانک جهانی نشان داده است که تقریباً ۸۶ درصد از جمعیت جهان برای معیشت خود به کشاورزی روستایی وابسته‌اند [۱۹]. از آنجا که ایران در سال ۲۰۱۶ فقط در حوزه کشاورزی دارای ۴۰۰ هزار مشترک برق با مصرف کل بیش از ۳۶ میلیون کیلووات ساعت بوده که بیش از ۱۵ درصد مصرف برق کل کشور را شامل می‌شود [۲۰]. از طرفی طبق آخرین ترازنامه انرژی منتشر شده از سوی وزارت نیرو تنها در سال ۱۳۹۴ در حوزه کشاورزی بیش از ۳ میلیارد و ۱۶۳ میلیون لیتر گازوئیل، ۴۸۹ هزار لیتر بنزین، ۲۳ میلیون لیتر نفت سفید و ۴۹۲ هزار لیتر نفت کوره مصرف شده است که نتیجه آن علاوه بر هدر رفت سرمایه‌های ملی، آزادسازی بیش از ۱۲ میلیون و ۵۰۰ هزار تن گاز کربن دی‌اکسید به جو بوده است! این درحالیست که سیستم پمپاژ آب خورشیدی می‌تواند به طور موثر برای پمپاژ آب در بخش‌های کشاورزی استفاده شود در حالیکه هزینه عملیاتی آنها در مقایسه با سیستم پمپ آب دیزل کمتر است [۲۱]. بنابراین این آمار به خوبی گویای اهمیت مطالعه و سرمایه‌گذاری بر روی سیستم‌های تولید برق جایگزین مانند انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی خورشیدی جهت کاهش هزینه‌های جاری دولت (کاهش مصرف سوخت و آلاینده‌های زیست

محیطی در نیروگاه های مختلف) و همچنین کشاورزان (عدم نیاز به مصرف سوخت و استهلاک کم سیستم های PV) می باشد. علاوه بر این بهره جستن از انرژی خورشیدی فتوولتائیک برای استفاده در سیستم پمپاژ آب می تواند یک انتخاب هوشمندانه نیز باشد چرا که بین نیاز آبی محصولی مانند برنج که اوج آن در فصل گرما (تابستان) است و دسترسی به انرژی خورشیدی یک رابطه منطقی وجود دارد که این به معنای قابلیت اطمینان بالای این نوع سیستم ها برای پاسخگویی به تقاضای برق جهت پمپاژ آب در حوزه کشاورزی و حتی دامپروری و شیلات در مناطق دور افتاده از شبکه سراسری برق محسوب می شود که به توسعه اجتماعی و اقتصادی آنها نیز کمک می کند.

۱-۵- دلایل انتخاب استان مازندران

در این مطالعه از آنجا که محصول مورد نظر برای آبیاری، برنج می باشد. استان مازندران (شهرستان ساری) با داشتن آب کافی، زمین های حاصلخیز و رطوبت نسبی بالا از قطب های اصلی تولید برنج در کشور است. بطوریکه هم اکنون ۴۰ درصد برنج کشور از این استان تامین می شود. همچنین سهم استان مازندران در زمینه برق مصرفی و حامل های سوختی در حوزه کشاورزی مطابق با آخرین ترازنامه انرژی منتشر شده از سوی وزارت نیرو در سال ۱۳۹۴ به شرح زیر می باشد [۲۲]:

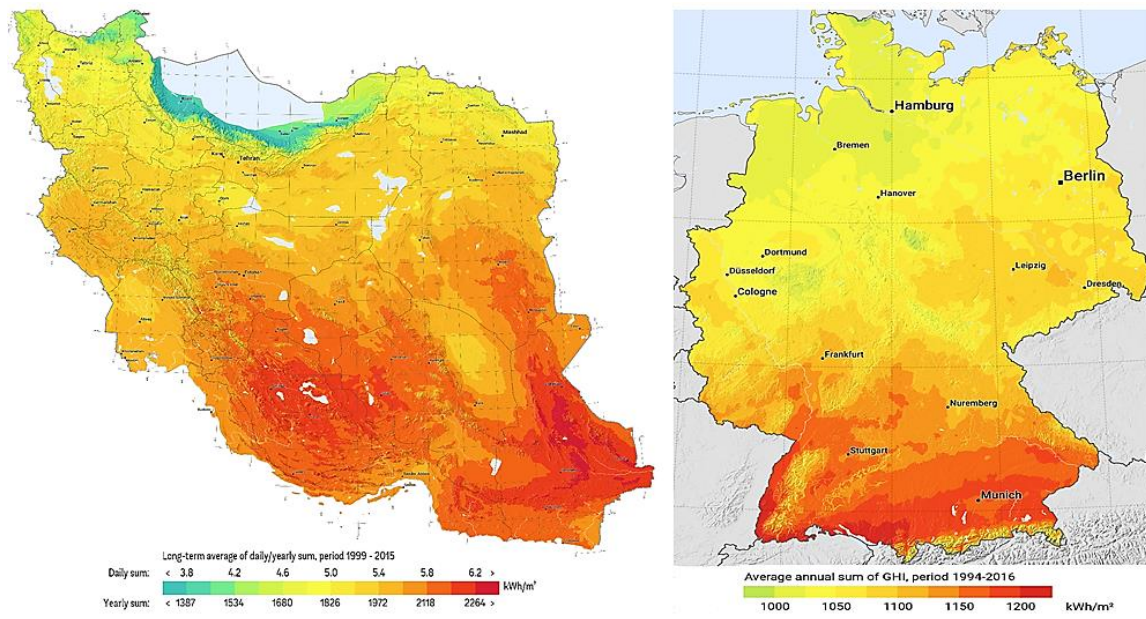
- مصرف برق حدود ۹۱۰ هزار مگاوات ساعت (رتبه ۱۲ام در کشور) به تعداد ۵۸۵۸۷ مشترک برق (رتبه اول در کشور)
- مصرف بنزین به میزان ۷۱ هزار لیتر (رتبه دوم در کشور)
- مصرف گازوئیل به میزان ۱۲۲ میلیون و ۳۹۳ هزار لیتر (رتبه دهم در کشور)
- مصرف نفت سفید به میزان ۱۳ میلیون و ۲۴۰ هزار لیتر (رتبه اول در کشور)

بنابراین استفاده از سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک در این استان به دلیل عدم نیاز به مصرف سوخت و برق شهری که باعث کاهش هزینه های جاری دولت و کشاورزان می شود از اهمیت و جذابیت زیادی برخوردار است.

۱-۶- بررسی پتانسیل انرژی خورشیدی ایران و استان مازندران

ایران کشوری است که به نقل از ساتبا^۱ با وجود ۳۰۰ روز آفتابی در بیش از دو سوم آن و متوسط تابش ۵/۵-۴/۵ کیلووات ساعت بر متر مربع در روز، یکی از کشورهای دارای پتانسیل بسیار خوب در زمینه انرژی خورشیدی در منطقه است [۲۳] بطوریکه اگر تنها ۱ درصد از بیابان‌های ایران توسط پنل‌های خورشیدی پوشش داده شود، انرژی تولید شده پنج برابر بیشتر از تولید برق ناخالص سالانه کشور خواهد بود [۲۴]. اما اگرچه شدت این میزان تابش در استان‌های حاشیه دریاچه کاسپین مانند استان مازندران به نسبت نقاط دیگر کشور پایین‌تر است با اینحال این به معنی عدم توجه پذیری فنی این منطقه از کشور در حوزه بهره برداری از انرژی خورشیدی نیست. برای اثبات این ادعا پتانسیل انرژی خورشیدی کشور آلمان به عنوان پیشرو ترین کشور قاره اروپا در زمینه احداث نیروگاه‌های خورشیدی را با کشور ایران مقایسه می‌کنیم. مطابق شکل (۱-۱)، اطلس‌های خورشیدی دو کشور ایران و آلمان، مستعدترین بخش آلمان جنوب این کشور است که دارای حداکثر تابش روی سطح افق به میزان ۱۲۰۰ کیلووات ساعت بر متر مربع می‌باشد [۲۵] این درحالیست که بدترین سناریوی تابشی در ایران (رامسر، استان مازندران) دارای تابش به میزان ۱۳۸۷ کیلووات ساعت بر متر مربع است! با این وجود آلمان هم اکنون با ۴۲ گیگاوات نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک (رتبه اول در اروپا، چهارم در دنیا [۴]) دارای اختلاف معناداری در ظرفیت منصوبه نیروگاه‌های PV در مقایسه با ایران (۲۷۰ مگاوات) دارد [۲۳].

^۱ سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری برق ایران



شکل ۱-۱- مقایسه میانگین تابش خورشیدی روی سطح افق ایران و آلمان [۲۵]

۲ فصل دوم:

مروری بر کارهای پیشین

۲-۱- مروری بر پژوهش‌های پیشین

در این فصل ابتدا بخشی از تحقیقات انجام‌شده در زمینه‌ی سیستم‌های پمپاژ آب فتوولتائیک و بررسی پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد آنها آورده شده است. سپس به بررسی استفاده از روش‌های نوین عددی و هوش مصنوعی در تعیین ظرفیت هر یک از اجزاء و نیز نوآوری‌های بکارگرفته شده برای افزایش عملکرد کلی PVWPS در مقالات مختلف پرداخته شده است. همچنین در انتهای فصل نیز نکات مغفول مانده در کارهای پیشین به عنوان مبنای پژوهش حاضر معرفی شده و فواید اقتصادی و زیست محیطی سیستم حاضر تشریح شده است. راوات و همکاران [۱] در یک مطالعه مروری به بررسی انتخاب مناسب تکنولوژی و اندازه تجهیزات برای عملکرد پایدار و کارآمد سیستم PV پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که گشتاور موتور، مدیریت بار و منحنی کارایی اینورترها عوامل عمده‌ای برای تعیین اندازه بهینه پمپ آب فتوولتائیک، سیستم‌های PV مستقل^۱ و متصل^۲ به شبکه می‌باشند. همچنین اگر میزان دسترس پذیری به منابع اطلاعات پایین باشد، روش‌های هوشمند برای بهینه‌سازی اندازه سیستم‌های PV مورد استفاده قرار می‌گیرند. به عنوان مثال شبکه عصبی مصنوعی (ANN^۳)، الگوریتم ژنتیک (GA^۴) و منطق فازی (FL^۵) برای بهینه‌سازی اندازه تجهیزات، بسیار دقیق و قابل اعتماد هستند اما انجام آنها پیچیده است. این درحالیست که اگر داده‌های بلند مدت در دسترس باشند، روش‌های عددی برای بهینه‌سازی سایزینگ سیستم‌های PV عالی هستند. سونتاکه و همکاران [۹] یک بررسی جامع در مورد اجزای مختلف سیستم پمپاژ آب خورشیدی PV شامل پنل‌های خورشیدی، پمپ‌ها، مکانیزم ردیابی و کنترلر پمپ‌ها انجام دادند. نتایج نشان داد که سیستم پمپاژ آب خورشیدی PV به عنوان یک روش عمده پمپاژ در کشورهای در حال توسعه برای تامین آب آشامیدنی و آبیاری خواهد بود. همچنین آنها اعلام داشتند که در صورت تنظیم دستی شیب بهینه

^۱ Off-Grid or Stand alone

^۲ On-Grid or Grid-connected

^۳ Artificial Neural Networks

^۴ Genetic Algorithm

^۵ Fuzzy Logic

پنل‌ها در روز، مجموع خروجی سیستم پمپاژ تقریباً به اندازه ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش خواهد یافت. مایلی و همکاران [۱۴] به امکان سنجی فنی و اقتصادی سیستم پمپاژ خورشیدی PV برای یک مزرعه شالیکاری برنج در استان گیلان پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که میانگین ماهانه شاخص شفافیت آسمان استان گیلان در دوره آبیاری از ۰/۵۴ تا ۰/۵۷ می‌باشد و این نشان دهنده پتانسیل خوب این استان برای استفاده از سیستم پمپاژ فتوولتائیک بود. در ادامه اگرچه هزینه اولیه PVWPS حدود ۷ برابر سیستم پمپاژ متداول بود اما هزینه کل چرخه عمر در پایان دوره ۲۵ ساله آبیاری برای سیستم پمپاژ بنزینی تقریباً ۱/۵۶ برابر PVWPS بوده است. بنابراین استفاده از PVWPS از لحاظ اقتصادی در طولانی مدت امکان پذیر و منطقی است. ریشف و همکاران [۲۶] اعتقاد داشتند که برای عملکرد بهینه، کیفیت بار و اندازه آرایه PV بایستی به درستی با یکدیگر مطابقت داشته باشند. تائو و همکاران [۲۷] نیز بر روی بهینه‌سازی اندازه یک سیستم پمپ آب فتوولتائیک مستقل از شبکه به همراه سیستم ذخیره سازی پمپ در یک جزیره دور افتاده از شبکه در هنگ کنگ کار کردند. هدف آنها حداقل کردن مقدار هزینه همتراز شده انرژی (LCOE^۱) بوسیله الگوریتم ژنتیک برای جلوگیری از پدید آمدن ساعات بی برقی بوده است. یحیائویی و همکاران [۲۸] به ارائه الگوریتمی جهت سایزینگ یک سیستم پمپ آب فتوولتائیک با توجه معیارهای ایمنی بانک باتری، برآورد حجم آب مورد نیاز محصولات و اطمینان از عملکرد مداوم پمپ پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که تقاضای آب در طی دوره رویشی محصولات با حداقل استفاده از بانک باتری و حداقل هزینه پوشش داده شد و الگوریتم پیشنهادی توانست خودمختاری^۲ سیستم (پایداری سیستم در روزهای غیر آفتابی سال) و عملکرد ایمن باتری‌ها را در کنار تامین حجم آب مورد نیاز برای آبیاری تضمین کند. آنها همچنین تاکید داشتند که حجم آب مورد نیاز عمدتاً به مرحله رشد محصول و نیز تبخیر و تعرق از سطح گیاهان بستگی دارد. خطیب و همکاران [۲۹] در یک مطالعه مروری به روش‌های بهینه‌سازی اندازه

^۱ Levelized Cost of Energy

^۲ Autonomy

سیستم‌های PV مستقل از شبکه و تعیین اندازه اینورتر پرداختند. نتایج نشان داد که بهینه‌سازی سیستم PV به شدت به متغیرهای هواشناسی نظیر انرژی خورشیدی، دمای محیط و سرعت باد (در حالت ترکیب با توربین بادی) بستگی دارد. همچنین آنها تاکید داشتند که عمده روش‌های بهینه‌سازی بر اساس روش‌های شبیه‌سازی عددی است که از سری زمانی طولانی داده‌های آب و هوایی استفاده می‌کنند و در عین حال روش‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک و شبکه عصبی مصنوعی نقش مهمی در بهبود کاربرد تکنیک‌های بهینه‌سازی ایفا می‌کنند. برنامه انرژی‌های تجدیدپذیر نامیبیا یک مطالعه در مورد امکان سنجی پمپ آب خورشیدی را در کشور نامیبیا انجام داد. این گزارش مبنی بر این بود که برای چاه‌های کوچک و متوسط، PVWPS به دلیل هزینه‌های چرخه عمر پایین، به صرفه‌تر از پمپ‌های دیزلی بود [۳۰]. ایوب حسین و همکاران [۳۱] به ارزیابی عملکرد فنی و اقتصادی پمپاژ PV برای آبیاری برنج و محصولات غیر برنج در کشور بنگلادش پرداختند و در نهایت مشخص شد که آبیاری از طریق پمپاژ خورشیدی فتوولتائیک به لحاظ فنی برای محصولات برنج و غیربرنج مناسب بود این درحالیست که به لحاظ اقتصادی فقط برای گروه سبزیجات (گوجه فرنگی و بادمجان) و گندم سودآور اما برای برنج اقتصادی نبوده است. استوپاتو و همکاران [۳۲] به بهینه‌سازی سیستم دوگانه فتوولتائیک و سیستم ذخیره سازی پمپ، به روش الگوریتم ازدحام ذرات^۱ (PSO) با هدف تامین برق و آب یک روستای کوچک در نیجریه و نیز بهبود کارایی سیستم و کاهش هزینه‌های استفاده از سوخت دیزل پرداختند. در نهایت نه تنها مقدار آب مورد نیاز برای اهداف آبیاری و خانگی فراهم شد، بلکه همچنین تا ۹ درصد از تقاضای انرژی برق روستا با مساحتی از PV به اندازه حدود ۱۰ متر مربع مرتفع شد. بن قانم و همکاران [۳۳] نیز به بررسی تعیین تاثیر هد پمپاژ بر سیستم پمپاژ PV با استفاده از پیکربندی بهینه آرایه فتوولتائیک برای تامین برق یک موتورپمپ هیدرولیک نوع جریان مستقیم (DC) تحت شرایط محیطی شهر مدینه در عربستان پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که دبی پمپاژ عمدتاً به دو عامل هد پمپاژ و تابش خورشیدی کل بستگی

^۱ Particle Swarm Optimization

دارد. بطوریکه دبی با افزایش تابش افزایش می‌یابد اما نه به صورت خطی (افزایش کارایی سیستم با افزایش تابش خورشیدی تا زمانی که پمپ به حداکثر توان خود برسد افزایش می‌یابد). این درحالیست که با افزایش هد پمپاژ، دبی خروجی کاهش می‌یابد. از طرفی بهره‌وری سیستم با کاهش هد پمپاژ در زمان تابش خورشیدی کم، افزایش می‌یابد. همچنین افزایش اندازه آرایه PV به طور کلی دبی و بهره‌وری سیستم را افزایش می‌داد. مارکوارت و همکاران [۳۴] یک رویکرد نسبتاً متفاوت را برای عرضه قابلیت اطمینان سیستم با استفاده از مفهوم احتمال از دست دادن بار (LLP^1) جهت اندازه‌گیری ظرفیت مورد نیاز سیستم PV بر اساس استفاده مستقیم از داده‌های تابش خورشید در نزدیکی محل نصب سیستم PV توسعه دادند. با استفاده از ساختار ساده هندسی، آنها نشان دادند که چگونه داده‌ها می‌توانند برای تامین انرژی بدون وقفه در بار جهت تعیین پیکربندی سیستم در طول مدت زمان مشخص مورد استفاده قرار گیرند. همچنین یکی دیگر از مزایای روش آنها عدم نیاز به تولید مصنوعی سری زمانی داده‌های تابش خورشیدی بود. اما کلوساس و همکاران [۳۵] نگاه متفاوتی به سیستم‌های پمپاژ آب فتوولتائیک داشته‌اند. در واقع آنها به بررسی توسعه فناوری و محدودیت فنی، اقتصادی و مالی پمپاژ آب خورشیدی برای آبیاری با توجه به تاثیرات سیاست‌های خاص دولتی مانند یارانه‌ها، دسترسی به سرمایه و بازار و نیز پایداری زیست محیطی و فقدان ارزیابی و درک منابع آب‌های زیرزمینی در اکثر پروژه‌های اینچنینی پرداختند. همچنین مطرح کردن خط مشی‌های بالقوه پذیرش در مورد ضرورت بهبود پایداری مالی و محیطی این تکنولوژی‌ها از دیگر اهداف پژوهشی آنها بود. در پایان آنها خاطر نشان کردند که باید قبل از اینکه هر پروژه آبیاری خورشیدی بتواند در نظر گرفته شود، مسائل مربوط به پایداری در ارتباط با در دسترس بودن و برداشت آب‌های زیرزمینی در آینده با نظارت موثر مورد بررسی و توجه قرار گیرد. بنابراین، یک رویکرد سیاستی پایدار و یکپارچه برای پیاده سازی این نوع تکنولوژی برای تصمیم‌گیرندگان و متخصصان در جهت رفع شکاف توسعه، پایداری منابع آب و نیازهای تامین انرژی مورد نیاز است. بصارتی و همکاران [۸] به ارزیابی پتانسیل استفاده از

¹ Loss of Load Probability

تابش خورشید در مناطق مختلف ایران پرداختند و متذکر شدند که بخش‌های مرکزی و جنوبی کشور پتانسیل بالاتری نسبت به سایر بخش‌ها مخصوصاً بخش‌های شمالی کشور در زمینه تزریق برق خورشیدی به شبکه، کاهش مصرف سوخت و انتشار گازهای گلخانه‌ای دارند. همچنین آنها در ادامه نتیجه گرفتند که با استفاده از حالت‌های ردیابی مسیر حرکت خورشید، توانایی استفاده از انرژی خورشیدی به میزان قابل توجهی افزایش می‌یابد و در ایران نیز سیستم ردیاب تک محوره از نوع شرقی-غربی نسبت به سایر حالت‌های ردیابی برتری دارد. والر و همکاران [۳۶] جنبه‌های فنی و اقتصادی استفاده از محرک‌های سرعت متغیر (VSD^۱) در سیستم‌های پمپاژ فتوولتائیک را نسبت به سیستم‌های پمپاژ PV متداول و دیزلی با هدف آبیاری در برزیل مقایسه و بررسی کردند. نتیجه این شد که با توجه به هزینه‌های بالای پمپ‌ها و کنترلرهای اختصاصی پمپ‌های خورشیدی، هزینه‌های اولیه و هزینه‌های چرخه عمر برای سیستم‌های پمپاژ فتوولتائیک مجهز به محرک سرعت متغیر، حتی با ظرفیت‌های بیشتر ماژول‌های PV در مقایسه با سیستم‌های پمپاژ فتوولتائیک متداول پایین‌تر است. همچنین استفاده از یک محرک سرعت متغیر می‌تواند استفاده از پمپ‌های تولید شده محلی که لزوماً به طور خاص برای کاربردهای فتوولتائیک طراحی نشده است را فراهم سازد، بنابراین جایگزینی و تعمیر و نگهداری آنها را تسهیل می‌کند. با این حال، یک سیستم بانکی مبتنی بر وام هنوز مورد نیاز است، زیرا هزینه اولیه برای کشاورز روستایی به اندازه کافی ارزان نیست. زمان بازپرداخت وام و نیز سرمایه گذاری اولیه می‌تواند از طریق کشت محصولات با ارزش بالا و یا کشت بی وقفه گیاهان مختلف بطور متناوب (برای حفظ حاصلخیزی زمین) بیش از پیش کاهش پیدا کند. همچنین استفاده از سیستم پمپاژ فتوولتائیک در طولانی مدت نسبت به سیستم پمپاژ دیزل به ویژه در مناطقی با منابع خورشیدی بالا ارزان‌تر خواهد بود. محسن و همکاران [۳۷] به طراحی یک رویکرد به روش تکرار عددی براساس اهداف فنی و اقتصادی برای یافتن پیکربندی بهینه آرایه PV و اندازه مطلوب مخزن ذخیره‌ی آب پرداختند. مدل پیشنهادی آنها کم هزینه و دارای سطح بالایی از قابلیت اطمینان در

^۱ Variable Speed Drive

طول ساعات عملیاتی خود بوده و در تمام سال به استثنای ۹ روز در دسترس و قابل استفاده است و تقاضای آب را به خوبی برآورده می‌کند. طالبی زاده و همکاران [۳۸] زاویه شیب بهینه و زاویه آزیموت سطح را برای پنل خورشیدی جهت دریافت حداکثر تابش خورشیدی با استفاده از الگوریتم ژنتیک برای یک منطقه از ایران محاسبه کردند. آنها به این نتیجه رسیدند که الگوریتم ژنتیک یک روش مفید برای پیدا کردن زاویه بهینه است به ویژه هنگامی که تعداد پارامترهای مستقل زیاد باشد. همچنین نصب پنل خورشید در زاویه شیب بهینه و زاویه آزیموت ساعتی، انرژی ورودی را به طور قابل توجهی در مقایسه با تنظیم در زوایای بهینه روزانه افزایش می‌دهد. این یعنی اگر ردیاب‌های خورشیدی برای تغییر زاویه‌ها در هر ساعت اعمال شوند، انرژی زیادی از پنل‌ها به دست می‌آید و در نتیجه استفاده از ردیاب‌های خورشیدی می‌تواند مفید و سودمند باشد. اما مقدار انرژی ورودی به صورت روزانه تقریباً همانند ماهانه است و در نتیجه، استفاده از یک ردیاب خورشیدی به منظور تغییر زاویه پنل‌ها در هر روز مقرون به صرفه نیست. علاوه بر این نتایج نشان داد که زاویه بهینه آزیموت در حالات روزانه، ماهانه و سالانه برای دریافت حداکثر انرژی خورشیدی صفر است. زاویه آزیموت همان زاویه جهت‌گیری پنل‌ها نسبت به جنوب می‌باشد. طبائی و همکاران [۳۹] به بررسی تاثیر بازتابنده‌ها بر روی عملکرد پمپ آب فتوولتائیک همراه با پاشش آب روی سطح پنل‌های PV به منظور افزایش راندمان سیستم پرداختند. آنها نتیجه گرفتند که پاشش آب بر روی سطح پنل علاوه بر اینکه باعث کاهش دمای سطح پنل و افزایش راندمان آن به میزان ۱۰ درصد می‌شود، بخاطر ضریب شکست آب، به میزان ۴ تا ۵ درصد از افت انعکاسی پنل هم جلوگیری می‌کند. همچنین استفاده از بازتابنده از جنس فویل آلومینیوم نسبت به فویل استیل ۳۰۴ باعث افزایش دبی خروجی از پمپ به میزان ۱۴/۳ درصد (۴۳ درصد بیشتر از فویل استیل ۳۰۴) و توان تولیدی بمیزان ۱۲ درصد (۳۲ درصد بیشتر از فویل استیل ۳۰۴) بدلیل توانایی بیشتر فویل آلومینیومی در بازتابش پرتوهای خورشید با طول موج مفید برای تبدیل به انرژی الکتریسیته می‌شود. در نهایت توان خروجی از پنل‌ها در حالت استفاده از بازتابنده‌ها و پاشش آب به میزان ۴۷/۵ درصد افزایش پیدا کرده است.

۲-۲- برجستگی مطالعه حاضر

همانطور که گفته شد یکی از مشکلات عمده فراگیر نشدن سیستم‌های فتوولتائیک و کاربردهای آن نظیر پمپاژ آب در واقع هزینه‌های اولیه بالای آنهاست. در این مطالعه علاوه بر بهینه‌سازی اندازه ماژول‌های PV به عنوان یکی از تجهیزات گران‌قیمت در مجموعه PVWPS، به بررسی طرح فروش برق تولیدی از آرایه فتوولتائیک در روزهای غیر آبیاری سال به منظور جبران هزینه‌های اولیه و کسب درآمد ماهیانه برای کشاورزان نیز خواهیم پرداخت. این روش با توجه به مشوق‌های مالی دولت در این حوزه حتی می‌تواند باعث تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی به محلهایی برای احداث نیروگاه‌های فتوولتائیک برای فروش برق به شبکه جهت کسب درآمد برای کشاورزان به جای کشت محصول و به طبع آن جلوگیری از کاهش منابع آب‌های زیرزمینی شود که به این ترتیب دیگر نیازی به خرید زمین جدید برای احداث نیروگاه نمی‌باشد. این موضوع خصوصاً در استان‌های کم آب کشور نظیر استان اصفهان که وضعیت کشاورزی در زمین‌های آن به دلیل کمبود آب، سال به سال وخیم‌تر می‌شود اهمیت بیشتری پیدا می‌کند خصوصاً این استان دارای ساعات آفتابی قابل توجهی در سال می‌باشد که نمایانگر پتانسیل بالای آن در حوزه بهره‌برداری از انرژی خورشیدی است. همچنین تغییر کاربری زمین‌های کشاورزی کم آب به نیروگاه‌های PV باعث کاهش هزینه‌های دولت به دلیل عدم پرداخت یارانه یا حق نکاشت به کشاورزان نیز خواهد شد. البته موضوع کم آبی و بهره‌وری پایین آبیاری در مزارع کشاورزی تنها مربوط به استان‌های گرم و خشک کشور نمی‌باشد و در صورت عدم آینده نگری، نداشتن برنامه ریزی و توجهات لازم، خطر خشکسالی و کاهش منابع آب‌های زیرزمینی حتی استان‌های شمالی کشور مانند استان مازندران را نیز تهدید خواهد کرد. اما در ادامه، در این مطالعه به بررسی تاثیرات زیست محیطی جایگزینی PVWPS با سیستم‌های پمپاژ متداول (شبکه سراسری برق و دیزلی) از جمله میزان صرفه‌جویی در انتشار آلاینده کربن دی اکسید حاصل از سوخت‌های فسیلی به عنوان یکی از گازهای گلخانه‌ای مهم در پدیده گرمایش زمین در کنار میزان آلودگی صوتی هر دو سیستم خواهیم پرداخت که توسط اغلب نویسندگان کمتر مورد توجه قرار گرفته است.

۳ فصل سوم:

مدل سازی فنی، اقتصادی و زیست محیطی اجزای مختلف سیستم

پمپاژ آب فتوولتائیک

۳-۱-مدلسازی سیستم پمپاژ آب خورشیدی فتوولتائیک

انتخاب تکنولوژی مناسب و تعیین ظرفیت بهینه اجزاء برای عملکرد پایدار، کارآمد و مقرون به صرفه PVWPS ضروری است، زیرا هزینه اولیه این نوع سیستم‌ها خصوصا در کشورهای در حال توسعه بالا می‌باشد. همچنین این سیستم‌ها باید به درستی با توجه به مشخصات سایت، سطح زمین در دسترس، نیاز بار، الگوی بار و شرایط محیطی به منظور استفاده از منابع موجود به صورت موثر و اقتصادی طراحی شوند چرا که با انتخاب مناسب اجزاء، بازده متوسط روزانه سیستم نیز بهبود پیدا خواهد کرد. بدین منظور تعدادی از معادلات مدل‌سازی، تکنیک‌ها و پارامترهای فنی، اقتصادی و محیطی برای طراحی یک سیستم پمپاژ آب PV بر اساس کاربرد باید توسعه پیدا کنند تا عملکرد مطلوب این نوع سیستم‌ها را تضمین کنند. طراحی PVWPS بستگی به میزان تابش خورشید، بار هیدرولیکی (حجم دبی و هد)، پیکربندی الکتریکی مجموعه موتورپمپ‌ها و سیستم پشتیبان (در صورت لزوم) دارد؛ زیرا عملکرد هر پمپ آب خورشیدی به عواملی مانند متغیرهای هواشناسی، مشخصات ماژول فتوولتائیک PV (بازده تبدیل و زاویه شیب) و ویژگی‌های موتور پمپ هیدرولیک (ویژگی‌های جریان-ولتاژ مجموعه موتورپمپ، هدهای استاتیک، دینامیک و تلفات اصطکاکی لوله) وابسته است [۴۰] که در ادامه به بررسی آنها پرداخته خواهد شد.

۳-۲-مشخصات جغرافیایی منطقه مورد بررسی

از آنجا که محصول مورد نظر جهت آبیاری، محصول برنج می‌باشد از اینرو مکان مورد بررسی شهرستان ساری مرکز استان مازندران به عنوان یکی از قطب‌های تولید برنج در کشور انتخاب شده است. شهرستان ساری در شرق استان مازندران با مختصات جغرافیایی ۵۳ درجه و ۶ دقیقه طول شرقی و ۳۶ درجه و ۵۷ دقیقه عرض شمالی و ۳۲ متر ارتفاع از سطح دریا در منطقه زمانی

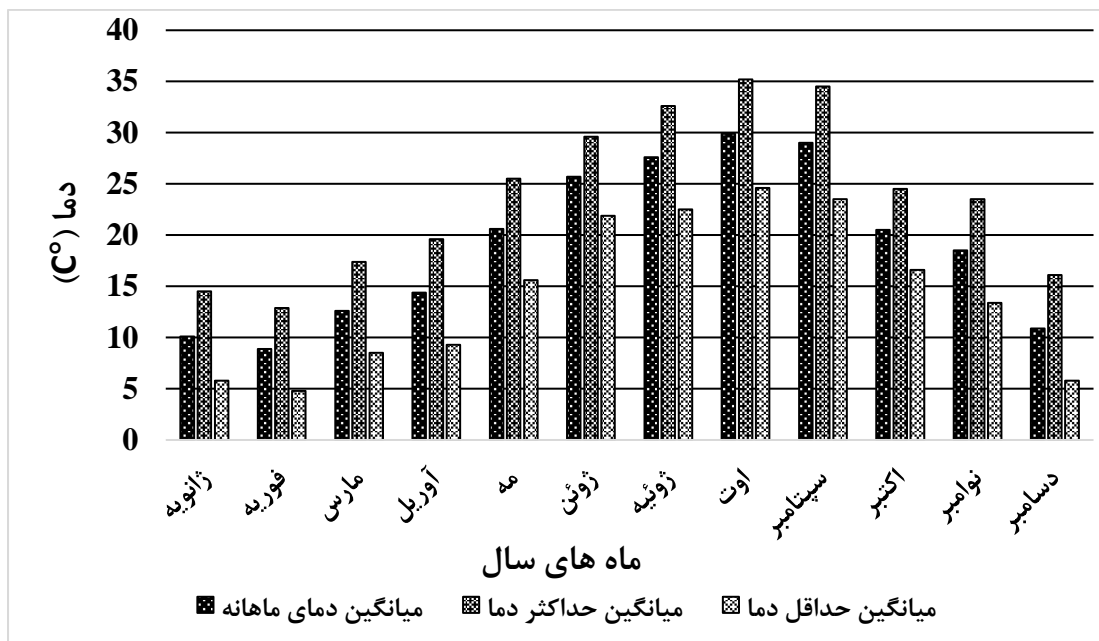
UTC+3.5 قرار دارد. این حوزه از شمال با دریاچه‌ی کاسپین، از شرق با شهرستان نکا، از غرب با شهرستان قائمشهر و از جنوب به حوزه آبریز تجن محدود شده است.

۳-۳- وضعیت هواشناسی مورد مطالعه

در این مطالعه برای اخذ داده‌های هواشناسی نظیر دمای محیط، رطوبت نسبی، میزان بارندگی، سرعت باد و میزان ساعات آفتابی برای منطقه مورد نظر از بانک اطلاعاتی اداره هواشناسی استان مازندران [۴۱] استفاده شده است؛ اما بدلیل نبود اطلاعات مربوط به تابش و نیز شاخص شفافیت آسمان^۱ در ایستگاه هواشناسی استان، از داده‌های پایگاه PVGIS (مرکز تحقیقات مشترک اتحادیه اروپا)^۲ شامل داده‌های هواشناسی ماهواره‌ای برای خاورمیانه از جمله کشور ایران مربوط به سال ۲۰۱۶ [۴۲] و نیز نرم افزار PVsyst استفاده شده است. نرم‌افزار PVsyst نرم افزاری جامع و کاربردی در زمینه کار با سیستم‌های خورشیدی است که شامل مجموعه ابزارهای لازم برای مطالعه و تحقیق، اندازه گیری، شبیه سازی و آنالیز داده‌های سیستم‌های فتوولتائیک است که توسط دپارتمان انرژی دانشگاه ژنو توسعه داده شده و در سال ۲۰۰۷ بصورت تجاری به دنیا عرضه شد [۴۳]. از مزایای اصلی این نرم‌افزار می‌توان به سرعت شبیه‌سازی بالا، تجزیه و تحلیل رفتار سیستم‌های PV، بانک اطلاعاتی قدرتمند در زمینه اطلاعات هواشناسی و سازندگان تجهیزات فتوولتائیک و نیز گزارش‌گیری دقیق از سیستم‌های شبیه سازی شده نام برد. همچنین برای دستیابی به تمامی اطلاعات هواشناسی می‌توان از نرم افزارهای HOMER، RETSCREEN و TRNSYS نیز بهره برد که همگی از داده‌های تصاویر ماهواره‌ای ناسا و یا ایستگاه ایجاد داده‌های اقلیمی METEONORM به عنوان مرجع استفاده می‌کنند. برای به دست آوردن تخمین خام از شرایط آب و هوایی منطقه مورد نظر، برخی از داده‌های انتخاب شده از ایستگاه هواشناسی مازندران در شکل‌های زیر نشان داده شده است. شکل (۳-۱) تغییرات ماهانه میانگین دمای روزانه را نشان می‌دهد.

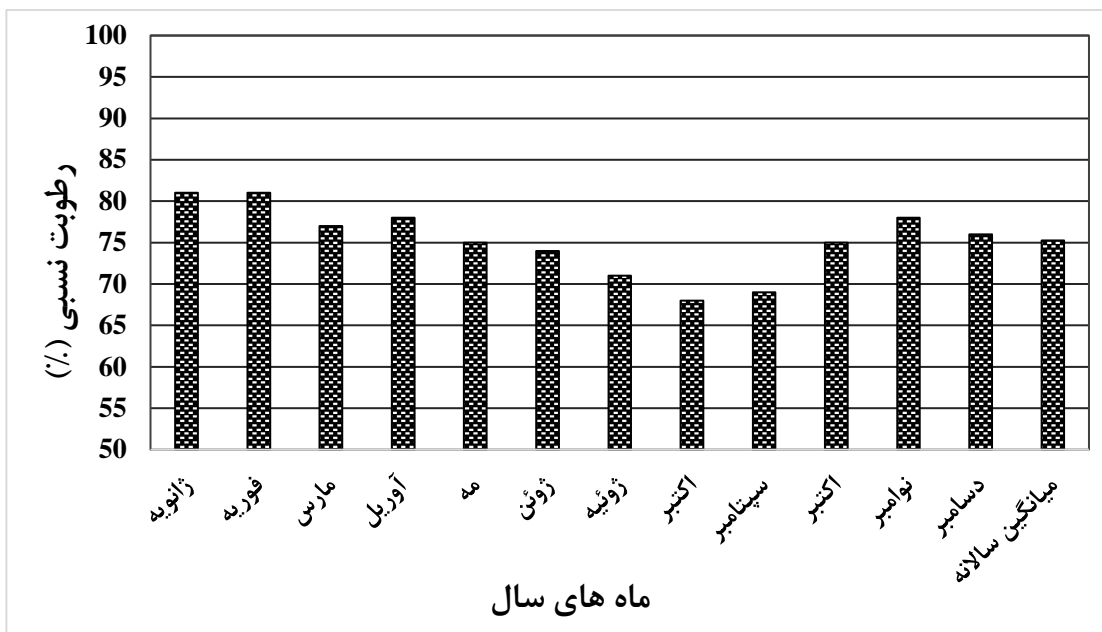
^۱ Clearness index

^۲ European Commission Joint Research Center



شکل ۳-۱- متوسط دمای محیط در ماه های دوره آبیاری برای ساری (۲۰۱۶-۲۰۱۷) [۴۱]

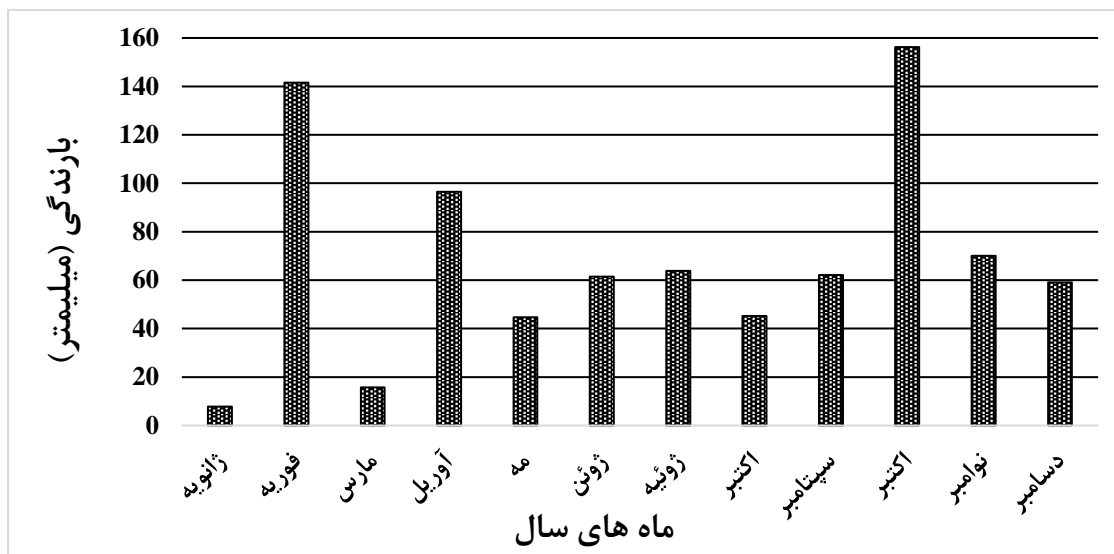
در ماه های دوره آبیاری، میانگین دمای محیط به $24/5$ درجه سانتیگراد می رسد، هرچند که بیشترین میانگین دمای ثبت شده در این بازه زمانی با $29/9$ درجه سانتیگراد مربوط به ماه اوت و کمترین آن با $14/4$ درجه سانتیگراد برای ماه آوریل می باشد. همچنین میانگین حداکثر دمای ماهانه در طول سال مربوط به ماه اوت با $35/2$ درجه سانتیگراد و متوسط حداقل دمای ثبت شده نیز با $4/8$ درجه سانتیگراد برای ماه فوریه بوده است.



شکل ۳-۲- میانگین رطوبت نسبی در ماه های مختلف سال برای ساری (۲۰۱۷-۲۰۱۶) [۴۱]

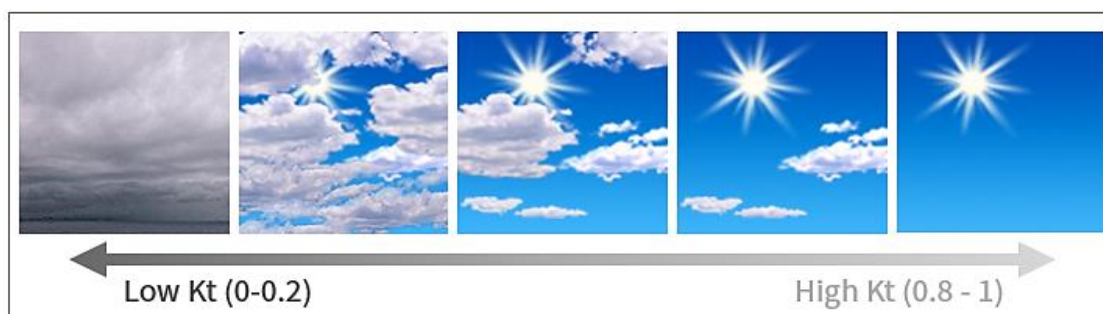
شکل (۲-۳) میانگین رطوبت نسبی در ماه های مختلف سال را برای ساری نشان می دهد. میانگین مقدار رطوبت نسبی در سال حدود ۷۲/۲۵٪ است. این مقدار بالای رطوبت نسبی که یکی از ویژگی های اصلی این منطقه است برای رشد برنج ضروری است.

استان مازندران، ساحل جنوبی دریاچه کاسپین، آب و هوای متفاوتی نسبت به سایر نقاط گرم و خشک ایران دارد. این منطقه دارای آب و هوای معتدل و مرطوب با میانگین بارش سالانه حدود ۸۲۴/۴ میلی متر است که این میزان از میانگین بارندگی سالانه در ایران (حدود ۲۳۶ میلی متر)، بسیار بیشتر است [۱۴]. شکل (۳-۳) میزان کل بارش را نشان می دهد. بارش سنگین در پاییز، زمستان و اوایل بهار در برخی از مخازن طبیعی جمع آوری می شود و به عنوان منبع تامین آب در طول دوره آبیاری استفاده می شود.



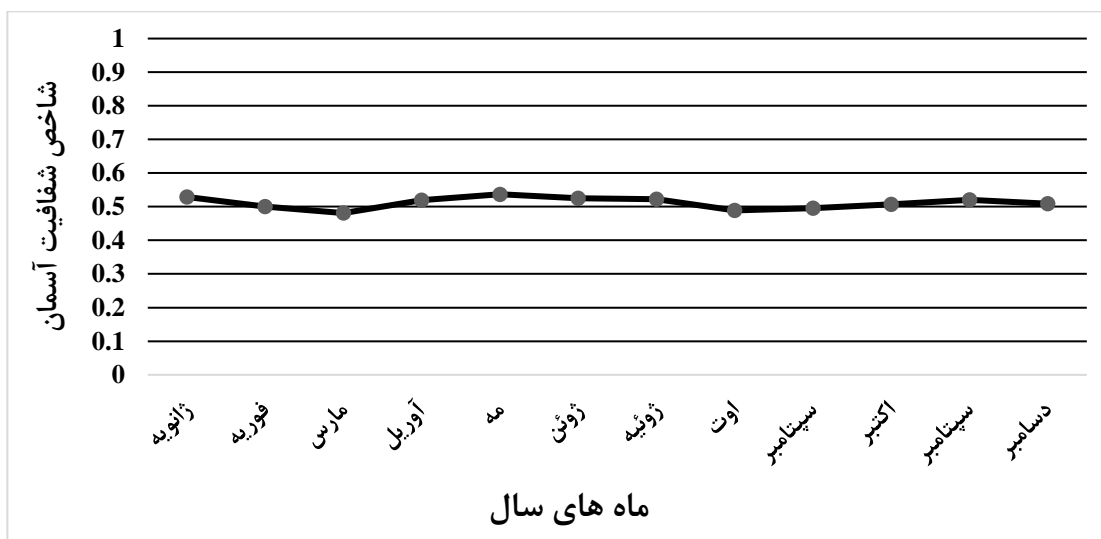
شکل ۳-۳- میانگین میزان بارندگی ماه های مختلف سال برای ساری (۲۰۱۶-۲۰۱۷) [۴۱]

این میزان بارش، مقدار آب مورد نیاز برای آبیاری در طول بهار و تابستان را تضمین می کند. همچنین با توجه به اینکه روزهای کاملاً ابری در این منطقه وجود دارد، بنابراین محاسبه میانگین شاخص شفافیت آسمان ضروری است. این پارامتر بدون بعد به عنوان نسبت کل تابش خورشیدی فرودآمده روی سطح افقی پنل به تابش اندازه گیری شده در خارج از جو برای یک دوره زمانی معین تعریف می شود [۴۴] که همواره عددی بین ۰ تا ۱ می باشد و به آن ضریب صافی هوا نیز می گویند. در واقع مطابق شکل زیر، عدد ۰ به معنای یک روز تماماً ابری و عدد ۱ نمایانگر یک روز کاملاً صاف و آفتابی می باشد.



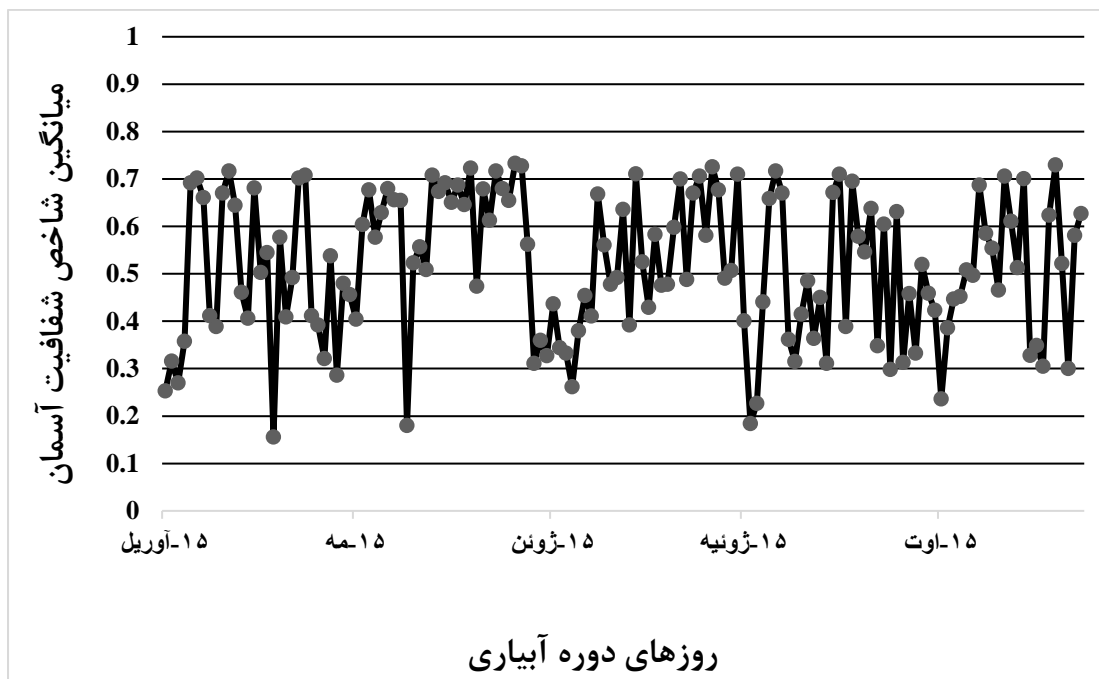
شکل ۳-۴- بازه تغییرات شاخص شفافیت آسمان در شرایط جوی مختلف

تغییرات شاخص شفافیت آسمان برای منطقه مورد مطالعه در طول ماه‌های مختلف سال و نیز در مدت زمان دوره آبیاری به ترتیب در شکل های (۳-۵) و (۳-۶) قابل مشاهده است. این داده‌ها از بانک اطلاعاتی پایگاه ایجاد داده‌های اقلیمی Meteonorm برای منطقه موردنظر در فاصله زمانی سال‌های ۱۹۸۰ تا ۲۰۰۰ استخراج شده است که توسط نرم افزار PVsyst برای زمان حاضر با استفاده از روش درون‌یابی تعمیم داده شده است.



شکل ۳-۵- تغییرات میانگین شاخص شفافیت آسمان برای شهرستان ساری در ماه های مختلف سال در نرم افزار PVsyst

مطابق شکل (۳-۵) میانگین سالانه این شاخص برای مختصات شهرستان ساری ۰/۵۱۲ می‌باشد هرچند که میانگین این شاخص در طول روزهای دوره آبیاری به ۰/۵۱۸ افزایش پیدا می‌کند (شکل ۳-۶).



شکل ۳-۶- تغییرات میانگین شاخص شفافیت آسمان برای شهرستان ساری در روزهای دوره آبیاری در نرم افزار PVsyst

این داده ها در مقایسه با داده‌های اسلام و همکاران [۴۵] در ابوظبی (با شاخص شفافیت سالانه ۰/۵۸ و شاخص شفافیت ۰/۵۹ در مدت زمان دوره آبیاری) نشان می‌دهد که شهرستان ساری یک کاندید خوب برای استفاده از سیستم PVWPS است.

۳-۴- نیاز آبی محصول و تعیین دبی بهینه جهت پمپاژ

گیاه مورد آبیاری در این مطالعه، محصول برنج می‌باشد. الگوی کشت برنج از نوع زودرس و رقم آن در اکثر نقاط منطقه مورد مطالعه، طارم محلی است که به روش سنتی کرتی غرقابی^۱ آبیاری می‌شود. به طور کلی مصرف آب در دوره رشد برنج بالا است. با توجه به تحقیقات موسسه بین المللی برنج، هیچ اطلاعاتی در مورد مقدار آب آبیاری مورد استفاده در تمامی زمین های برنج در جهان وجود ندارد [۴۶]. با این حال میزان تقریبی ساعات آبیاری و نیز توزیع فراوانی آب مصرفی برنج در طول دوره

¹ Flooding basin irrigation

آبیاری با توجه به مترائ زمین در دسترس بر اساس آمار اداره آب منطقه ای شهرستان‌های آمل و محمودآباد در استان مازندران مطابق جداول (۱-۳) و (۲-۳) است.

جدول ۱-۳- توزیع فراوانی آب مصرفی برنج در ماه‌های مختلف سال به ازای یک هکتار

ماه	مجموع ساعات آبیاری	میزان آب پمپاژ شده (مترمکعب)	میزان آب پمپاژ شده (درصد)
فروردین	۴۵۰	۱۶۲۰	۱۸
اردیبهشت	۵۰۰	۱۸۰۰	۲۰
خرداد	۵۵۰	۱۹۸۰	۲۲
تیر	۶۲۵	۲۲۵۰	۲۵
مرداد	۳۷۵	۱۳۵۰	۱۵
مجموع (سالانه)	۲۵۰۰	۹۰۰۰	۱۰۰

جدول ۲-۳- توزیع فراوانی آب مصرفی برنج در ماه‌های مختلف سال به ازای میزان اراضی در دسترس (مترمکعب)

مترائ زمین (مترمربع)	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	کل آب پمپاژ شده (مترمکعب)
۲۰۰۰	۳۲۴	۳۶۰	۳۹۶	۴۵۰	۲۷۰	۱۸۰۰
۳۰۰۰	۴۸۶	۵۴۰	۵۹۴	۶۷۵	۴۰۵	۲۷۰۰
۴۰۰۰	۶۴۸	۷۲۰	۷۹۲	۹۰۰	۵۴۰	۳۶۰۰
۵۰۰۰	۸۱۰	۹۰۰	۹۹۰	۱۱۲۵	۶۷۵	۴۵۰۰
۶۰۰۰	۹۵۴	۱۰۶۰	۱۱۶۶	۱۳۲۵	۷۹۵	۵۳۰۰
۷۰۰۰	۱۱۳۴	۱۲۶۰	۱۳۸۶	۱۵۷۵	۹۴۵	۶۳۰۰
۸۰۰۰	۱۲۹۶	۱۴۴۰	۱۵۸۴	۱۸۰۰	۱۰۸۰	۷۲۰۰
۹۰۰۰	۱۴۵۸	۱۶۲۰	۱۷۸۲	۲۰۲۵	۱۲۱۵	۸۱۰۰
۱۰۰۰۰	۱۶۲۰	۱۸۰۰	۱۹۸۰	۲۲۵۰	۱۲۵۰	۹۰۰۰

بنابراین در سال برای یک هکتار زمین کشت برنج، حدود ۹۰۰۰ متر مکعب معادل $\frac{۳}{۶}$ مترمکعب بر ساعت (با توجه به ۲۵۰۰ ساعت آبیاری در طول سال) آبیاری صورت می‌پذیرد. گفتنی است که تمامی مقادیر بالا بصورت حدودی (و نه بهینه) و در شرایطی می‌باشد که کل نیاز آبی محصول از طریق چاه‌ها تامین شود از این‌رو در صورتیکه بخواهیم ۵۰ درصد آب موردنیاز را از چاه‌ها و مابقی را از نهرها و آب باران تامین کنیم تمامی اعداد موجود در جدول بالا به نصف کاهش پیدا خواهند کرد.

اما امروزه با توجه به افزایش سرانه مصرف آب در کشور، محدودیت منابع آبی، افزایش جمعیت، نیاز روزافزون کشور به امنیت غذایی و پایین بودن راندمان آبیاری در مزارع، بازنگری روش‌های آبیاری امری اجتناب ناپذیر بوده و در این راستا هر گونه تلاش در بخش کشاورزی به عنوان بزرگترین مصرف کننده آب و به‌ویژه زراعت برنج به عنوان پرمصرف‌ترین گیاه و رایج‌ترین کشت در شمال کشور قابل توجه است [۴۷]. همچنین از آنجا که برنج از یک سو به سبب قرارگیری در رده‌ی محصولات استراتژیک و از سوی دیگر وابسته بودن اقتصاد بخش قابل‌توجهی از جمعیت ساکن در مناطق شمالی کشور به کشت آن، نیازمند مدیریت جدید در زمینه آبیاری و مصرف آب با توجه به میزان آب در دسترس و تاثیرات عوامل محیطی و اقلیمی بر روی منابع آبی سطحی و زیر زمینی است. همچنین شناخت ویژگی‌های خاک و پارامترهای خاص محصول برای تخمین اندازه بهینه پنل‌های خورشیدی قبل از نصب نهایی جهت آبیاری هر گونه محصول در هر کشوری کاربردی به‌نظر می‌رسد [۴۸]. از این‌رو ابتدا برای یافتن میزان دقیق دبی مورد نیاز و در نهایت اندازه بهینه پنل‌های PV لازم به دانستن یکی از همین پارامترهای خاص محصول تحت عنوان نیاز آبی گیاه در طول دوره آبیاری است. نیاز آبی گیاه^۱ را می‌توان از طریق میزان بارش باران، آب‌های زیرزمینی و یا آبیاری از چشمه‌ها تامین نمود. همچنین برای رفع تلفات ناشی از تبخیر، انتقال، نفوذ و رواناب، نیاز خالص آبیاری^۲ (NIWR) باید محاسبه شود [۴۷ و ۴۹]. نیاز آبی محصول توسط تبخیر و تعرق گیاه^۳ بیان می‌شود که مجموع تبخیر و تعرق در شرایط مناسب رشد است. روش‌های محاسبه آن اغلب توسط سازمان غذا و کشاورزی سازمان ملل متحد^۴ به روش پنمن-مانتیت^۵ انجام می‌شود که البته با نرم افزار CROPWAT نیز می‌توان آن را محاسبه کرد. از این‌رو برای برآورد نیاز خالص آبیاری برنج (NIWR) از پارامترهایی مانند نیاز آب مصرفی گیاه (ET_c)، بارش موثر (ER) و نیاز آبی تحت (Wp) استفاده شده است.

¹ Crop Water Requirement

² Net Irrigation Water Requirement

³ Evapotranspiration Crop

⁴ Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)

⁵ FAO Penman monteith

برای محاسبه مقادیر فوق برای شرایط اقلیمی فعلی و آینده و سپس نیاز خالص آبیاری از رابطه زیر در مدل کراپ وات استفاده شده است:

$$ET_c = K_c \times ET_0 \quad (1-3)$$

در این رابطه K_c ضریب گیاهی و ET_0 تبخیر و تعرق پتانسیل می‌باشد. ET_c محاسبه شده از رابطه فوق، تبخیر تعرق گیاهی است که با مدیریت و شرایط زیست محیطی بهینه با موجودیت خوب آب و بدون هیچ محدودیتی رشد می‌کند. بارش موثر نیز با استفاده از روش سازمان حفاظت خاک آمریکا (USDA¹) در مدل کراپ وات به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{eff} = (P \times (125 - 0.2 \times 3 \times P)) / 125 \quad \text{for } P \leq \frac{250}{3} \text{ mm}$$

(2-3)

$$P_{eff} = \frac{125}{3} + 0.1 \times P \quad \text{for } P > \frac{250}{3} \text{ mm}$$

که در روابط بالا، P متوسط بارندگی در ماه مورد نظر بر حسب میلی متر و P_{eff} بارش موثر ماهانه محاسبه شده توسط مدل بر حسب میلی متر می‌باشد. برای محاسبه نیاز آبی تخت نیز باید توجه داشت که مقدار آب مورد نیاز آب تخت به خلل و فرج خاک و عمقی که باید اشباع شود بستگی دارد. آب مورد نیاز آب تخت بین ۱۰۰ تا ۳۰۰ میلی متر تغییر می‌کند. (۱۰۰۰ تا ۲۰۰۰ مترمکعب در هکتار). حداکثر نیاز آبی این مرحله در صورتیکه بارندگی نداشته باشیم یا کل ناحیه در مدت زمان محدودی تهیه شود مقدار فوق می‌باشد ولی در عمل به وقت بیشتری نیاز است که مدت آن بین ۳ تا ۱۰ روز بوده و به مقدار آب و نیروی کار بستگی دارد. نیاز آبی این مرحله نیز از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$W_p = (3-3) \quad \text{ارتفاع غرقاب پس از آب تخت} + (\text{درصد خلل و فرج خاک} \times \text{ضخامت لایه اولیه خاک سطحی})$$

در نهایت نیاز خالص آبیاری برنج از رابطه زیر بدست خواهد آمد:

$$NIWR = (ET_c + W_p) - P_{eff} \quad (4-3)$$

¹ United States Department of Agriculture

در رابطه فوق NIWR نیاز خالص آبیاری برنج (mm)، ET_c نیاز آب مصرفی گیاه (mm)، W_p نیاز آبی آب تخت (mm) و P_{eff} میزان بارش موثر (mm) می‌باشد.

۳-۵- انتخاب زوایای بهینه نصب ماژول‌های خورشیدی

شدت تابش خورشید روی یک ماژول PV در یک سایت بستگی به جهت‌دهی پنل‌ها و همچنین شرایط آب و هوایی دارد. در نتیجه توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک تحت تاثیر زاویه شیب و زاویه جهت‌گیری پنل قرار دارد. بنابراین لازم است پنل‌ها بر اساس یک زاویه شیب بهینه نصب شوند تا تابش خورشیدی دریافت شده توسط ماژول‌های PV را به حداکثر برساند. زاویه جهت‌گیری پنل تحت عنوان زاویه آزیموت^۱ تعریف می‌شود که همان زاویه جهت‌گیری پنل‌ها نسبت به جنوب می‌باشد. زاویه آزیموت پنل در حالات روزانه، ماهانه و سالانه با توجه به اینکه ایران در نیمکره شمالی قرار دارد برای دریافت حداکثر انرژی خورشیدی صفر است از این‌رو جهت‌گیری ماژول خورشیدی دقیقاً رو به جنوب خواهد بود [۴۹]. همچنین این کار به دلیل وجود تابش خورشید در دسترس بیشتر نسبت به جهت‌دهی پنل‌ها در موقعیت شمالی، در نهایت باعث کوچکتر شدن اندازه آرایه PV خواهد شد [۵۰]. زاویه شیب پنل نیز یکی از مهمترین پارامترهای کسب انرژی خورشیدی توسط ماژول‌های PV است که به پارامترهایی نظیر فصول مختلف سال و موقعیت جغرافیایی محل بستگی دارد. برای استفاده حداکثری از انرژی خورشیدی باید پنل‌ها را در زاویه شیب بهینه نصب کرد که معمولاً آن را برابر با عرض جغرافیایی در نظر می‌گیرند [۴۹]. همچنین مقدار زاویه شیب بهینه برای معیار تابستانه برابر با ۱۵ درجه کمتر از عرض جغرافیایی و برای حالت زمستانه بلعکس؛ یعنی ۱۵ درجه بیشتر از عرض جغرافیایی توصیه می‌شود [۵۱ و ۵۲]. اما در این مطالعه برای رسیدن به یک زاویه شیب بهینه و برخی اطلاعات هواشناسی مدنظر اعم از میانگین ماهانه و سالانه تابش کل روی سطح افق و سطح شیبدار

^۱ Azimuth angle

پنل به همراه زوایای بهینه شیب پنل در ماه‌های مختلف از اطلاعات پایگاه^۱ PVGIS استخراج شده است که نتایج آن در جدول (۳-۳) آمده است.

جدول ۳-۳- متوسط تابش کل روی سطح افق و روی سطح شیب‌دار پنل و شیب بهینه در ماه‌های مختلف سال برای ساری [۴۲]

ماه	تابش کل روی سطح افق (wh/m ² /day)	تابش کل روی سطح پنل با شیب ۳۴ درجه (wh/m ² /day)	شیب بهینه (درجه)
ژانویه	۲۴۷۰	۳۹۸۰	۶۱
فوریه	۲۹۲۰	۴۰۲۰	۵۲
مارس	۳۸۹۰	۴۵۶۰	۳۷
آوریل	۴۵۴۰	۴۶۸۰	۲۲
مه	۵۶۵۰	۵۳۵۰	۹
ژوئن	۶۱۰۰	۵۵۴۰	۳
ژوئیه	۶۱۳۰	۵۶۹۰	۷
اوت	۵۵۸۰	۵۶۰۰	۱۸
سپتامبر	۴۴۳۰	۴۹۶۰	۳۲
اکتبر	۳۶۷۰	۴۸۳۰	۴۷
نوامبر	۲۶۹۰	۴۱۱۰	۵۸
دسامبر	۲۲۶۰	۳۸۴۰	۶۳
میانگین سالیانه	۴۲۰۰	۴۷۷۰	۳۴

مطابق جدول بالا میانگین زاویه شیب سالیانه پنل برای موقعیت مکانی شهر ساری، ۳۴ درجه می‌باشد. همچنین میانگین روزانه تابش کل روی سطح افق در سال با زاویه آزیموت صفر برابر با ۴/۲ کیلووات ساعت بر متر مربع است که این مولفه برای تابش کل روی سطح پنل با شیب ۳۴ درجه به ۴/۷۷ کیلووات ساعت بر متر مربع یعنی به میزان ۱۳/۵۷ درصد افزایش پیدا می‌کند. اما با توجه به مقادیر بدست آمده میزان تابش روی سطح شیب‌دار در ماه‌های مه، ژوئن و ژوئیه که جزء ماه‌های آبیاری نیز می‌باشند نسبت به تابش روی سطح افق کمتر شده است! دلیل این مساله انتخاب یک زاویه شیب بهینه‌ی ثابت برای کل سال می‌باشد در صورتیکه بر اساس دوره رویشی محصول باید زاویه شیب نصب پنل بر اساس معیار تابستانه انتخاب شود. بنابراین با توجه به ستون سوم جدول (۳-۳) که زاویه بهینه پنل برای هر ماه بصورت جداگانه آورده شده است، زاویه شیب نصب پنل را برابر با

¹ Photovoltaic Geographical Information System

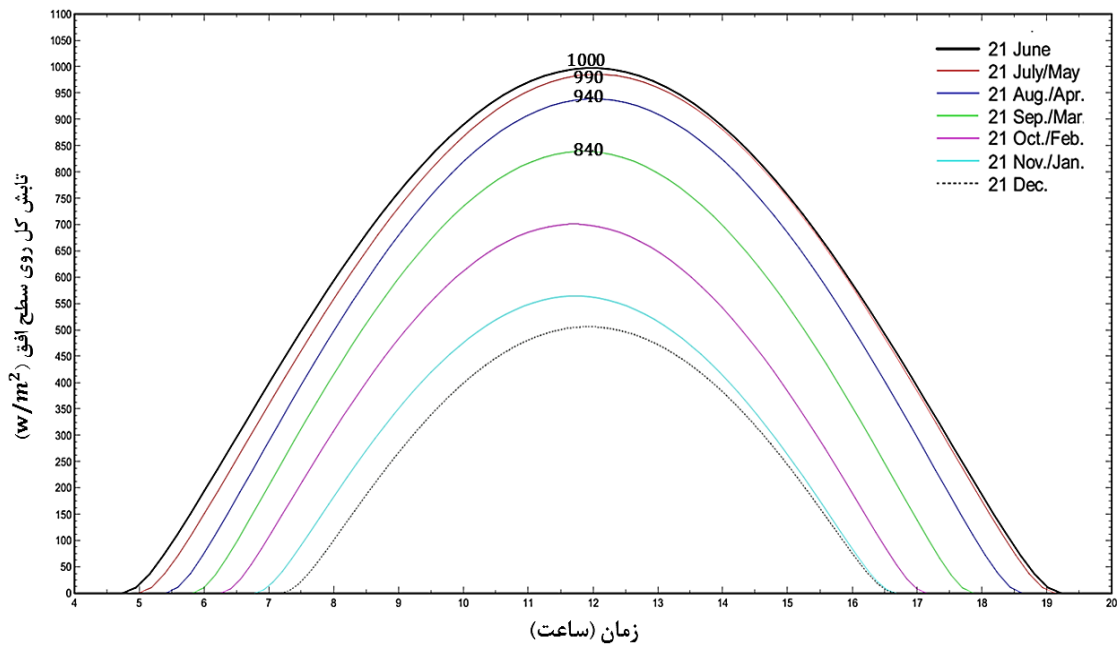
میانگین زاویه شیب با توجه به ماه‌های آبیاری محصول (معیار تابستانه)؛ یعنی ۱۵ درجه و بصورت ثابت^۱ در نظر می‌گیریم.

جدول ۳-۴- مقایسه تابش کل دریافتی روی سطح پنل با سه زاویه شیب متفاوت در ماه‌های دوره آبیاری برای ساری [۴۲]

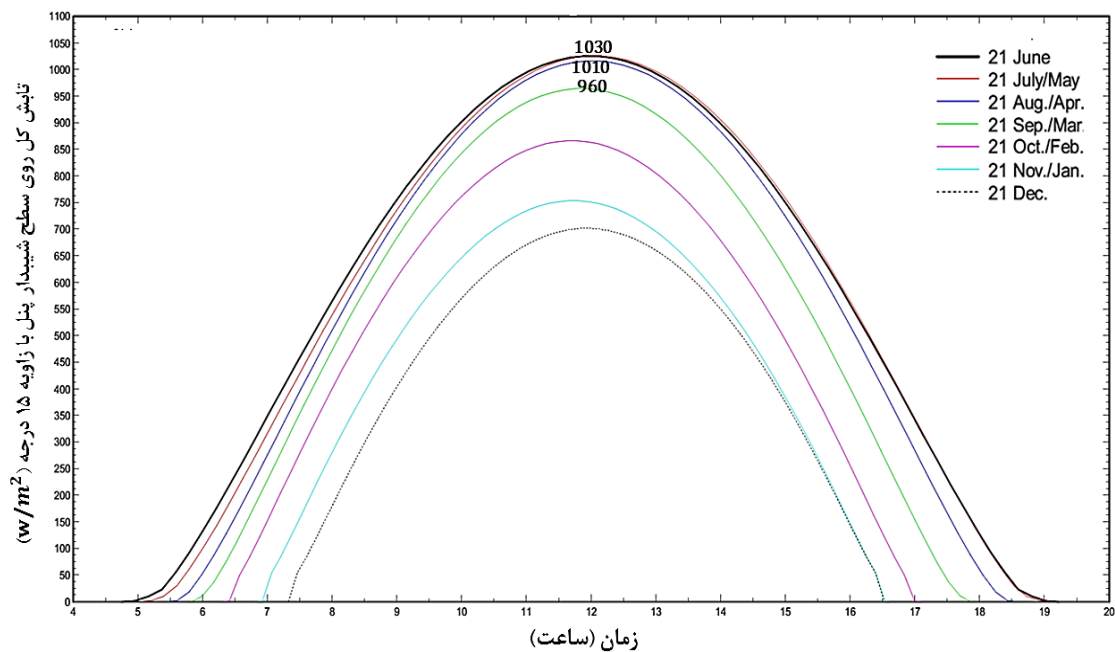
ماه	تابش کل روی سطح افق (wh/m ² /day)	تابش کل روی سطح پنل با شیب درجه ۳۴ (wh/m ² /day)	تابش کل روی سطح پنل با شیب درجه ۱۵ (wh/m ² /day)
آوریل	۴۵۴۰	۴۶۸۰	۴۷۴۰
مه	۵۶۵۰	۵۳۵۰	۵۶۸۰
ژوئن	۶۱۰۰	۵۵۴۰	۶۰۲۰
ژوئیه	۶۱۳۰	۵۶۹۰	۶۱۰۰
اوت	۵۵۸۰	۵۶۰۰	۵۷۶۰
سپتامبر	۴۴۳۰	۴۹۶۰	۴۸۱۰
میانگین	۵۴۰۵	۵۳۰۳	۵۵۱۸

همچنین مطابق جدول (۳-۴) در دوره رویشی گیاه، میانگین تابش کل روی سطح شیبدار پنل با زاویه ۱۵ درجه نسبت به تابش روی سطح افق و نیز تابش روی سطح شیبدار با زاویه ۳۴ درجه (معیار سالانه) به ترتیب به میزان ۲/۰۹٪ و ۴/۰۵٪ بیشتر می‌باشد که نشان از انتخاب زاویه شیب بهتر برای این دوره از سال دارد. علاوه بر این همانطور که از خروجی‌های نرم افزار PVSyst در شکل‌های (۳-۷) و (۳-۸) مشخص است، میزان تابش دریافتی روی سطح ماژول PV با شیب ۱۵ درجه نسبت به شیب صفر (تابش روی سطح افق) در ماه‌های آبیاری به میزان قابل توجهی بیشتر است.

¹ Fixed tiled panel



شکل ۳-۷- تابش کل روی سطح پنل PV در ساعات مختلف روز با زاویه شیب صفر برای شهر ساری در نرم افزار PVsyst



شکل ۳-۸- تابش کل روی سطح شیبدار پنل PV با زاویه ۱۵ درجه در ساعات مختلف روز برای شهر ساری در نرم افزار PVsyst

به عنوان مثال شدت تابش در ماه سپتامبر (شهریور) برای شیب صفر در شکل (۳-۷) مقدار ۸۴۰ وات بر مترمربع ثبت شده است (نمودار سبز رنگ)، حال آنکه میزان شدت تابش دریافتی روی سطح ماژول با شیب ۱۵ درجه برای همین ماه با توجه به شکل (۳-۸) با افزایش ۱۲۰ واحدی (۲۹/۱۴

درصد افزایش) به مرز ۹۶۰ وات بر مترمربع می‌رسد. البته میزان این افزایش تابش دریافتی روی سطح ماژول‌های PV برای ماه‌های دیگر کمتر است، مانند ماه ژوئیه که میزان افزایش تابش دریافتی در شیب ۱۵ درجه نسبت به حالت بدون شیب تنها به ۰.۴/۰.۴٪ می‌رسد (نمودار قرمز رنگ در شکل‌های ۳-۷ و ۳-۸). دلیل این امر آن است که شیب ۱۵ درجه شیب بهینه اختصاصی برای ماه ژوئیه نمی‌باشد بلکه این شیب، میانگین شیب بهینه برای ماه‌های دوره آبیاری است. در واقع شیب بهینه اختصاصی برای ماه ژوئیه نه تنها کمتر از ۱۵ درجه بلکه حتی کمتر از ۱۰ درجه است. اما در این مطالعه برای افزایش راحتی کشاورزان و نیز کاهش هزینه‌های ساخت سازه‌ی نگهدارنده ماژول‌های PV، یک شیب بهینه میانگین بصورت ثابت برای کل دوره آبیاری در نظر گرفته شده است. ضمن اینکه به لحاظ فنی نیز توصیه می‌شود هیچگاه شیب نصب ماژول‌های PV کمتر از ۱۰ درجه انتخاب نشود تا در صورت بارش باران گرد و خاک و نیز کثیفی‌های احتمالی از سطح ماژول‌ها بواسطه شیب مذکور شسته شود. بنابراین با توجه به مطالب گفته شده، شیب بهینه نصب ماژول‌های PV برای منطقه مورد نظر در دوره ۱۴۵ روزه آبیاری، ۱۵ درجه نسبت به افق و با زاویه آزیموت صفر درجه می‌باشد.

همچنین یکی از راه‌های افزایش توان خروجی از آرایه فتوولتائیک تنظیم دستی شیب آرایه بصورت روزانه، ماهانه و یا فصلی است. بطوریکه با تنظیم دستی شیب بهینه پنل‌ها به صورت روزانه، مجموع خروجی سیستم پمپاژ تقریباً ۲۵ تا ۵۰ درصد افزایش می‌یابد [۹]. همچنین اگر پنل‌ها با زاویه شیب بهینه فصلی تنظیم شوند، ۱۰ درصد انرژی بیشتری نسبت به حالت نصب بصورت کاملاً افقی (شیب صفر) دریافت می‌شود [۵۳]. در تحقیقی دیگر نتایج نشان داد که ردیابی دستی آرایه‌های PV باعث افزایش خروجی پمپاژ به میزان ۲۰٪ نسبت به حالت پایه ثابت می‌شود [۵۴]. علاوه بر این می‌توان از ردیاب‌های خورشیدی^۱ تک محوره (شمالی-جنوبی یا شرقی-غربی) و یا دو محوره نیز جهت ردیابی مسیر حرکت خورشید در طول روز استفاده کرد که اگرچه باعث افزایش راندمان تولید برق خصوصاً در

¹ Sun Tracker

ساعات ابتدایی و انتهایی روز از سطح پنل‌ها خواهد شد (به عنوان مثال افزایش ۳۶٪ انرژی خورشیدی دریافت شده توسط پنل‌ها [۵۵]) اما به دلیل هزینه‌های اولیه^۱ و نیز هزینه‌های جاری بالا (تعمیر و نگهداری^۲ و یا تعویض^۳) به واسطه مکانیکی بودنشان از انتخاب آنها در این مطالعه صرف نظر شده است [۴۹]. با این وجود در صورت تمایل به استفاده از سامانه ردیاب‌های خورشیدی، انتخاب ردیاب‌های تک محوره به دلیل هزینه‌های کمتر نسبت به نوع دو محوره منطقی‌تر به نظر می‌رسد [۵۶]. در ایران ردیاب تک محوره نوع شرقی-غربی پیشنهاد شده است [۸]. بنابراین به طور کلی با توجه به مطالب گفته شده آرایه‌های PV در زاویه بهینه‌ی سالانه ثابت می‌شوند یا بصورت دستی برای زاویه بهینه فصلی یا ماهانه تنظیم می‌شوند [۵۷].

۳-۶- مجموعه موتور پمپ

توان پمپاژ مورد نیاز برای آبیاری به چندین پارامتر نظیر هد پمپ، هد مکش، طول لوله‌ها و میزان دبی حجمی وابسته است. رابطه (۳-۵) توان پمپ را به عنوان تابعی از برخی پارامترهای مهم نشان می‌دهد [۵۸]:

$$P_{\text{pump}} = \frac{\rho \times g \times Q \times h}{\eta_p \times 3600} \quad (3-5)$$

که P_{pump} توان پمپاژ (W)، ρ چگالی آب (1000 kg / m^3)، g شتاب گرانشی (9.81 m / s^2)، h هد پمپاژ (m)، η_p بازده موتور پمپ (%) که به طور میانگین ۴۸ درصد در نظر گرفته می‌شود [۴۹] و Q نیز دبی حجمی مورد نیاز (m^3/h) می‌باشد. بنابراین ظرفیت بهینه موتور پمپ مورد مطالعه پس از تعیین میزان دبی بهینه از رابطه (۳-۴) و نیز محاسبه هد دینامیکی کل در بخش نتایج تعیین خواهد شد.

¹ Capital costs

² Operation & Maintenance costs

³ Replacement Costs

همچنین موتورهای از مجموعه موتورپمپ در سیستم‌های پمپاژ آب فتوولتائیک عموماً از دو نوع جریان مستقیم (DC^1) و یا جریان متناوب (AC^2) می‌باشند. اما معمولاً در پیکربندی‌های کوچک (زیر ۵ کیلووات) از موتورهای جریان مستقیم استفاده می‌شود [۵۹]. همچنین با توجه به اینکه برق تولیدی توسط آرایه فتوولتائیک از نوع DC می‌باشد بنابراین با استفاده از موتورهای DC برخلاف موتورهای AC دیگر نیاز به مبدل (اینورتر) جریان مستقیم به جریان متناوب نخواهد بود که در نتیجه باعث کاهش قابل ملاحظه‌ای در هزینه‌های اولیه و جاری سیستم پمپاژ PV خواهد شد. موتورهای DC در دو نوع با زغال کربنی^۳ (جاروبک) و بدون زغال^۴ موجود می‌باشند که موتور DC بدون جاروبک نسبت به موتور AC نوع آسنکرون به لحاظ مصرف انرژی و تلفات بسیار بهینه‌تر می‌باشد [۶۰] زیرا موتورهای دارای زغال به واسطه اصطکاک بین کموتاتور^۵ و زغال به طور متناوب دچار خوردگی می‌شوند و از این نظر بایستی تحت سرویس‌های دوره‌ای قرار گیرند که این مساله در پمپ‌های شناور از اهمیت بیشتری برخوردار است چرا که برای اینکار بایستی ابتدا موتورپمپ را از چاه بیرون آورده و مجدداً نصب کرد. همچنین موتورهای جریان مستقیم بدون جاروبک ($BLDC^6$) به دلیل عدم وجود زغال کربنی دارای راندمان بالا، عملکرد کم‌صدا، اندازه جمع و جور، قابلیت اطمینان بالا و نیاز به تعمیر و نگهداری پایین می‌باشند [۹ و ۶۱] که باعث کاهش هزینه‌های جاری سیستم خواهد شد [۶۲] هرچند که دارای هزینه اولیه بیشتری نسبت به نوع دارای جاروبک می‌باشد. اصولاً انتخاب پمپ خورشیدی به دبی مورد نیاز، ارتفاع و کیفیت آب بستگی دارد. همچنین پمپ‌ها به لحاظ اصول عملکرد به دو گروه پمپ‌های دینامیکی (مانند پمپ‌های گریز از مرکز) و پمپ‌های جابجایی مثبت^۷

^۱ Direct current

^۲ Alternative current

^۳ Brush

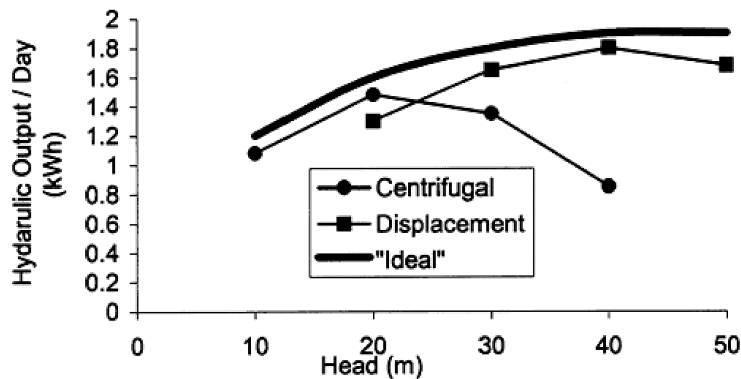
^۴ Brushless

^۵ Commutator

^۶ Direct current brushless

^۷ Positive displacement pump

(مانند پمپ های اسکرو^۱) تقسیم می شوند. با توجه به شکل (۹-۳) در هدهای بالا (چاه های متوسط و عمیق) پمپ های جابجایی مثبت (مانند پمپ های هلیکال) قابل اطمینان تر و بهینه تر هستند [۶۳] و پمپ های گریز از مرکز^۲ برای هدهای کم و حجم دبی روزانه بالا بسیار مناسب هستند که نیاز به تعمیر و نگهداری کمتری نسبت به پمپ های جابجایی مثبت دارند [۶۴].



شکل ۳-۹- منحنی عملکرد پمپ گریز از مرکز و جابجایی مثبت در هدهای مختلف برای یک آرایه PV در روز آفتابی [۶۵]

امروزه شرکت های سازنده سیستم های پمپاژ آب خورشیدی برای افزایش راندمان پمپاژ از تجهیزات الکترونیکی مانند کنترلرها تحت عنوان واحد بهبود دهنده کیفیت توان (PCU^۳) استفاده می کنند که توان خروجی از آرایه فتوولتائیک، عملکرد کلی سیستم و راندمان آن را افزایش می دهند. همچنین این مجموعه وظیفه محافظت از واحد موتورپمپ در برابر خطراتی مانند پلاریته معکوس^۴، اضافه بار^۵، دمای بیش از حد^۶ و کارکرد خشک^۷ را نیز دارد. این کنترلرها در برخی مدل ها قابلیت ریموت کنترلر برای کنترل شروع و یا توقف سیستم پمپاژ و نیز مانیتورینگ وضعیت سیستم از راه دور

^۱ Screw pump

^۲ Centrifugal pump

^۳ Power Conditioning Unit

^۴ Reverse polarity

^۵ Overload

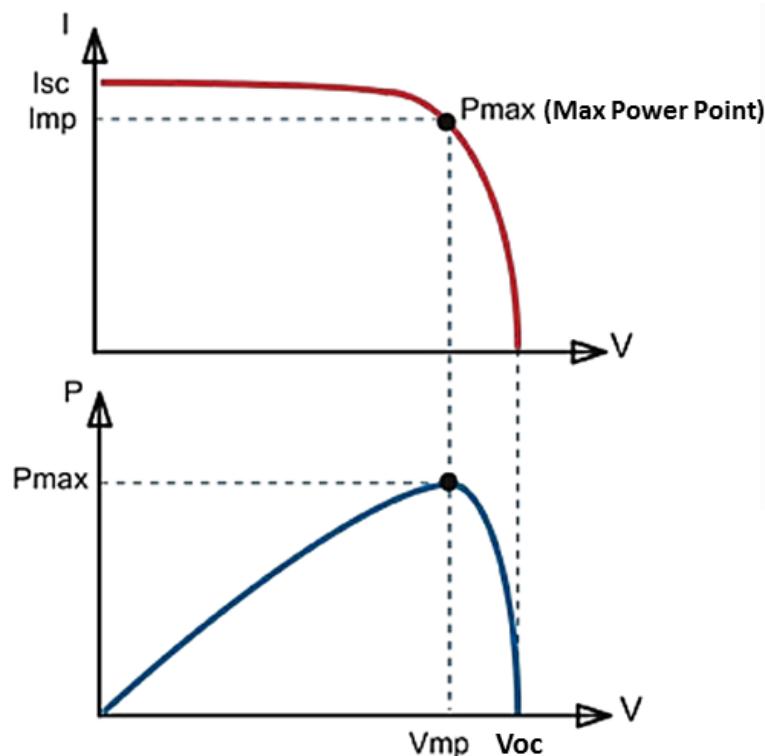
^۶ Overtemperature

^۷ Dry running

مبتنی بر بستر وب بوسیله ارتباطات رادیویی (سیمکارت و اینترنت همراه) را نیز دارند. اما این کنترلرها معمولاً بصورت مستقل از مجموعه موتورپمپ و بصورت اختیاری و جداگانه به فروش می-رسند. یکی از مهمترین مزیت‌های اصلی و جذاب تجهیزات بهبود دهنده کیفیت توان که به عنوان عنصر اتصال بین سیستم تولید توان فتوولتائیک و مجموعه موتورپمپ قرار می‌گیرند، به حداکثر رساندن راندمان کلی پمپاژ با انجام برخی عملیات‌های خاص مانند تنظیم ولتاژ و جریان واحد موتورپمپ در حداکثر مقدار خود بر اساس میزان شدت تابش خورشید روزانه به واسطه بهره‌مندی از الگوریتم دنبال کننده حداکثر نقطه توان (MPPT^۱) می‌باشد. مطالعات زیادی در زمینه مزایای استفاده از فناوری MPPT وجود دارد. به عنوان مثال سونتاکه و همکاران [۹] گزارش دادند که استفاده از الگوریتم MPPT در سیستم پمپاژ DC باعث بهینه شدن ظرفیت آرایه PV و بهبود کارایی سیستم خواهد شد. مرینو و همکاران [۶۶] عملکرد PVWPS تحت شرایط هواشناسی کشور شیلی را ارزیابی کردند. نتایج نشان داد که روش‌های سنتی تعیین ظرفیت آرایه PV فقط ۸۴ درصد انرژی بالقوه در دسترس از آرایه PV را در مقایسه با شرایط کاری آنها در حالت MPPT ارائه می‌دهند. کتان و همکاران [۶۷] گزارش دادند که استفاده از کنترلر مجهز به الگوریتم MPPT در سیستم پمپاژ باعث افزایش میزان دبی از ۱۲/۷۷ لیتر در دقیقه تا ۳۱/۵۸ لیتر در دقیقه (یعنی تا ۴۰ درصد) در هد ۵ متر شده است. آکیهپرو و همکاران [۶۸] به مدل‌سازی و شبیه‌سازی انرژی تولیدی کل و حجم آب پمپاژ شده در روز برای یک PVWPS با آرایه PV به ظرفیت ۳۵ وات، مجهز به موتور DC و پمپ جابجایی مثبت (دیافراگمی) با و یا بدون الگوریتم MPPT در محیط نرم‌افزار MATLAB بر اساس داده‌های واقعی تابش به عنوان پارامترهای ورودی پرداختند. نتایج نشان‌دهنده این بود که سیستم پمپاژ آب خورشیدی بدون MPPT به دلیل عدم تطابق الکتریکی مطلوب بین ماژول PV و مشخصات جریان-ولتاژ موتورپمپ DC دارای راندمان بسیار پایینی بود اما در زمان استفاده از فناوری MPPT، راندمان سیستم پمپاژ آب PV به میزان ۳۵٪ افزایش یافت. علاوه بر این سیستم دارای الگوریتم MPPT

^۱ Maximum Power Point Tracking

توانست بیش از ۹۹٪ از ظرفیت PV را استفاده کند و آب را به میزان ۸۷٪ بیشتر از قبل پمپ کند. با توجه به اینکه مشخصه جریان-ولتاژ سلول‌های خورشیدی در یک ماژول PV، غیرخطی بوده و تحت تاثیر شرایط محیطی از جمله شدت تابش خورشید و دمای محیط است بنابراین همواره تنها یک نقطه کار بهینه وجود دارد که در آن توان خروجی از سلول‌ها، حداکثر می‌باشد (P_{max}) که به آن، نقطه‌ی حداکثر توان (MPP) گفته می‌شود و ولتاژ و جریان در این نقطه نیز به ترتیب V_{mpp} و I_{mpp} یعنی ولتاژ و جریان در توان بیشینه نام دارند. همچنین توان ماژول‌های خورشیدی به دلیل نوسان شدت تابش خورشیدی و نیز تغییرات درجه حرارت محیط در طول روز به خودی خود روی نقطه کار بهینه قرار ندارد که در نتیجه باعث کاهش توان خروجی ماژول‌های PV خواهد شد. از این رو به جای افزایش تعداد ماژول‌های PV برای جبران کاهش توان و به طبع آن افزایش هزینه‌ها، از کنترلر MPPT استفاده می‌شود که وظیفه آن بیشینه کردن ولتاژ و جریان ماژول‌های PV برای دستیابی به حداکثر توان ممکن مطابق شکل زیر است.



شکل ۳-۱۰- نحوه عملکرد الگوریتم MPPT در نمودارهای جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ

۳-۷- پنل خورشیدی

در سیستم‌های فتوولتائیک مستقل از شبکه، اندازه آرایه PV به میزان تقاضای بار بستگی دارد. همچنین تعیین اندازه آرایه PV به عوامل دیگری مانند موقعیت جغرافیایی، شرایط محیطی و انواع تلفات نیز بستگی دارد [۶۹]. از این رو درگام بعدی باید حداکثر توان خروجی واقعی از هر ماژول فتوولتائیک بعد از کسر تلفات را محاسبه کرد. برای این کار داریم [۷۰]:

$$P_{PV \max, actual} = \frac{G_{\text{tilted}}}{G_{\text{ref}}} (P_{\max, pv \text{ panel}} \times [(1 - L_T) \times (1 - L_{PC}) \times (1 - L_C) \times (1 - L_B) \times (1 - L_S) \times (1 - L_{CC}) \times (1 \pm L_{PMT}) \times (1 - L_{Mis})]) \quad (۳-۶)$$

که $P_{\max, pv \text{ panel}}$ حداکثر توان نامی ماژول (W_P) از جدول مشخصات ماژول انتخابی، L_T تلفات مربوط به دما، L_{PC} تلفات مربوط به راندمان کنترلر پمپ، L_C تلفات مربوط به کابل کشی^۱، L_B تلفات مربوط به راندمان شارژ باتری، L_S تلفات مربوط به گرد و غبار^۲، L_{CC} تلفات مربوط به راندمان شارژ کنترلر، L_{PMT} تلفات مربوط به خطای شرکت سازنده^۳ و L_{Mis} تلفات مربوط به ناهمگونی^۴ در ماژول PV (عدم تطابق ۱۰۰ درصدی مشخصات الکتریکی نظیر ولتاژ و جریان در سلول‌های یک ماژول خورشیدی) می‌باشد که بازه تغییرات مربوط به هر یک از آنها مطابق جدول زیر می‌باشد.

جدول ۳-۵- میزان تلفات موثر در توان خروجی ماژول PV [۷۰ و ۷۱]

تلفات تاثیرگذار بر خروجی آرایه PV	مقدار تلفات در نظر گرفته شده
گرد و غبار	-۵٪
کابل کشی	-۴٪
راندمان شارژ باتری	-۱۰٪
راندمان شارژ کنترلر	-۳٪
خطای شرکت سازنده ماژول	+۵٪
راندمان کنترلر پمپ	-۲٪

¹ Cable losses

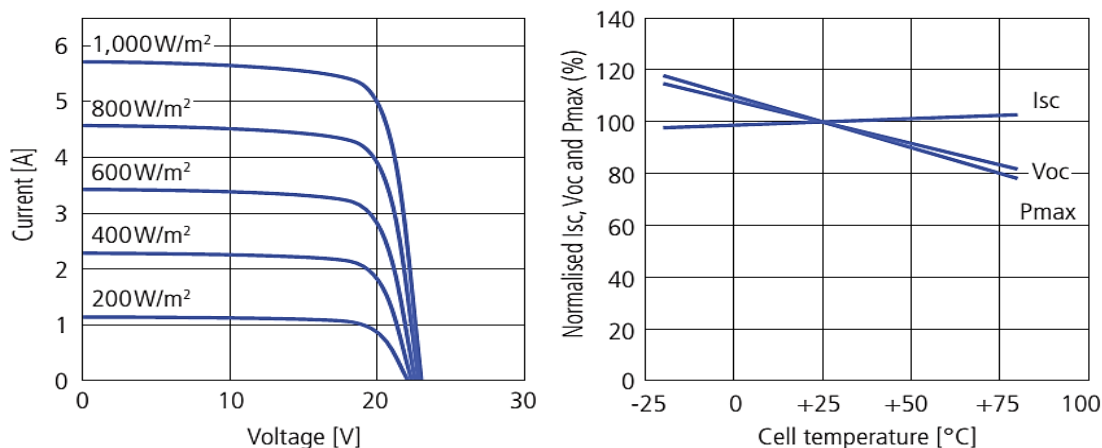
² Soiling losses

³ Panel manufacturer tolerance

⁴ Mismatch losses

همچنین عملکرد ماژول PV به شدت به شرایط تابش خورشید (G) بستگی دارد. شرایط استاندارد برای تابش خورشید در یک روز صاف (G_{ref})، ۱۰۰۰ وات در هر متر مربع فرض می‌شود و گاهی اوقات به نام‌های یک واحد خورشید^۱ و یا پیک خورشید^۲ نیز نامیده می‌شود [۷۲]. اما از آنجا که طبیعتاً در تمام ساعات طول روز با این میزان تابش خورشید مواجه نخواهیم بود بنابراین ترم G_{tilted}/G_{ref} در رابطه (۳-۶) نشان می‌دهد که میزان تابش کمتر از یک واحد خورشیدی، خروجی فعلی یک ماژول PV را با مقدار متناسب کاهش می‌دهد.

با توجه به شکل (۳-۱۱) ولتاژ و جریان پنل PV رابطه مستقیم با تغییرات تابش دارد اما جریان خروجی از پنل فتوولتائیک به میزان کمی با افزایش دمای محیط افزایش می‌یابد این درحالیست که ولتاژ مدار باز پنل به طرز قابل توجهی با افزایش دمای محیط کاهش می‌یابد؛ در نتیجه مطابق با تصویر سمت راست در شکل (۳-۱۱) توان خروجی پنل‌های فتوولتائیک با دما رابطه عکس دارد [۷۳]. در واقع بازده تبدیل PV، خروجی توان الکتریکی سلول خورشیدی و در نتیجه کارایی نهایی PVWPS با افزایش دمای سلول‌های خورشیدی کاهش می‌یابد [۷۴].



شکل ۳-۱۱ - عملکرد الکتریکی پنل PV با تغییرات تابش و دما

¹ One sun
² Peak sun

تاثیر دمای سلول بر عملکرد ماژول PV بستگی به شرکت سازنده سلول‌های PV دارد. با این حال افزایش دمای سلول به اندازه ۱ درجه سانتیگراد، ولتاژ ماژول PV را به مقدار ۰/۰۸۵ تا ۰/۱۲۳ ولت کاهش می‌دهد. اما از سوی دیگر، افزایش دمای سلول به میزان ۱ درجه سانتیگراد، باعث افزایش جریان ماژول‌های PV به میزان ۰/۰۰۲۶ تا ۰/۰۰۳۲ آمپر می‌شود [۷۵ و ۷۶]. بر این اساس، افزایش دمای سلول به اندازه ۱ درجه سانتیگراد، توان ماژول PV را به اندازه ۰/۵ تا ۰/۶ درصد کاهش می‌دهد. یکی از راه‌های محاسبه افت توان در اثر افزایش دما ($P_{T, loss}$) از طریق رابطه زیر بیان می‌شود [۷۰]:

$$P_{T, loss} = C_p \times P_{PV \max, pv \text{ panel}} \times (T_m - T_{m, ref}) \quad (۷-۳)$$

که C_p ضریب دمایی توان^۱ ($\%/C^\circ$) موجود در جدول مشخصات ماژول انتخابی، T_m دمای ماژول (C°) و $T_{m, ref}$ نیز دمای ماژول در شرایط مرجع^۲ STC که ۲۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین برای محاسبه دمای ماژول (T_m) از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷۰]:

$$T_m = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} \times G_{\text{tilted}} \quad (۸-۳)$$

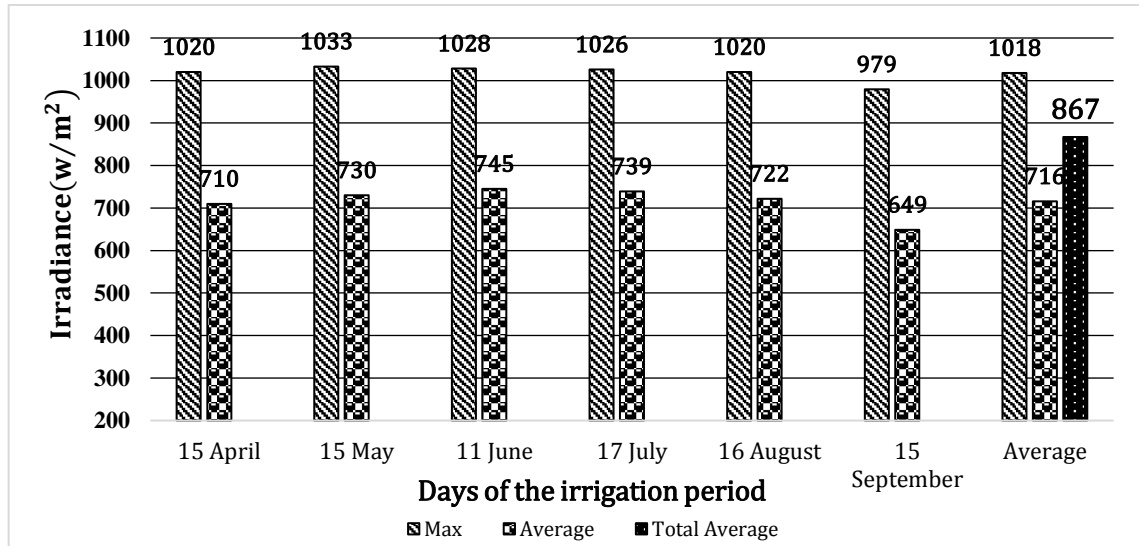
که T_a دمای محیط (C°) می‌باشد و در این مطالعه طبق شکل (۳-۱) برابر با ۲۴/۵ درجه سانتیگراد در نظر گرفته می‌شود. $NOCT^3$ نیز از جدول مشخصات ماژول PV مشخص خواهد شد. اما G_{tilted} میزان تابش لحظه‌ای کل روی سطح شیب‌دار پنل با زاویه ۱۵ درجه برای ماه‌های دوره آبیاری بر حسب W/m^2 می‌باشد. بنابراین برای یافتن تابش ساعتی میانگین در یک ماه باید روزی از ماه را که نماینده کل ماه می‌باشد انتخاب کرد. کلین [۷۷] روزهای متوسط را برای هر ماه پیشنهاد کرد (۱۵ آوریل، ۱۵ مه، ۱۱ ژوئن، ۱۷ ژوئیه، ۱۶ اوت و ۱۵ سپتامبر) که برای ارزیابی G_{tilted} در ماه‌های دوره آبیاری با حداقل خطا استفاده می‌شود. اما بدلیل نبود اطلاعات تابش در بانک اطلاعاتی اداره

¹ Power Temperature Coefficient

² Standard Test Condition

³ Nominal Operating Cell Temperature

هواشناسی استان مازندران برای منطقه مورد نظر، از اطلاعات پایگاه Meteororm در نرم افزار PVsyst مطابق شکل (۳-۱۲) در این بخش استفاده شده است.



شکل ۳-۱۲- میزان تابش دریافتی روی سطح پنل با شیب ۱۵ درجه در روزهای میانگین ماه برای ساری در نرم افزار PVsyst

در این شکل حداکثر و حداقل تابش کل روی سطح شیبدار با زاویه ۱۵ درجه نسبت به افق در روزهای میانگین هر ماه در بازه زمانی ۹ صبح الی ۱۵ عصر برای منطقه موردنظر به نمایش در آمده است. در نهایت میانگین کل از حداکثر و حداقل تابش ثبت شده در مجموع ماههای دوره آبیاری یعنی مقدار ۸۶۷ وات بر متر مربع را به عنوان میانگین تابش کل روی سطح پنل با شیب ۱۵ درجه در نظر می‌گیریم. بنابراین دمای ماژول بر اساس مقادیر بدست آمده طبق رابطه (۳-۸) برابر با ۵۱/۶ درجه سانتیگراد خواهد بود. در نهایت تلفات افت توان در مقابل افزایش دما از رابطه (۳-۷) برابر است با:

$$P_{T,loss} = - \frac{0.4}{100} \times 100 \times (51.6 - 25) = -10.64 \text{ w}$$

حال با داشتن تلفات دمایی و باقی تلفات از جدول (۳-۵) می‌توان حداکثر توان خروجی واقعی از یک ماژول فتوولتائیک را از رابطه (۳-۶) محاسبه کرد که برابر با ۶۱/۵۶ وات خواهد بود. پس از مشخص شدن توان خروجی واقعی از هر ماژول، ظرفیت کلی نیروگاه از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$P_{PV \text{ Array}} = P_{PV \text{ max, actual}} \times N_S \times N_P \quad (۳-۹)$$

که $P_{PV \text{ Array}}$ توان خروجی واقعی نیروگاه (W)، N_P تعداد آرایه فتوولتائیک موازی و N_S تعداد

ماژول PV سری در هر رشته می‌باشد. راندمان نیروگاه PV نیز از رابطه زیر بدست می‌آید [۷۸]:

$$\eta_{PV \text{ Array}} = \frac{P_{PV \text{ Array}}}{G_{ref} \times A_{module} \times N_P \times N_S} \quad (10-3)$$

که $\eta_{PV \text{ Array}}$ راندمان نیروگاه (/.)، A_{module} مساحت هر ماژول PV موجود در جدول مشخصات

ماژول می‌باشد. در نهایت راندمان کلی سیستم (η_{tot}) از رابطه زیر بدست خواهد آمد [۷۸]:

$$\eta_{tot} = \eta_{PV \text{ Array}} \times \eta_P \quad (11-3)$$

میزان مساحت اشغال شده توسط آرایه PV نیز از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$A_{array} = A_{module} \times N_S \times N_P \quad (12-3)$$

لازم به ذکر است که در این مطالعه از اثرات تلفات سایه^۱ با فرض نبود اجسام سایه انداز در مکان

نصب پنل‌ها صرف نظر شده است. همچنین در این تحقیق یک استراکچر (سازه نگهدارنده) واحد برای

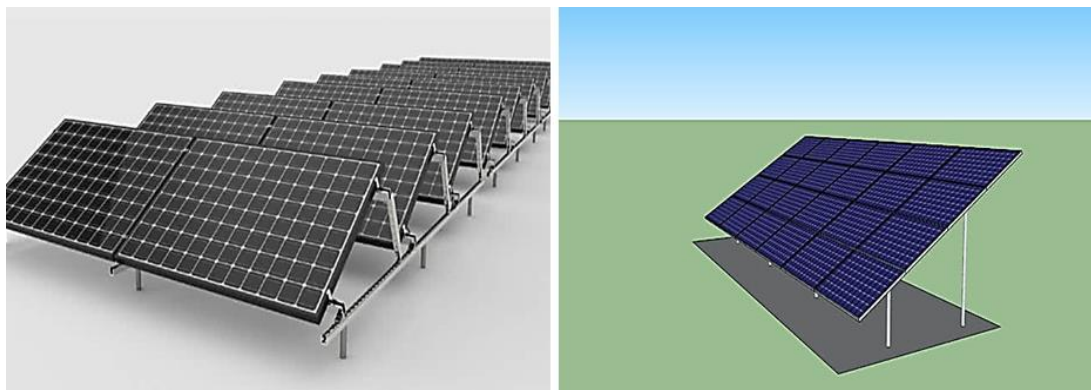
قرارگیری و نصب یکپارچه ماژول‌های PV انتخاب شده است. اینکار باعث خواهد شد تا برخلاف

استراکچرهای مجزا بصورت ردیفی و پشت سرهم، از افت توان خروجی از آرایه فتوولتائیک به دلیل

سایه اندازی ماژول‌ها بر روی یکدیگر (سایه اندازی ماژول‌های ردیف جلو بر روی ماژول‌های ردیف‌های

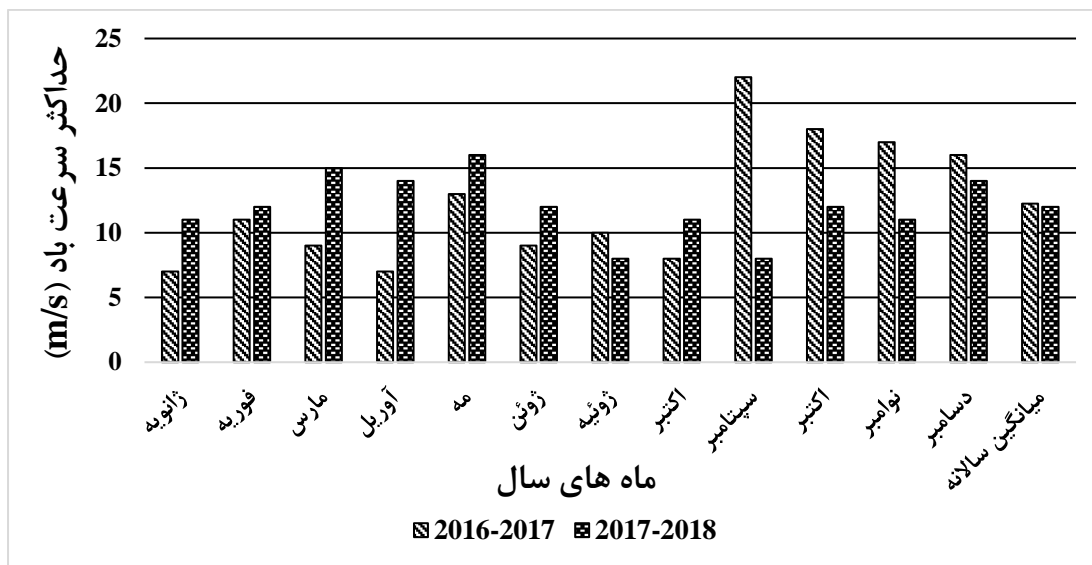
پشتی) جلوگیری شود. تصویری از دو نوع استراکچر مذکور در شکل زیر قابل مشاهده است.

¹ Shading losses



شکل ۳-۱۳- سمت راست استراکچر یکپارچه، شکل سمت چپ استراکچرهای مجزا

علاوه بر این از دیگر مزایای استراکچرهای یکپارچه می‌توان به صرف زمان کمتر برای ساخت و نیز اشغال فضای کوچکتر آنها اشاره کرد. چرا که در استراکچرهای مجزا برای جلوگیری از سایه اندازی ماژول‌ها بر روی یکدیگر باید یک فاصله معین بین پنل‌های PV بصورت ردیفی در نظر گرفت که خود باعث افزایش مساحت زمین در دسترس برای نصب آرایه PV خواهد شد. تمام ماژول‌های PV می‌بایست روی استراکچرهایی از جنس فولاد گالوانیزه گرم (مبتنی بر استاندارد ASTM123) یا آلایژ آلومینیوم نصب شوند [۲۳]. بنابراین آنها باید بتوانند وزن مجموعه ماژول‌ها و بارهای خارجی (نظیر نشست برف روی سطح ماژول‌ها در زمستان) را به‌خوبی تحمل کنند. در ضمن استراکچرها باید تحمل حفظ استقرار خود در برابر بادهایی با سرعت ۱۲۰ تا ۱۴۰ کیلومتر بر ساعت را نیز داشته باشند [۲۳]. از این‌رو حداکثر سرعت باد منطقه مورد مطالعه بین سال‌های ۲۰۱۶ تا اوایل ۲۰۱۸ از بانک اطلاعات هواشناسی استان مازندران مطابق جدول زیر استخراج شده است.



شکل ۳-۱۴- حداکثر سرعت باد در ماه های مختلف سال برای ساری [۴۱]

همانطور که مشاهده می شود حداکثر سرعت باد در بازه زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۷ در ماه سپتامبر (شهریور) با سرعت ۲۲ متر بر ثانیه (۷۹ کیلومتر بر ساعت) و در بازه زمانی ۲۰۱۷-۲۰۱۸ در ماه مه (اردیبهشت) با حداکثر سرعت ۱۶ متر بر ثانیه (حدود ۵۸ کیلومتر بر ساعت) ثبت شده است که هر دوی این اعداد در بازه طراحی استراکچرها توسط شرکت های سازنده قرار دارند. همچنین میانگین حداکثر سرعت باد سالیانه برای منطقه مورد مطالعه برای بازه های زمانی ۲۰۱۶-۲۰۱۷ و ۲۰۱۷-۲۰۱۸ به ترتیب ۱۲/۲۵ (۴۴ کیلومتر بر ساعت) و ۱۲ متر بر ثانیه (۴۳ کیلومتر بر ساعت) می باشد. برخی از مشخصات ماژول فتوولتائیک انتخابی در جدول (۳-۶) آمده است.

جدول ۳-۶- مشخصات ماژول PV انتخابی [۷۹]

سیلیکون مونوکریستال	نوع ماژول PV
Lorentz LC100-M36	شرکت سازنده و مدل ماژول
۱۰۰	توان نامی (WP)
۵/۳۵	جریان در حداکثر توان (I _{mpp})
۱۸/۷	ولتاژ در حداکثر توان (V _{mpp})
۵/۷۲	جریان اتصال کوتاه (I _{sc})
۲۳	ولتاژ مدار باز (V _{oc})

۱۵/۱۳	راندمان (%)
۰-۵	خطای شرکت سازنده ماژول (%)
-۰/۴	ضریب دمایی توان (%/C°)
-۰/۳۳	ضریب دمایی ولتاژ مدار باز (%/C°)
۴۵	NOCT (C°)
۳۶	تعداد سلول
۸/۱	وزن (Kg)
۱۱۹۷×۵۵۲×۳۵	ابعاد ماژول (mm)

همچنین دلیل انتخاب ماژول نوع مونوکریستال نسبت به دیگر نوع ماژول‌های سیلیکون کریستالی یعنی نوع پلی کریستال، وضعیت تابشی نسبتاً ضعیفتر استان‌های شمالی حاشیه دریاچه کاسپین می-باشد. بنابراین برای جبران این نقیصه از ماژول‌های سیلیکونی نوع مونوکریستال با راندمان بیشتر نسبت به نوع پلی کریستال استفاده شده است. تصویری از ماژول انتخابی در شکل (۳-۱۵) قابل مشاهده است.



شکل ۳-۱۵- ماژول فتوولتائیک سیلیکون کریستالی نوع مونوکریستال در مطالعه حاضر [۷۹]

لازم به ذکر است که ظرفیت و تعداد بهینه ماژول‌های PV موردنیاز برای راه اندازی مجموعه موتورپمپ از طریق بهینه‌سازی با الگوریتم هوشمند در بخش مربوطه بدست خواهد آمد.

۳-۸- تعداد بهینه ماژول‌های فتوولتائیک از طریق بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم NSGA-II

برای تعیین ظرفیت و اندازه تجهیزات، استفاده از روش‌ها و تکنیک‌های هوش مصنوعی مانند الگوریتم ژنتیک، شبکه عصبی مصنوعی، منطق فازی و غیره دارای دقت و قابلیت اطمینان بالایی هستند که در انتخاب آنها جهت بهینه‌سازی فنی و اقتصادی باید چالش‌هایی نظیر در دسترس بودن اطلاعات آب و هوا، پیش‌بینی بار، دقت مدل، تنوع مشخصات اجزاء، سادگی و کاربردی بودن روش و مسائل اقتصادی را نیز مدنظر قرار داد. الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)^۱ یکی از پرکاربردترین و قدرتمندترین الگوریتم‌های فراابتکاری موجود برای حل مسائل بهینه‌سازی چند هدفه است که نخستین بار دب و همکاران [۸۰] در سال ۲۰۰۲ آن را پیشنهاد دادند. این الگوریتم از مدل-سازی زیستی جمعیت جانداران به وجود آمده است که در آن، خصوصیات نسل جانداران به مقدار توابع هدف و بهبود در خصوصیات نسلی در پی گذشت زمان، تشبیه و ظهور نسل‌های جدید از آمیزش نسل‌های قبلی به بهبود در مقدار توابع هدف مانند شده است [۸۱]. به عبارت دیگر این الگوریتم از اصول انتخاب طبیعی داروین برای یافتن فرمول یا جواب بهینه به‌منظور پیش‌بینی یا تطبیق الگو استفاده می‌کند. روش کار الگوریتم NSGA-II که یکی از حالت‌های چندهدفه الگوریتم ژنتیک نیز می‌باشد بصورت خلاصه برابر است با: ایجاد جمعیت اولیه، محاسبه معیارهای برازندگی^۲، مرتب کردن جمعیت بر اساس شرط‌های غلبه کردن، محاسبه فاصله ازدحامی^۳، انتخاب از میان جمعیت بر اساس رتبه و سپس فاصله ازدحامی، انجام تقاطع^۴ و جهش^۵، تلفیق جمعیت اولیه و جمعیت بدست آمده از تقاطع و جهش، جایگزین کردن جمعیت والدین با بهترین اعضای جمعیت

^۱ Non-dominated Sorting Genetic Algorithm-II

^۲ Fitness Function

^۳ Crowding Distance

^۴ Crossover

^۵ Mutation

تلفیق شده در مراحل قبل و در نهایت تکرار تمامی این مراحل تا شرایط بهینه‌گی موردنظر [۸۲]. به طور کلی مزایای عمده این روش سرعت بالا، وجود نخبه‌گرایی، عدم نیاز به جمعیت خارجی و سهولت نسبی در پیاده‌سازی است [۸۳]؛ بنابراین از این الگوریتم جهت بهینه‌سازی فنی و اقتصادی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد مطالعه در محیط نرم افزار MATLAB به عنوان یک زبان برنامه نویسی پیشرفته و قدرتمند در انجام محاسبات عددی استفاده شده است. در این مطالعه توابع هدف^۱ حداکثر کردن راندمان کلی سیستم و حداقل کردن تابع هزینه می‌باشد. تابع هزینه در این بخش هزینه خرید ماژول‌های فتوولتائیک به عنوان یکی از پرهزینه‌ترین اجزاء سیستم‌های PV می‌باشد. بنابراین تعداد بهینه این ماژول‌ها از اهمیت بالایی برخوردار است. برای اینکار میزان مساحت ماژول‌های فتوولتائیک، شرایط جوی و اقلیمی از جمله میزان تابش ورودی با توجه به مکان مورد نظر، زاویه شیب بهینه نصب ماژول‌ها با توجه به معیار طراحی (فصل آبیاری محصول)، تاثیر تغییرات دما، آلودگی و یا گرد و خاک روی سطح ماژول، خطای شرکت سازنده در راندمان اعلامی و نیز تلفات در کابل‌ها و سیم‌کشی‌ها در کنار افت فشارهای ناشی از تغییرات هد و نیز افت فشار در لوله‌ها و اتصالات از جمله متغیرهای تاثیرگذار در توان خروجی ماژول‌های فتوولتائیک و میزان دبی آب خروجی از پمپ می‌باشند که باید در نظر گرفته شوند. همچنین در فرمول بندی مسئله بهینه سازی حاضر پارامترهای جدول زیر به عنوان پارامترهای ثابت در نظر گرفته شده‌اند.

جدول ۳-۷- پارامترهای ثابت در فرآیند بهینه سازی

پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر	مقدار	پارامتر
G_{tilted}	867 (W/m ²)	ρ	1000 kg/m ³	L_{mis}	96 %	
G_{ref}	1000 (W/m ²)	η_p	48 %	L_T	89%	
T_a	۲۴/۵ (°C)	L_C	96 %	C_P	-0/4 %/°C	
$T_{m,\text{ref}}$	۲۵ (°C)	L_{CC}	98 %	L_1	1/197 m	
T_m	۵۱/۶ (°C)	L_S	95 %	L_2	0/552 m	
NOCT	45 (°C)	L_B	90 %	A_{module}	0/66 m ²	
$P_{\text{max, PV panel}}$	100 (W)	L_{PMT}	105 %	$C_{PV \text{ unit}}$	50 \$	
$P_{\text{max, actual}}$	۶۱/۵۶ (W)	L_{PC}	98 %	g	9/81 m/s ²	

¹ Objective functions

همچنین متغیرهای تصمیم‌گیری در این مطالعه پارامترهای N_p و N_s (تعداد ماژول‌های سری و موازی) می‌باشند که محدوده تغییرات آنها با توجه به ابعاد زمین در دسترس برای نصب سیستم PV در دو حالت طولی^۱ و عرضی^۲ به همراه توابع هدف و سایر قیود به شکل زیر تعریف می‌شود:

$$\text{Maximize } (\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{PV Array}} \times \eta_p) \ \& \ \text{Minimize } (\text{PV Cost} = C_{\text{PV unit}} \times N_p \times N_s)$$

$$\text{Subject to: } \begin{cases} \text{Equations (5 - 3 to 12 - 3)} \\ P_{\text{PV Array}} > P_{\text{Pump}} \\ 1 \leq N_s \leq 7 \\ 1 \leq N_p \leq 4 \end{cases} \quad (13-2)$$

قابل ذکر است که در مسئله بهینه‌سازی فوق، زاویه شیب بهینه نصب ماژول‌ها با توجه به جدول (۳-۴) برای ماه‌های دوره آبیاری، ۱۵ درجه نسبت به افق در نظر گرفته شده است. همچنین مدل‌سازی ظرفیت بهینه سایر اجزاء PVWPS مانند بانک باتری، شارژکنترلر و اینورتر بصورت عددی در ادامه تشریح می‌گردد.

۳-۹- سیستم پشتیبان

امروزه برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم فتوولتائیک بدلیل متغیر بودن تابش خورشیدی در طول روز، استفاده از سیستم ذخیره‌سازی در طراحی سیستم‌های PV رایج است به گونه‌ای که انرژی خورشیدی مازاد برای تامین برق جهت آبیاری در زمان‌های نبود تابش کافی (روزهای ابری یا بارانی) در تعدادی باتری ذخیره می‌شود. در واقع اندازه واحد ذخیره‌ساز باتری عمدتاً به فاصله زمانی که به سیستم پشتیبان احتیاج است بستگی دارد [۸۴ و ۸۵] به اینصورت که تقاضای بار توسط نیروی فتوولتائیک در طول ساعت‌های آفتابی در روز تامین می‌شود و برق اضافی (اگر بعد از برطرف شدن تقاضای بار تولید شود) در واحد ذخیره‌ساز باتری نگهداری می‌شود تا در طول بازه زمانی که میزان تقاضای بار بیش از تولید برق از ماژول‌های PV است از آن استفاده شود [۸۶ و ۸۷]. همچنین از

¹ Portrait

² Landscape

مزایای ذخیره‌ساز باتری نسبت به مخازن ذخیره‌ساز آب، راه‌اندازی سیستم حتی در شب‌هنگام می‌باشد که باعث افزایش بهره‌وری آبیاری به دلیل کاهش تبخیر سطحی آب به دلیل نبود خورشید در شب خواهد شد. علاوه بر این در سیستم‌های کوچک (مانند مطالعه حاضر)، بیشتر از باتری‌های الکتروشیمیایی برای ذخیره‌سازی استفاده می‌شود که توسط بسیاری از نویسندگان برای سیستم‌های مستقل از شبکه در کشورهای توسعه یافته مانند اسپانیا [۸۸] یا در مناطق خشک برای پمپاژ آب آشامیدنی در نیجریه [۸۹] و برای کاربردهای روستایی در مصر [۹۰] و نیجریه [۹۱] گزارش شده است. در سیستم‌های مستقل از شبکه، اندازه آرایه PV به میزان تقاضای بار بستگی دارد و اندازه سیستم ذخیره‌ساز باتری عمدتاً به فاصله زمانی که به این سیستم در طول ساعات غیرآفتابی موردنیاز است بستگی دارد [۸۴ و ۸۵]. از این رو میزان تقاضای ذخیره‌سازی را می‌توان از رابطه زیر تعیین کرد [۹۲]:

$$SD = \frac{TDL \times NNSD}{\eta_{\text{coulomb}}} \quad (3 - 14)$$

که SD^1 میزان تقاضای ذخیره‌سازی (Wh) ، TDL^2 کل بار روزانه که $1/2$ برابر کل مصرف انرژی روزانه است (Wh) ، $NNSD^3$ تعداد روزهای متوالی بدون آفتابی در ماه است که معمولاً به طور میانگین بین ۱ تا ۳ روز در نظر گرفته می‌شود [۷۰]. همچنین η_{coulomb} نیز بازده کولومب است که معمولاً $0/8$ فرض می‌شود [۹۲]. امروزه انواع مختلفی از باتری‌های قابل شارژ بر اساس مواد بکار رفته در آنها وجود دارد مانند باتری‌های لیتیوم-یون، سدیم-یون، نیکل-کادمیوم، نیکل-آهن، نیکل-روی و غیره. اما در اغلب سیستم‌های خورشیدی به علت پرهزینه بودن دیگر انواع باتری‌های قابل شارژ، از باتری‌های سرب اسید استفاده می‌شود که به دو دسته سرب اسید تر^۴ و سرب اسید خشک (VRLA^۵)

^۱ Storage demand

^۲ Total Daily Load

^۳ Number of No Sunny Days

^۴ flooded lead acid battery

^۵ Valve Regulated Lead Acid Battery

تقسیم می‌شوند. باتری‌های قدیمی که در خودروها مورد استفاده قرار می‌گرفت از نوع سرب اسید تر می‌باشند. در این نوع باتری از محلول آب اسید استفاده می‌شود و مزیت آن قیمت کمتر این نوع باتری‌ها نسبت به باتری‌های اسید خشک است اما از معایب آنها می‌توان به تعمیر و نگهداری مداوم و خطرات احتمالی استفاده از اسید اشاره کرد. همچنین این باتری‌ها هنگام شارژ شدن از خود گازهایی ساطع می‌کنند که برای سلامتی مضر است و به همین دلیل جهت استفاده در مکان‌های پوشیده مناسب نیستند مگر اینکه برای آن تهویه مناسب در نظر گرفته شود. اما باتری‌های خشک که به دو دسته کلی AGM و GEL تقسیم می‌شوند بخاطر هزینه‌های بسیار پایین تعمیر و نگهداری‌شان امروزه بیشتر از باتری‌های اسید تر مورد استقبال قرار می‌گیرند. مواد موجود در الکترولیت‌های این باتری‌ها به ندرت با هیدورژن ترکیب می‌شوند بنابراین این باتری‌ها خورده نمی‌شوند. باتری‌های نوع GEL به دلیل داشتن تحمل دمایی بالاتر و طول عمر بیشتر گرانتز از نوع AGM می‌باشند. اما امروزه باتری‌های AGM به دلیل عدم نیاز به تعمیر و نگهداری خاص مانند آب دادن‌های دوره‌ای و نیز طول عمر قابل قبول در کنار قیمت مناسب‌تر نسبت به نوع GEL فراگیرترند. همچنین باتری‌های مورد استفاده در سیستم‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر مانند انرژی خورشیدی به دلیل متغیر بودن شرایط جوی باید از نوع سیکل عمیق^۱ (دارای دفعات چرخه شارژ و دشارژ بالا) باشند. ازینرو بنابر آنچه گفته شد در این مطالعه نیز از باتری‌های AGM نوع سیکل عمیق استفاده شده است.

۳-۱۰- شارژ کنترلر

با زیاد شدن نور خورشید، پنل خورشیدی ولتاژ بیشتری تولید می‌کند و ولتاژ بیش از حد پنل خورشیدی می‌تواند به باتری‌ها آسیب برساند. به همین دلیل دستگاه شارژ کنترلر برای تامین یک ولتاژ مناسب جهت شارژ باتری‌ها استفاده می‌شود. پس زمانی که ولتاژ تولیدی پنل خورشیدی بیش از حد بود، شارژ کنترلر ولتاژ را به حد مناسب جهت شارژ باتری کاهش می‌دهد تا باتری‌ها در برابر شارژ و دشارژ بیش از حد آسیب نبینند. برای انتخاب شارژ کنترلرها باید دو پارامتر ولتاژ باتری (بانک باتری) و

^۱ Deep Cycle

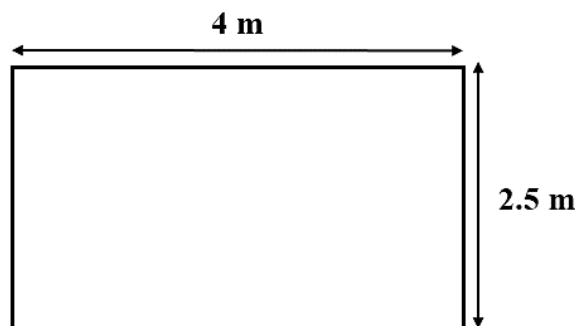
توان آرایه فتولتائیک را لحاظ نمود. ظرفیت شارژ کنترلرها بر حسب آمپر بیان می‌شود و از رابطه زیر محاسبه می‌شود [۷۰]:

$$I_{CC} = (I_{sc,pv} \times N_p) \times F_{safe} \quad (15-3)$$

که I_{CC} ظرفیت شارژکنترلر (A)، $I_{sc,pv}$ جریان اتصال کوتاه ماژول PV (A) موجود در جدول (۶-۶) (۳)، N_p تعداد رشته ماژول PV موازی و F_{safe} ضریب اطمینان^۱ که معمولاً ۱/۲۵ در نظر گرفته می‌شود.

۱۱-۳- مشخصات زمین در دسترس برای نصب تجهیزات

داشتن زمین در دسترس برای قرار دادن مجموعه PVWPS یکی از محورهای اصلی در موضوع فنی است. در واقع زمین باید به اندازه کافی وجود داشته باشد تا امکانات PVWPS مانند ماژول‌های PV، باتری، شارژ کنترلر و سایر تجهیزات در آن قرار گیرد. در این مطالعه فضای موجود در دسترس برای نصب سیستم پمپاژ آب PV، زمینی با مساحت ۱۰ متر مربع با ابعاد شکل (۳-۱۶) می‌باشد.



شکل ۳-۱۶- ابعاد زمین در دسترس برای نصب سیستم پمپ خورشیدی

۱۲-۳- مدل‌سازی اقتصادی پروژه

روش هزینه‌های چرخه عمر (LCC^۲) بیشترین استفاده را برای ارزیابی هزینه‌های PVWPS و در نتیجه انتخاب پیکربندی بهینه دارد [۹۳]. این روش به طور گسترده برای مقایسه سیستم‌های تجدیدپذیر در مقایسه با سیستم‌های متداول استفاده می‌شود [۵۸ و ۸۹]. در این روش هزینه‌های

^۱ Safety Factor

^۲ Life Cycle Costs

اولیه، هزینه‌های تعویض، تعمیر و نگهداری و در نهایت هزینه‌های نصب لحاظ می‌گردد. همچنین از ارزش اسقاطی^۱ تمامی تجهیزات به دلیل ناچیز بودن، صرف نظر شده است [۴۹]. بنابراین خواهیم داشت [۷۱]:

$$LCC = C_{\text{capital}} + C_{\text{replacement}} + C_{\text{maintenance}} + C_{\text{installation}} \quad (۱۶-۳)$$

C_{capital} هزینه‌های اولیه شامل خرید تمام تجهیزات است که برابر است [۷۱]:

$$C_{\text{capital}} = C_{\text{PV array}} + C_{\text{PV structure}} + C_{\text{MP}} + C_{\text{battery bank}} + C_{\text{charge controller}} \quad (۱۷-۳)$$

$C_{\text{replacement}}$ شامل هزینه‌های تعویض تجهیزات با اتمام طول عمرشان است و از رابطه زیر بدست

می‌آید [۷۱]:

$$C_{\text{replacement}} = \sum C_0 \times PW = \sum C_0 \times \left(\frac{1+i}{1+d}\right)^n \quad (۱۸-۳)$$

که C_0 قیمت اولیه هر کدام از تجهیزات و PW ^۲ فاکتور ارزش حال می‌باشد که به دو عامل نرخ

تورم^۳ (i) و نرخ تنزیل^۴ (d) و سال تعویض تجهیزات (n) بستگی دارد.

$C_{\text{maintenance}}$ هزینه‌های تعمیر و نگهداری مانند هزینه‌های تمیز کردن گرد و غبار ماژول‌ها، کابل

کشی‌ها و چک کردن ترمینال‌های باتری‌ها و نیز مباحثی مانند فنس کشی برای افزایش امنیت

سیستم در طی طول عمر پروژه است که برابر است با [۷۱]:

$$C_{\text{maintenance}} = C_0 \times \left(\frac{1+i}{1+d}\right) \times \left(\frac{1-x^n}{1-x}\right) = C_0 \times \left(\frac{1+i}{1+d}\right) \times CPW \quad (۱۹-۳)$$

که در آن CPW همان فاکتور ارزش حال تجمعی^۵ است و n در اینجا طول عمر پروژه و برابر با ۲۵

سال در نظر گرفته شده است. همچنین $C_{\text{installation}}$ هزینه‌های نصب، اجرت و حمل و نقل و کابل

کشی‌ها می‌باشد و برابر است با [۴۹]:

¹ Salvage costs

² Present Worth Factor

³ Inflation rate

⁴ Discount rate

⁵ Cumulative Present Worth Factor

$$C_{\text{installation}} = 0.1 \times C_{\text{capital}} \quad (۲۰ - ۳)$$

در این مطالعه میانگین نرخ تورم و نرخ تنزیل برای ایران به ترتیب برابر با ۹/۶٪ و ۱۵٪ در نظر گرفته شده است. (بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران-۲۰۱۷ [۹۴]). همچنین تمام قیمت‌ها برای ساده سازی به دلار آمریکا تبدیل می‌شوند و هر دلار در سال ۲۰۱۷ در ایران بطور میانگین برابر با ۳۵۰۰۰ ریال ایران می‌باشد [۹۴]. علاوه بر این برای مقایسه هزینه‌های نهایی در مقیاس جهانی یکبار دیگر هزینه‌های چرخه عمر سیستم بر اساس نرخ تورم و نرخ تنزیل در سال ۲۰۱۷ برای چندین کشور مبنا از جمله (کشورهای عضو اتحادیه اروپا- آمریکا، مکزیک، کلمبیا و برزیل به عنوان نماینده قاره های آمریکای شمالی، مرکزی و جنوبی- ژاپن، کره جنوبی، ویتنام، چین و هند به عنوان نماینده آسیای مرکزی و شرقی- قطر، کویت، لبنان و عربستان سعودی به عنوان نماینده خاورمیانه- آفریقای جنوبی، تونس، غنا، نیجریه و نامیبیا به عنوان نماینده قاره آفریقا و کشور استرالیا به عنوان نماینده این قاره) در نظر گرفته شده است که میانگین نرخ تورم و نرخ تنزیل برای کشورهای مذکور به ترتیب برابر با ۰.۸٪/۴ و ۵/۴۳٪ محاسبه شده است [۹۵ و ۹۶]. همچنین از دیگر تفاوت‌ها در محاسبه هزینه‌های چرخه عمر برای ایران و منتخب جهان (جدا از متفاوت بودن نرخ‌های تورم و تنزیل در دو سناریو)، هزینه ساخت سازه نگهدارنده ماژول‌های PV (استراکچر) می‌باشد که به طور میانگین توسط آزمایشگاه ملی انرژی‌های تجدیدپذیر ایالت متحده آمریکا (NREL^۱) در سال ۲۰۱۷، به طور متوسط ۱۱ سنت به ازای هر وات نیروگاه PV گزارش شده است [۹۷]. قابل ذکر است که طول عمر تجهیزات به گفته سازندگان آنها به ترتیب برای ماژول‌های فتوولتائیک ۲۵ سال، واحد موتورپمپ ۱۰ سال و موتور از مجموعه موتورپمپ ۵ سال، بانک باتری ۹ سال و شارژکنترلر ۱۵ سال در نظر گرفته شده است. همچنین هزینه اولیه تمامی تجهیزات از سازندگان آنها بدست آمده است.

¹ National Renewable Energy Laboratory

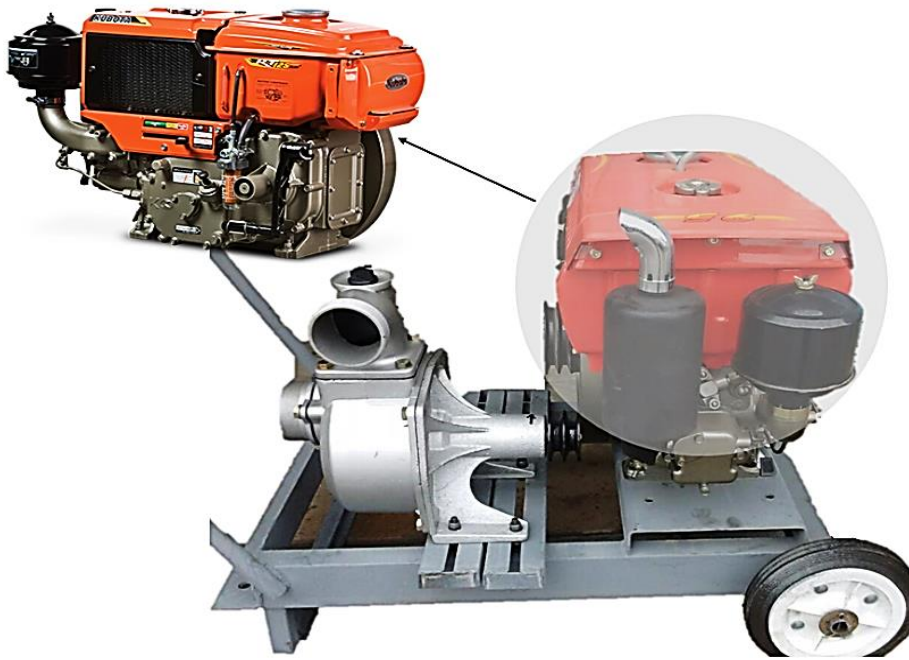
۳-۱۳- سیستم پمپاژ آب متداول

سیستم پمپاژ آب متداول در زمین‌های کشت برنج منطقه موردنظر شامل یک موتور دیزل با مشخصات جدول (۳-۸) بصورت کوپل شده توسط تسمه‌های لاستیکی با یک پمپ سانتریفیوژ سطحی^۱ (ساخت بومی) با قطر دهانه خروجی ۳ اینچ و حداکثر دبی روزانه ۴۰ مترمکعب بر ساعت برای آبیاری مزرعه شالیکاری بود. همچنین با توجه به دیزلی بودن اکثریت چاه‌های کشاورزی استان مازندران، در این مطالعه نیز مبنای مقایسه فنی، اقتصادی و زیست محیطی PVWPS، موتورپمپ‌های دیزلی می‌باشند.

جدول ۳-۸- مشخصات سیستم پمپاژ متداول دیزلی [۹۸]

مدل	KUBOTA RT100 DI
تعداد سیلندر	۱
حجم موتور (CC)	۵۴۷
حداکثر توان (HP/rpm (KW/rpm))	۱۰/۲۴۰۰ (۷,۴/۲۴۰۰)
توان خروجی لحظه ای (HP/rpm (KW/rpm))	۹/۲۴۰۰ (۶,۶/۲۴۰۰)
نسبت تراکم	۱۸:۱
حداکثر گشتاور (Kg-m /rpm)	۳,۴/۱۶۰۰
حجم تانک سوخت (L)	۱۱
نوع سوخت	گازوئیل
مصرف سوخت (g/HP-hr)	۲۳۱، در توان لحظه ای موتور
سیستم احتراق	توزیع مستقیم
سیستم خنک کننده	رادیاتور
نوع روغن مصرفی	SAE 40 API CF

¹ centrifugal surface pump



شکل ۳-۱۷- نمایشی از سیستم پمپاژ متداول دیزل در زمین های کشاورزی استان مازندران

در سیستم‌های پمپاژ مرسوم، هزینه‌های عمده شامل هزینه واحد موتورپمپ و نیز هزینه‌های تعمیر و نگهداری و سوخت مصرفی است. هزینه‌های تعمیر و نگهداری نیز عمدتاً شامل تعویض سیالات و تجهیزات مانند تعویض روغن (هر ۲۴ ساعت ۲/۵ لیتر و هر لیتر برابر با ۲/۳۵ دلار)، تعویض فیلترهای سوخت و نیز برخی دستمزدها برای چک کردن‌های دوره‌ای است. میزان مصرف سوخت با توجه به ساعات کارکرد سیستم در روز محاسبه می‌شود که خود به شدت به مرحله رشد برنج بستگی دارد. این مقدار برای یک هکتار زمین بر اساس تحقیقات محلی برابر با حدوداً ۸۲۰ ساعت در طول زمان رویشی محصول می‌باشد. اما میزان سوخت مصرفی سیستم موردنظر بر اساس مشخصات شرکت سازنده از جدول (۳-۸) حدود ۲/۱ لیتر در هر ساعت می‌باشد. با اینحال میزان سوخت مصرفی موتور دیزل را می‌توان از رابطه زیر نیز بدست آورد [۹۹]:

$$F_{DEC} = A_{DE}P_{DE} + B_{DE}P_{DEr} \quad (۳-۲۱)$$

که F_{DEC} میزان سوخت مصرفی موتور دیزل (L/h) ، P_{DEf} و P_{DE} به ترتیب حداکثر توان^۱ و توان لحظه ای خروجی موتور^۲ (KW) و A_{DE} و B_{DE} نیز ضرائب منحنی مصرف سوخت موتورهای دیزل (L/Kwh) می باشند که معمولاً این مقادیر به ترتیب ۰/۲۴۶ و ۰/۰۸۱۴۵ در نظر گرفته می شوند. ازینرو با توجه به اطلاعات جدول (۳-۸) میزان سوخت مصرفی موتور دیزل ۲/۲۲ لیتر بر ساعت خواهد بود که این مقدار در توافق نسبتاً خوبی با مقدار اعلام شده از سوی شرکت سازنده می باشد. بنابراین در صورت جایگزینی سیستم پمپاژ متداول با نوع PVWPS و با توجه به تعداد ساعات آبیاری و میزان مصرف سوخت موتور دیزل مورد مطالعه، به ترتیب به میزان ۱۷۲۲ لیتر (بر اساس ادعای شرکت سازنده) الی ۱۸۲۰ لیتر (بر اساس فرمول تجربی) در مصرف گازوئیل و ۸۵ لیتر در مصرف روغن موتور صرفه جویی خواهد شد. همچنین هزینه حمل و نقل مربوط به انتقال گازوئیل از جایگاه سوخت به زمین کشت برنج در طول روزهای آبیاری نیز به هزینه های سوخت اضافه شده است. قیمت هر لیتر گازوئیل بدون یارانه نیز به طور متوسط در ایران برابر با ۰/۲۰ دلار آمریکا است. همچنین فرض بر این است که طول عمر واحد موتور پمپ ۱۰ سال می باشد و پس از آن باید با یک مدل جدید جایگزین شود. لازم به ذکر است که تمامی اطلاعات این بخش توسط تعدادی از کشاورزان و تعمیرکاران محلی و نیز شرکت های سازنده این تجهیزات بدست آمده است. در نهایت جزئیات هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ متداول مورد مطالعه در جدول (۳-۹) آمده است.

جدول ۳-۹- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ مرسوم مورد مطالعه

هزینه های سیستم پمپاژ متداول دیزل (ایران)			اجزاء
هزینه اولیه (ریال)	ارزش حال (ریال)	ارزش حال (دلار آمریکا)	
۱۰۵۰۰۰۰۰	۱۰۵۰۰۰۰۰۰	۳۰۰۰	موتور پمپ دیزل
۵۲۵۰۰۰۰	۵۲۵۰۰۰۰	۱۵۰	شاسی و نصب
۱۰۵۰۰۰۰۰	۶۴۹۲۵۰۰۰	۱۸۵۵	تعویض موتور پمپ بعد از ۱۰ سال
۱۰۵۰۰۰۰۰	۴۰۱۴۵۰۰۰	۱۱۴۷	تعویض موتور پمپ بعد از ۲۰ سال
۷۰۰۰۰۰۰	۲۰۰		هزینه فیلترهای سوخت و تعویض روغن
۵۲۵۰۰۰۰	۱۵۰		هزینه دستمزدهای دوره ای

^۱ Rated power

^۲ Instantaneous output power

۵۲۰	۱۸۲۰۰۰۰۰	هزینه های سوخت و انتقال
۱۲۳۵۴	۳۰۴۵۰۰۰۰	هزینه های سوخت و تعمیر و نگهداری سالیانه
۱۸۵۰۶	۶۴۷۷۱۰۰۰۰	هزینه های چرخه عمر
	٪۹/۶	متوسط نرخ تورم (۲۰۱۷)
	٪۱۵	متوسط نرخ تنزیل (۲۰۱۷)

بنابراین هزینه‌های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ متداول مورد مطالعه در طول عمر ۲۵ ساله پروژه، معادل ۱۸۵۰۶ دلار خواهد بود.

۳-۱۴- طرح فروش برق به شبکه

در صورتیکه زمین کشاورزی محل نصب آرایه فتوولتائیک در نزدیکی شبکه یا خطوط انتقال و توزیع برق باشد می‌توان از مزایای فروش هر کیلووات ساعت برق تزریق شده به شبکه در طی یک قرارداد خرید تضمینی ۲۰ ساله بهره مند شد [۲۳]. در اینصورت برای تزریق برق به شبکه از آرایه فتوولتائیک باید از یک اینورتر برای تبدیل جریان DC به AC استفاده شود. تعیین اندازه ظرفیت اینورتر به میزان ظرفیت نامی آرایه PV بستگی دارد [۱۰۰]. معمولاً توصیه می‌شود ظرفیت اینورتر برابر با ظرفیت نیروگاه فتوولتائیک در شرایط نامی باشد، اما ظرفیت آرایه فتوولتائیک در شرایط واقعی پس از کسر تلفات قطعا کمتر از ظرفیت نامی آن خواهد بود. بنابراین هنگام مشاهده مشخصات اینورتر باید توجه داشت که تولید کنندگان اینورتر اجازه می‌دهند تا مقدار ظرفیت آرایه PV تا ۱۰٪ یا بیشتر، بزرگتر از توان خروجی اینورتر باشد [۷۱]. مشخصات اینورتر انتخابی در جدول (۳-۱۰) آمده است.

جدول ۳-۱۰- مشخصات اینورتر انتخابی [۱۰۱]

متصل به شبکه	نوع
AEG AS-IR01-1000	مدل
۱۲۰۰	حداکثر توان ورودی DC (W _P)
۴۵۰	حداکثر ولتاژ ورودی DC (V)
۶۰-۴۰۰	محدوده ولتاژ کاری MPPT (V)
۱۰۰۰	نرخ توان خروجی AC (W _P)
۲۳۰/۱۸۰-۲۷۷	محدوده ولتاژ کاری مرتبط با شبکه (V)

۵۰	بازه فرکانس شبکه (Hz)
تک فاز	خروجی AC
۹۶/۹	حداکثر راندمان (%)
خنک کاری طبیعی، IP65	درجه حفاظت و نوع خنک کاری
کمتر از ۲۵ دسیبل در فاصله یک متر	آلودگی صوتی
۲۸۰×۳۰۰×۱۳۸	ابعاد (mm)



شکل ۳-۱۸- اینورتر انتخابی در مطالعه حاضر [۱۰۳]

اینورتر مورد مطالعه با توجه به ظرفیت نیروگاه و فرکانس شبکه برق ایران از نوع تک فاز، ۵۰ هرتز و با حداکثر راندمان ۹۶/۹٪ می‌باشد که تا حداکثر ۱/۲ کیلووات توان DC را پشتیبانی می‌کند. حال برای بدست آوردن حداکثر (یا حداقل) تعداد ماژول قابل قبول در یک رشته ماژول PV مربوط به اینورتر باید حداکثر ولتاژ DC ورودی به اینورتر (و یا حداقل ولتاژ نقطه توان بیشینه‌ی اینورتر) از جدول (۳-۱۰) را بر حداکثر (حداقل) ولتاژ ماژول خورشیدی مطابق رابطه زیر تقسیم کرد [۷۱]:

$$N_{\max} = \frac{V_{\text{Max.DC input voltage to inverter}}}{V_{\text{Mod.OC}}} \quad (۲۲-۳)$$

$$N_{\min} = \frac{V_{\text{min.mpp operating voltage inverter}}}{V_{\text{Mod.mpp}}}$$

از آنجا که ولتاژ با دما رابطه عکس دارد بنابراین بیشترین (کمترین) ولتاژ ماژول در کمترین (بیشترین) دمای محیط از رابطه زیر بدست می آید [۷۱]:

$$V_{OC/mpp} = V_{(OC/mpp)@STC} + \mu_V \times (T_m - T_{m,ref}) \quad (23-3)$$

که در آن $V_{(OC/mpp)@STC}$ ولتاژ مدار باز/حداکثر نقطه توان پنل در شرایط STC از جدول (۳-۶) بر حسب ولت (V)، μ_V ضریب دمایی ولتاژ پنل از جدول (۳-۶) بر حسب $(\%/C^\circ)$ ، T_m دمای ماژول در کمترین دمای محیط (C°) و $T_{m,ref}$ دمای ماژول در شرایط استاندارد که برابر با ۲۵ سانتیگراد می باشد. در این مطالعه تزریق برق به شبکه از یک روز پس از اتمام دوره رویشی محصول (۷ سپتامبر) شروع و تا یک روز قبل از شروع مجدد دوره آبیاری (۱۴ آوریل) به مدت ۲۲۰ روز در نظر گرفته شده است. بازه تغییرات دمایی محیط در این مدت نیز برابر با ۴/۸ تا ۳۵/۲ درجه سانتیگراد می باشد [۴۱]. همچنین دمای ماژول طبق رابطه (۳-۸) با فرض $G=0$ برای اوایل صبح (برای محاسبه حداکثر ولتاژ در کمترین دمای محیط) و $G=1000 \text{ W/m}^2$ برای اواسط روز که خورشید در حداکثر تابش خود قرار دارد (برای محاسبه کمترین ولتاژ در حداکثر دمای محیط) به ترتیب برابر با ۴/۸ و ۶۶/۴ درجه سانتیگراد می باشد. بنابراین حداکثر ولتاژ مدار باز در کمترین دمای ماژول و یا حداقل ولتاژ نقطه توان بیشینه در بیشترین دمای ماژول از رابطه (۳-۲۳) به ترتیب برابر با ۲۴/۵۳ ولت و ۱۵/۵۵ ولت خواهد بود. در نهایت حداکثر و حداقل تعداد ماژول فتوولتائیک قابل قبول مربوط به اینورتر در هر رشته با توجه به رابطه (۳-۲۲) و اطلاعات جدول (۳-۱۰) برابر است با:

$$N_{max} = \frac{450}{24.53} = 18.34$$

$$N_{min} = \frac{60}{15.55} = 3.85$$

بنابراین تعداد ماژول های سری قابل قبول در هر رشته با توجه به مشخصات ولتاژی پنل و اینورتر انتخابی و نیز تغییرات دمایی منطقه بین ۴ تا ۱۸ عدد می باشد.

۳-۱۵-مدل سازی اثرات زیست محیطی

تولید برق از پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک از نگاه زیست محیطی باعث صرفه‌جویی در مصرف آب جهت تولید برق در نیروگاه‌های حرارتی، هسته‌ای و برق آبی برای تامین انرژی پمپ‌های برقی در حوزه کشاورزی، کاهش مصرف سوخت و صیانت از منابع ملی، و مواردی نظیر عدم نشت روغن به درون زمین‌های کشاورزی ناشی از موتورهای دیزلی می‌شود. یکی دیگر از مزایای سیستم‌های PV نسبت به سیستم‌های مرسوم دیزلی آلودگی صوتی^۱ بسیار پایین آنهاست. در سیستم مورد مطالعه، پنل‌های PV در هنگام تولید برق بدون لرزش و تولید صدا بوده و تنها اینورتر در این مجموعه با توجه به اطلاعات جدول (۳-۱۰) دارای نویز صدای کمتر از ۲۵ دسیبل می‌باشد که جزوه صداهای آزاردهنده محسوب نمی‌شود. همچنین مجموعه موتورپمپ نیز در عمق ۱۴ متری چاه و بصورت شناور در آب بوده که از این حیث دارای کمترین نویز صدا خواهد بود. اما در بخش سیستم پمپاژ متداول میزان آلودگی صوتی کاملاً محسوس است! برای مشخص شدن این موضوع از نرم افزار Smart Tools (Sound Meter) نصب شده بر روی دستگاه SM-G930FD شرکت سامسونگ استفاده شده است. این آزمایش در یک روز آفتابی و در یک فضای باز بدون هیچ مانع یا بازتاب کننده صدا بین منبع تولید صدا (موتوردیزل مورد مطالعه) و میکروفون دستگاه صداسنج انجام شده است. شرایط تست به گونه‌ای بود که آزمایش به مدت ۳۰ ثانیه درحالی‌که دستگاه سنجش صدا در فاصله یک متری و در ارتفاع ۱/۵ متر رو به منبع صدا قرار داشت انجام شده است که در فصل بعد به تحلیل نتایج آن خواهیم پرداخت. اما یکی دیگر از مزایا و برتری‌های اصلی انرژی‌های تجدیدپذیر و تولید برق فتوولتائیک، سازگاری با محیط زیست و عدم انتشار آلاینده‌های زیست محیطی نسبت به رقبای خود (پمپ‌های دیزلی و برقی وابسته به شبکه) است. به عنوان مثال در سال ۲۰۰۰ میلادی، در کشور بنگلادش میزان کربن دی اکسید تولید شده از پمپ‌های آبیاری ۳/۹ میلیون تن بوده است که به طور قابل توجهی به میزان ۸/۴ میلیون تن در سال ۲۰۱۱ افزایش یافت (در بنگلادش حدود ۱/۷۱ میلیون

¹ Noise emission

پمپ آبرسانی وجود دارد که ۸۳ درصد موتور دیزل و ۱۷ درصد برقی بودند) [۱۰۲]. بنابراین در این بخش از مطالعه به میزان کاهش انتشار یکی از مهمترین آلاینده‌های زیست محیطی یعنی گاز کربن دی اکسید به عنوان یکی از عوامل اصلی گرمایش زمین بواسطه پنل‌های فتوولتائیک خواهیم پرداخت. جدول (۳-۱۱) گزارش وزارت نیرو در مورد میزان انتشار آلاینده کربن دی اکسید برای تولید یک کیلووات ساعت برق از نیروگاه‌های مختلف در سال ۲۰۱۴ را نشان می‌دهد.

جدول ۳-۱۱- شاخص انتشار آلاینده CO2 از انواع نیروگاه‌های مختلف برق ایران در سال ۲۰۱۴ [۱۰۳]

شاخص انتشار آلاینده CO2 از انواع نیروگاه‌های کشور	گرم/کیلووات ساعت
وزارت نیرو	
بخاری	۸۲۴/۹
گازی	۸۴۹/۴
سیکل ترکیبی	۴۶۹/۹
دیزلی	۸۲۶/۴
بخش خصوصی	
بخاری	۷۶۴/۹
گازی	۷۹۸/۵
سیکل ترکیبی	۴۸۳/۹
صنایع بزرگ	۱۱۸۲/۷
میانگین وزنی کل	۶۹۴/۹

برای تخمین میزان کاهش تولید CO2 در تولید برق به روش فتوولتائیک نسبت به نیروگاه‌های

سوخت فسیلی از رابطه زیر استفاده می‌کنیم [۴۳]:

$$CB = (E_{\text{eff,PV Array}} \times LCE_{\text{Grid}} \times 25) - LCE_{\text{PV}} \quad (24-3)$$

که CB^1 میزان کاهش انتشار کربن دی اکسید بر حسب تن^۲، $E_{\text{eff, PV array}}$ میزان تولید انرژی از آرایه فتوولتائیک (kwh)، LCE_{Grid} میزان انتشار کربن دی اکسید برای تولید یک کیلووات ساعت انرژی از طریق شبکه سراسری برق بر حسب (Kg_{co2}/Kwh) که ناشی از انتشار مستقیم کربن دی اکسید ایجاد شده در اثر احتراق سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های مختلف (بخاری، گازی، سیکل

¹ CO2 Balance

² Effective energy at the output of PV array

³ Life Cycle Emission

ترکیبی یا دیزلی) می‌باشد که مطابق جدول (۱۱-۳) برابر با ۶۹۴/۹ گرم به ازای هر کیلووات ساعت تولید برق می‌باشد. LCE_{PV} نیز میزان انتشار کربن دی اکسید چرخه عمر نیروگاه فتوولتائیک ناشی از انتشار در زمان ساخت، بهره‌برداری و نگهداری نیروگاه و نیز انتشار در زمان از بین بردن آن (kg_{CO2}/Kwh) می‌باشد که با توجه به نوع تکنولوژی ماژول‌های PV مورد استفاده در این مطالعه (فناوری مونوکریستال) و بر اساس مراجع [۱۰۴ و ۱۰۵] معمولاً در محدوده ۲۶ تا ۶۲ گرم کربن دی اکسید به ازای تولید هر کیلووات ساعت انرژی می‌باشد که در این مطالعه میانه این بازه یعنی ۴۱ گرم به ازای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده است [۱۰۵ و ۱۰۶]. حال کافی است میزان تولید برق از پنل‌های PV در مدت زمان ۱۴۵ روزه آبیاری را از رابطه زیر محاسبه کنیم:

$$E_{eff,PV Array} = P_{max,actual} \times N_{PV,req} \times N_{irr,days} \times SH \quad (۳-۲۵)$$

که $P_{max,actual}$ طبق رابطه (۳-۶) برابر با ۰/۰۶۱۵۶ کیلووات، $N_{PV,req}$ تعداد ماژول‌های مورد نیاز بعد از بهینه سازی، $N_{irr,days}$ تعداد روزهای آبیاری (۱۴۵ روز) و SH میانگین تعداد ساعات آفتابی (در بخش بعدی) می‌باشد.

۴ فصل چهارم:

بحث و نتایج

۴-۱-مقدمه

در فصل سوم روابط حاکم بر سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک، هزینه‌های چرخه عمر و تاثیرات زیست محیطی سیستم مذکور مورد بررسی قرار گرفت. در این فصل نتایج حاصل از مدل‌سازی ظرفیت بهینه اجزاء سیستم پمپاژ فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفته است. تعداد و ظرفیت منبع تامین توان سیستم مورد نظر (ماژول‌های فتوولتائیک) توسط کدنویسی در محیط نرم‌افزار متلب و به کمک الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II) بهینه‌سازی شده است. همچنین برای تعیین ظرفیت میزان دبی بهینه مورد نیاز و نیز بهینه‌سازی ظرفیت سایر اجزاء PVWPS نظیر موتورپمپ، بانک باتری، شارژکنترلر و اینورتر از روابط بهینه عددی موجود در فصل سوم استفاده شده است. در ادامه نیز نتایج حاصل از تحلیل اقتصادی و زیست‌محیطی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک در مقایسه با رقبای دیزلی و برقی (شبکه سراسری برق) خود به کمک روابط حاکم در فصل قبل و نیز با استفاده از نرم‌افزار PVsyst آورده شده است.

۴-۲-دبی بهینه

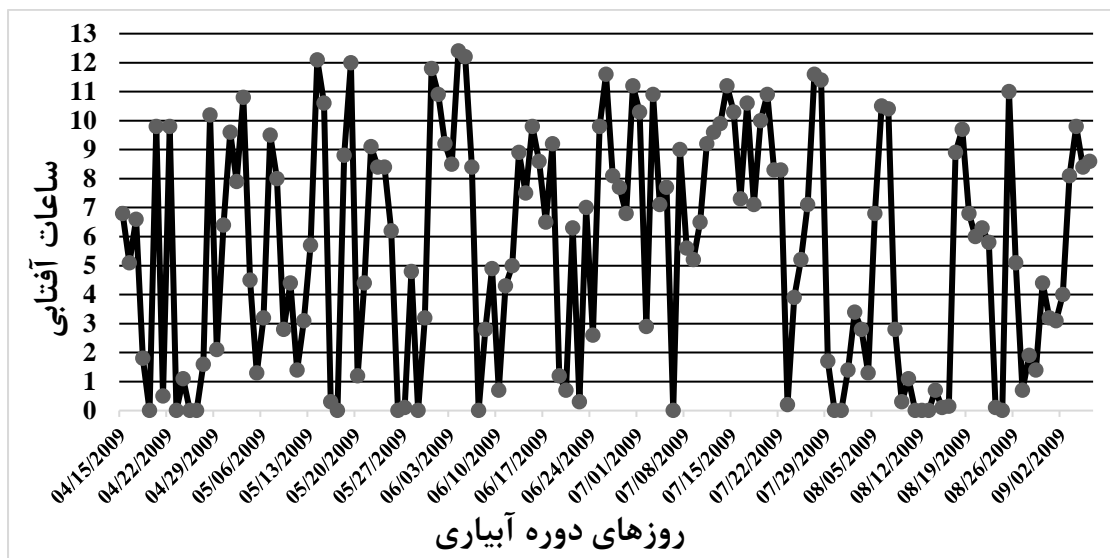
در این مطالعه نیاز خالص آبیاری برنج برای شهرستان ساری به روش پنمن-مونتیث از رابطه (۳-۴) برابر با $684/2$ میلیمتر و طول دوره رشد برنج نیز از ۲۶ فروردین (۱۵ آوریل) تا ۱۵ شهریور (۶ سپتامبر) به مدت ۱۴۵ روز در نظر گرفته شده است [۴۷] که این عدد و نیز طول دوره رویشی محصول به ترتیب در محدود ۴۵۰-۷۰۰ میلیمتر (نیاز خالص آبیاری برنج) و ۹۰-۱۵۰ روز (طول دوره رویشی برنج) FAO نیز صدق می‌کند [۱۰۷]. بنابراین با توجه به نیاز آبی محصول و مساحت زمین تحت کشت (یک هکتار)، به 6842 مترمکعب آب در طول دوره رویشی محصول نیاز خواهد بود که فاصله معناداری با ۹۰۰۰ مترمکعب آبیاری این محصول توسط کشاورزان محلی دارد. بنابراین با تعیین حجم آب مورد نیاز آبیاری به روش نیاز خالص آبیاری محصول، به میزان قابل توجهی در مصرف آب صرفه جویی شده و باعث افزایش بهره‌وری در امر آبیاری خواهد شد. حال اگر این مقدار را بر تعداد روزهای رویشی محصول (۱۴۵ روز) تقسیم کنیم، میزان آب مورد نیاز روزانه برابر با $47/18$ مترمکعب

خواهد بود. از آنجا که سیستم پمپاژ در این مطالعه از نوع خورشیدی است. بنابراین میزان ساعات کارکرد آن شدیداً به میزان ساعات آفتابی در طول روز وابسته است. از این رو تعداد ساعات آفتابی در طول دوره رویشی گیاه بر اساس آمار ایستگاه هواشناسی استان برای شهرستان ساری مطابق شکل (۱-۴) است. همانطور که ملاحظه می‌شود شهرستان ساری در سال ۲۰۱۶ در مجموع، ۲۰۴۷ ساعت آفتابی داشته است. همچنین بیشترین و کمترین ساعات آفتابی به ترتیب متعلق به ماه های اوت (۲۵۲/۲ ساعت) و نوامبر (۹۴/۷ ساعت) می‌باشد.



شکل ۱-۴- متوسط ساعات آفتابی در ماه های مختلف سال برای شهر ساری [۴۱]

برای مشخص شدن بیشتر، شکل (۲-۴) جزئیات مربوط به ساعت‌های آفتابی شهرستان ساری در مدت زمان دوره آبیاری مربوط به سال ۲۰۰۹ میلادی را نشان می‌دهد [۴۱].



شکل ۴-۲- متوسط ساعات آفتابی در روزهای دوره آبیاری برای شهر ساری [۴۱]

با بررسی دقیق‌تر مقادیر شکل بالا در نرم افزار Excel، تعداد روزهای بدون آفتاب (کاملاً ابری یا بارانی)، ۱۵ روز با حداکثر ۳ روز متوالی در ماه به همراه ۷۴ روز با ساعات‌های آفتابی بیش از ۶ ساعت موجود می‌باشند. همچنین میانگین ساعات آفتابی روزانه در طول دوره آبیاری برابر با ۵/۶۰ ساعت برآورد شده است که این عدد در مطابقت با ساعت کاری روزانه پمپ مفروض در بخش‌های بعدی است. از این‌رو متوسط دبی بهینه از تقسیم میزان آب مورد نیاز روزانه بر میانگین ساعات آفتابی در روز، معادل ۸/۴۲ مترمکعب بر ساعت خواهد بود.

۴-۳- تعیین توان مورد نیاز پمپاژ و نوع مجموعه موتور پمپ

با توجه به اینکه زمین تحت کشت دارای یک حلقه چاه سطحی به عمق ۱۵ متر می‌باشد که پمپ در ارتفاع ۱۴ متری آن قرار دارد و نیز از آنجا که هد دینامیکی برابر با ۱۳ متر و طول لوله آب از دهانه چاه تا محل تخلیه نیز ۳ متر در نظر گرفته شده است. بنابراین با فرض تلفات اصطکاکی^۱ به میزان ۵ درصد [۷۱] هد دینامیکی کل^۲ برابر است با:

$$TDH = 13 + 0.05 \times (13 + 3) = 13.8$$

^۱ Piping Friction losses

^۲ Total Dynamic Head

بنابراین هد دینامیکی کل برابر با ۱۴ متر در نظر گرفته می‌شود. همچنین با فرض راندمان میانگین ۴۸ درصد برای موتور پمپ (با توجه به ادعای سازنده)، توان مورد نیاز پمپ از رابطه (۳-۵) برابر با ۶۶۹/۲۱ وات بدست می‌آید و از آنجا که توان پمپ همیشه باید بیشتر از مقدار طراحی باشد تا حجم دبی مورد نظر در هد معین را تضمین کند [۱۰۸]. از این‌رو در این مطالعه از یک موتور پمپ با توان ۷۰۰ وات استفاده خواهد شد که برخی مشخصات آن در جدول (۴-۱) آمده است.

جدول ۴-۱- مشخصات موتور پمپ خورشیدی انتخابی [۷۹]

نوع موتور پمپ	پمپ خورشیدی شناور نوع گریز از مرکز
شرکت سازنده و مدل پمپ	Lorentz PS2-600C-SJ8-5
نوع موتور	Brushless, DC
حداکثر توان (WP)	۷۰۰
راندمان موتور (%)	۹۲
راندمان کنترلر پمپ (%)	۹۸
راندمان موتور پمپ (%)	۴۸
هد پمپ (m)	۵-۱۵
حداکثر دبی (m ³ /h)	۱۲

همچنین در این مطالعه با توجه به سطحی بودن چاه (عمق ۱۰ تا ۲۰ متر) و حجم آب مورد نیاز روزانه‌ی بالا (حدود ۴۸ مترمکعب)، پمپ از نوع گریز از مرکز انتخاب شده است. علاوه بر این پمپ انتخابی از نوع شناور می‌باشد که از مزایای آن می‌توان به نصب آسان و جلوگیری از آسیب‌های احتمالی در شرایط آب و هوایی شدید بواسطه مغروق بودن در داخل چاه اشاره کرد. در سیستم‌های پمپ شناور، مجموعه موتور پمپ بصورت یکپارچه باهم ساخته می‌شوند، برخلاف پمپ‌های سطحی^۱ که در آن موتور و پمپ بصورت جداگانه انتخاب می‌شوند. موتور این مجموعه نیز از نوع BLDC بصورت یکپارچه با پمپ با قابلیت مغروق بودن تا حداکثر عمق ۱۵۰ متر و دارای درجه حفاظت IP68 به منظور مقاومت در برابر نفوذ آب و گرد و خاک می‌باشد. همچنین مجموعه موتور پمپ انتخابی از

^۱ Surface pump

مواد با کیفیت بالا از جنس استیل ضدزنگ با استاندارد AISI 304/316 به منظور مقاومت در برابر خوردگی برای ثبت عملکرد مطلوب در طولانی مدت و بدون نیاز به هزینه‌های تعمیر و نگهداری ساخته شده است. این موتورپمپ برای چاه‌های با حداقل دهانه ۴ اینچ مناسب است. تصویری از مجموعه موتورپمپ مورد مطالعه به همراه کنترلر آن (محصول شرکت لورنتز آلمان، سازنده تخصصی پمپ‌های خورشیدی) در شکل زیر نشان داده شده است.



شکل ۳-۴- موتور پمپ مورد مطالعه به همراه کنترلر (PCU) [۷۹]

همچنین جزئیات مربوط به مشخصات کنترلر (PCU) واحد موتورپمپ مورد مطالعه نیز در جدول زیر قابل مشاهده است.

جدول ۴-۲- مشخصات کنترلر مجموعه موتور پمپ انتخابی [۷۹]

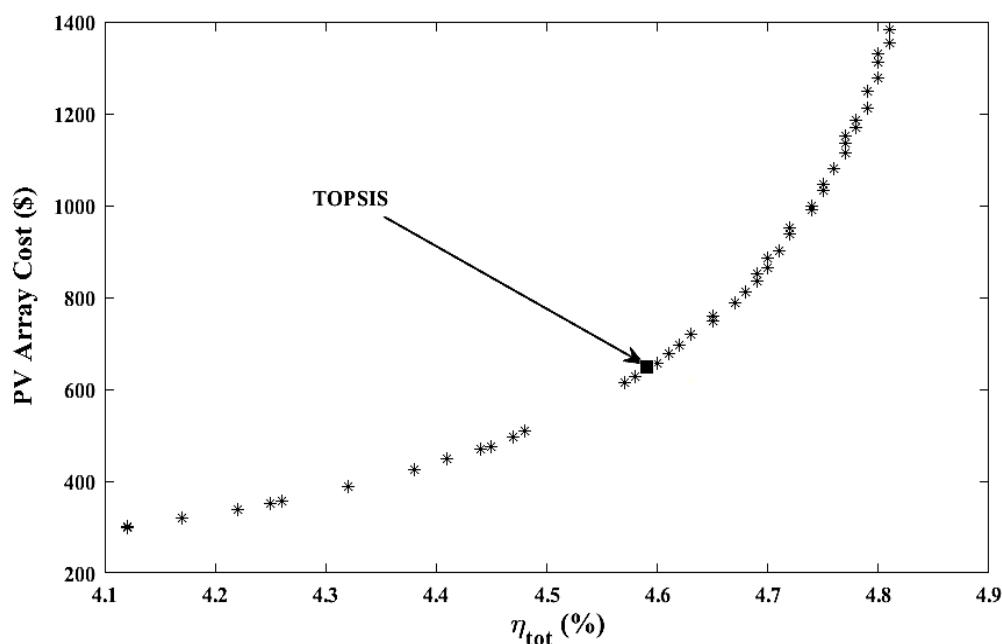
مدل کنترلر	Controller PS2-600
حداکثر توان (WP)	۷۰۰
حداکثر راندمان (%)	۹۸
حداکثر ولتاژ ورودی (V)	۱۵۰
کارکرد در دمای محیط (C°)	-۴۰ تا +۵۰
درجه حفاظت	IP68
سایر امکانات	دارای الگوریتم MPPT داخلی قابلیت کنترل و مانیتورینگ از راه دور حفاظت از موتور پمپ در برابر پلاریته معکوس، اضافه بار و کارکرد خشک

۴-۴- تعداد بهینه ماژول‌های فتوولتائیک و ظرفیت نهایی نیروگاه

همان‌طور که بیان گردید هدف از بهینه‌سازی، یافتن تعداد بهینه ماژول‌های فتوولتائیک مورد نیاز برای راه اندازی مجموعه موتور پمپ مورد مطالعه در دو حالت سری و موازی می‌باشد که سیستم بتواند بیشترین راندمان و کمترین هزینه‌های خرید برای پنل‌های خورشیدی را در بر داشته باشد. مطابق توابع هدف و متغیرهای تصمیم‌گیری و به کمک الگوریتم ژنتیک با مرتب سازی نامغلوب (NSGA-II)، بهترین نقطه با توجه به توابع هدف مطروحه برای سیستم پیشنهادی با استفاده از روش تاپسیس^۱ (TOPSIS) بر روی جبهه پارتو^۲ حاصل از فرآیند بهینه سازی در شکل (۴-۴) نشان داده شده است.

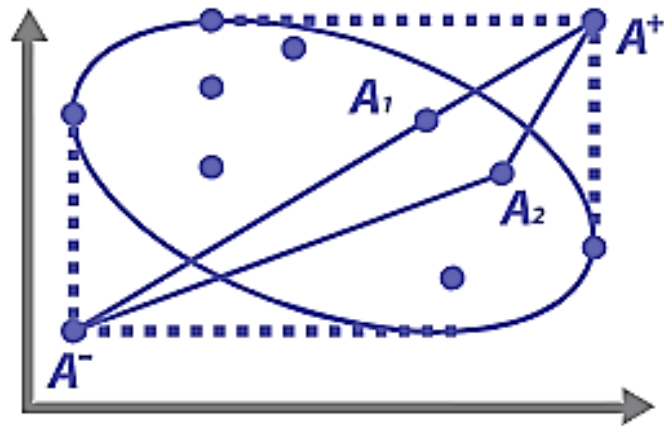
^۱ Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution

^۲ Pareto front



شکل ۴-۴- جبهه پارتو مسئله بهینه سازی دو هدفه در مطالعه حاضر

روش تاپسیس روش ارجحیت بر اساس شباهت به راه حل ایده‌آل است. این مدل توسط هوانگ و یون در سال ۱۹۸۱ [۱۰۹] معرفی شد که یکی از معروفترین روش‌های تصمیم‌گیری چند معیاره برای رتبه‌بندی گزینه‌ها به شمار می‌رود. منطق اصولی این مدل، راه حل ایده‌آل (مثبت) و راه حل غیر ایده‌آل (منفی) را تعریف می‌کند. راه حل ایده‌آل راه حلی است که معیار سود را بیشینه و معیار هزینه را کمینه می‌کند در حالی که راه حل غیر ایده‌آل راه حلی است که معیار هزینه را بیشینه و معیار سود را حداقل می‌کند. نقطه بهینه، نقطه‌ای است که کمترین فاصله از راه حل ایده‌آل و در عین حال دورترین فاصله را از راه حل غیر ایده‌آل دارد. در رتبه‌بندی نقاط به روش تاپسیس نقاطی که بیشترین تشابه را با راه حل ایده‌آل داشته باشند رتبه بالاتری کسب می‌کنند. فضای هدف بین دو معیار به عنوان نمونه در شکل (۴-۵) نشان داده شده است.



شکل ۴-۵- تعیین نقطه بهینه در فرآیند بهینه سازی با استفاده از روش تاپسیس

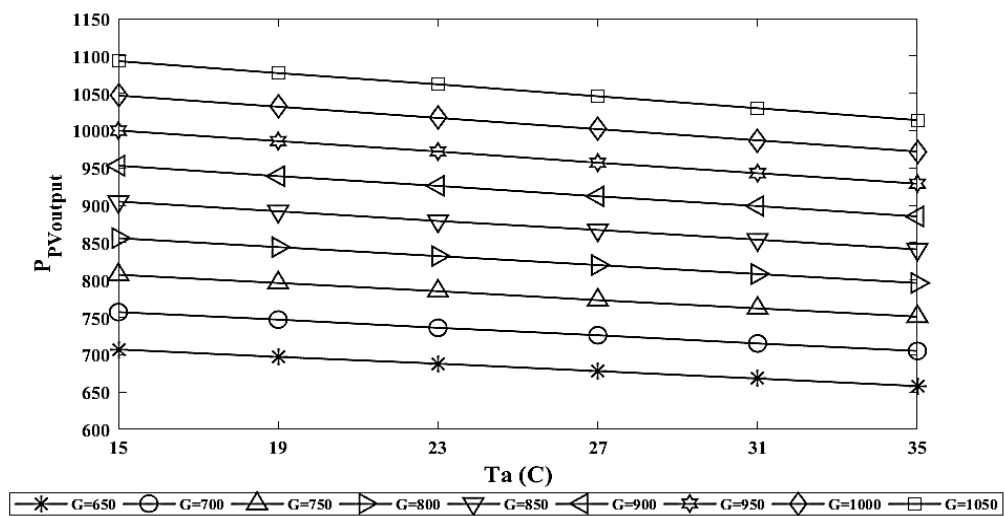
در اینجا نقطه $+A$ راه حل ایده آل و نقطه $-A$ راه حل غیر ایده آل می باشد زیرا از نظر هندسی، نقطه A_1 به نسبت نقطه A_2 فاصله کمتری تا راه حل ایده آل و همزمان فاصله بیشتری را تا راه حل غیر ایده آل دارد. بنابراین مطابق روش تاپسیس، نقطه بهینه در جبهه پارتو که در شکل (۴-۴) نیز مشخص شده است، دارای مختصات $4/60\%$ مربوط به راندمان کلی سیستم و $656/5$ دلار از تابع هزینه در مسئله بهینه سازی است. همچنین در این نقطه تعداد بهینه ماژول های سری (N_s) و تعداد رشته ماژول های PV بصورت موازی (N_p) به ترتیب $5/59$ و $2/35$ می باشند. بنابراین با رند کردن این اعداد به آرایش نهایی 6×2 (۶ ماژول سری در ۲ رشته موازی) برای چیدمان ماژول های PV در مطالعه حاضر می رسیم و از آنجا که ظرفیت هر ماژول مطابق جدول (۳-۶)، 100 وات می باشد بنابراین ظرفیت نهایی نیروگاه معادل $1/2$ کیلووات خواهد بود. همچنین باتوجه به روابط (۳-۱۰) و (۳-۱۱) و نیز میانگین دمای محیط به میزان $24/5$ درجه سانتیگراد از شکل (۳-۱) و متوسط تابش کل روی سطح شیبدار پنل با شیب 15 درجه به میزان 867 وات بر متر مربع از شکل (۳-۱۲) در طول دوره آبیاری، راندمان مجموعه آرایه PV و نیز راندمان کلی سیستم (در صورت ثابت بودن راندمان

موتورپمپ به میزان ۴۸ درصد) به ترتیب برابر با ۱۱/۲٪ و ۵/۳۸٪ خواهد بود که در توافق خوبی با نتایج سایر نویسندگان است [۳۷ و ۱۱۰].

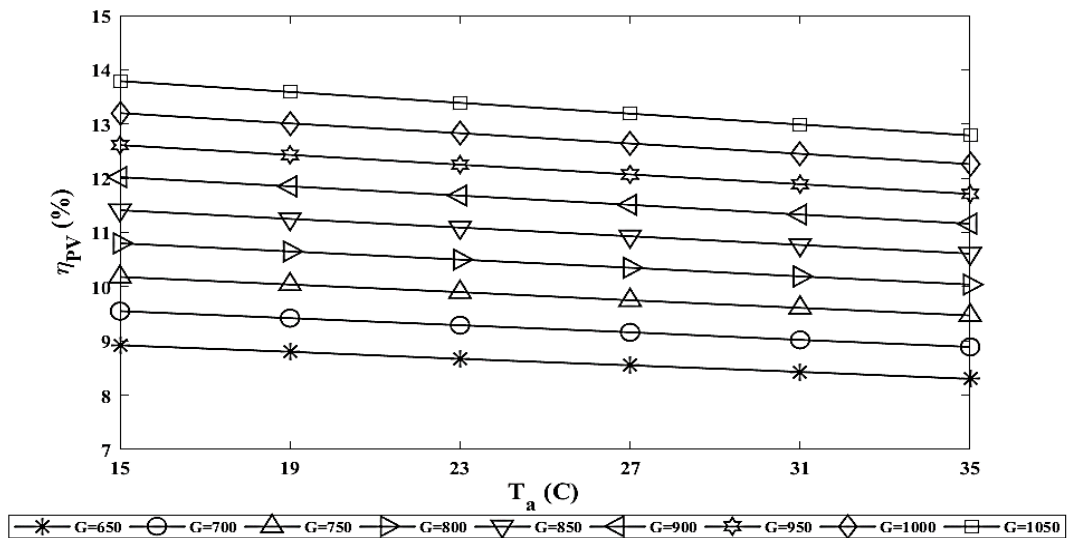
علاوه بر این با توجه به ابعاد زمین در دسترس بر اساس شکل (۳-۱۶) و نحوه آرایش ماژول‌های PV در این بخش، تنها نوع نصب پنل خورشیدی به صورت طولی (Portrait) خواهد بود. برای تعیین میزان فضای اشغال شده جهت نصب این تعداد ماژول‌ها با آرایش مذکور نیز با توجه به ابعاد ماژول‌ها از جدول (۳-۶)، مساحت هر ماژول برابر با ۰/۶۶ متر مربع می‌باشد که با در نظر گرفتن فاصله ۱۰ میلی‌متری بین ماژول‌ها نسبت به هم در هنگام نصب [۲۳]، مساحت نهایی آرایه فتوولتائیک از رابطه (۳-۱۲) برابر با ۸/۰۸۲ متر مربع خواهد بود. همچنین از فضای باقی‌مانده زمین در دسترس می‌توان برای نصب سایر تجهیزات از جمله بانک باتری، شارژ کنترلر و اینورتر استفاده کرد.

۴-۵- آنالیز حساسیت توان و راندمان خروجی از آرایه فتوولتائیک

در این بخش به آنالیز حساسیت در رابطه با توان خروجی آرایه فتوولتائیک و راندمان آرایه PV در دماهای مختلف محیط با توجه به شدت تابش‌های متفاوت در روزهای دوره آبیاری محصول می‌پردازیم. برای این منظور از روابط (۳-۶) تا (۳-۱۰) موجود در فصل ۳ استفاده شده است. همچنین محدوده تغییرات دمای محیط با توجه به شکل (۳-۱)، ۱۵ تا ۳۵ درجه سانتیگراد و بازه تغییرات تابش برای منطقه مورد مطالعه با توجه به شکل (۳-۱۲) در طول دوره آبیاری ۶۵۰ تا ۱۰۵۰ وات بر مترمربع در نظر گرفته شده است. شکل‌های (۴-۶) و (۴-۷) به ترتیب تغییرات توان خروجی آرایه فتوولتائیک و راندمان پنل‌های PV در دماهای مختلف محیط با توجه به تغییرات شدت تابش خورشید را نشان می‌دهند.



شکل ۴-۶- تغییرات توان خروجی آرایه فتوولتائیک با دما محیط و در شدت تابش‌های متفاوت



شکل ۴-۷- تغییرات راندمان آرایه PV با دمای محیط و در شدت تابش‌های مختلف

همانطور که در شکل‌ها مشاهده می‌شود، هر دو پارامتر توان خروجی از آرایه PV و راندمان آرایه فتوولتائیک با افزایش دمای هوا برای تمام سطوح تابش خورشید کاهش می‌یابند. دلیل این امر کاهش توان ماژول‌های PV به واسطه افزایش دمای ماژول‌ها است. همانطور که پیشتر در شکل (۳-۱۱) نیز

گفته شد، افزایش دمای محیط منجر به افزایش دمای کاری ماژول خورشیدی خواهد شد. در واقع اگرچه با افزایش دمای ماژول، جریان خروجی از آن به میزان کمی افزایش می‌یابد اما ولتاژ خروجی از ماژول PV به میزان چشمگیرتری کاهش یافته و در نتیجه توان خروجی از ماژول نیز کاهش می‌یابد. این درحالی است که توان و به طبع آن راندمان خروجی از آرایه PV با میزان شدت تابش خورشید رابطه مستقیم دارند. بنابراین هرچه میزان شدت تابش خورشید بیشتر باشد، توان و راندمان خروجی از آرایه PV نیز افزایش خواهد یافت. به عنوان مثال در دمای محیط ۲۷ درجه سانتیگراد در هر دو شکل بالا مشاهده می‌شود که هر چقدر میزان شدت تابش به سمت تابش در شرایط استاندارد (۱۰۰۰ وات بر متر مربع) و حتی بالاتر افزایش می‌یابد، توان و راندمان خروجی از آرایه PV نیز افزایش می‌یابد و بالعکس. این نتایج با سایر تحقیقات مرتبط با موضوع تاثیرات دما و تابش بر پنل‌های خورشیدی نیز مطابقت دارد [۷۴ و ۷۵].

۴-۶- نوع و تعداد بهینه باتری(ها)

با توجه به اینکه توان مصرفی پمپ مورد مطالعه ۷۰۰ وات بوده که به طور میانگین میزان ساعات کارکرد آن ۵/۶ ساعت در طول روز بر حسب میانگین تعداد ساعات آفتابی از شکل (۴-۲) در نظر گرفته شده است؛ بنابراین میانگین انرژی مصرفی پمپ در طول روز ۳۹۲۰ وات ساعت خواهد بود. این رو میزان تقاضای ذخیره‌سازی با فرض ۳ روز هوای ابری (بارانی) متوالی در ماه با توجه به شکل (۴-۲)، از رابطه (۳-۱۲) برابر با ۱۷۶۴۰ وات ساعت خواهد بود. با توجه به اینکه در حالت موازی ولتاژها ثابت و در حالت سری ولتاژها با یکدیگر جمع می‌شوند، ظرفیت بانک باتری می‌تواند ۱۲، ۲۴، ۳۶ و یا ۴۸ ولت باشد اما در این مطالعه ولتاژ بانک باتری را ۴۸ ولت (شامل ۴ باتری ۱۲ ولت بصورت سری) در نظر می‌گیریم که اینکار باعث کوچکتر شدن ظرفیت شارژکنترلر و در نتیجه کاهش هزینه‌ها خواهد شد. حال برای تعیین تعداد رشته باتری بصورت موازی، میزان تقاضای ذخیره‌سازی را بر

حاصل ضرب ولتاژ بانک باتری در ظرفیت نامی هر باتری، تقسیم می‌کنیم. در نتیجه تعداد رشته باتری موازی از رابطه زیر برابر است با [۷۰ و ۹۲]:

$$N_{\text{Batt,parallel}} = \frac{SD}{V_{\text{Batt,bank}} \times \text{rated capacity}} = \frac{17640}{48 \times 205} = 1.79 \quad (1-4)$$

بنابراین تعداد رشته باتری موازی برابر با ۲ رشته خواهد بود و چون ولتاژ هر رشته نیز ۴۸ ولت می‌باشد. از این رو در مجموع به ۸ باتری (شامل ۲ رشته موازی و هر رشته متشکل از ۴ باتری ۱۲ ولت بصورت سری) با ظرفیت نهایی ۱۶۴۰ آمپرساعت برای کاربرد موردنظر نیاز خواهد بود. مساحت بانک باتری نیز برابر است با:

$$A_{\text{Batt,bank}} = N_{\text{Batt}} \times (L \times W) = 8 \times (0.38 \times 0.176) = 0.535 \text{ m}^2 \quad (2-4)$$

برخی مشخصات باتری انتخابی در جدول زیر آمده است. همچنین تصویری از باتری مورد مطالعه در شکل (۸-۴) قابل ملاحظه است.

جدول ۳-۴- مشخصات باتری خورشیدی انتخابی [۱۱۱]

SAGM 12 205	مدل باتری
Trojan	شرکت سازنده
۱۲	ولتاژ (V)
۲۰۵	ظرفیت (Ah)
پلی پروپیلن	جنس
Deep-Cycle VRLA AGM (Maintenance-Free)	تکنولوژی
۵۹	وزن (Kg)
۳۸۰×۱۷۶×۳۵۷	ابعاد (mm)

همچنین شکل (۸-۴) تصویری از باتری انتخابی برای این مطالعه را نشان می‌دهد.



شکل ۴-۸- باتری انتخابی در مطالعه حاضر [۱۱۱]

۴-۷- نوع و ظرفیت بهینه شارژکنترلر

با توجه به رابطه (۳-۱۵) ظرفیت موردنیاز برای شارژ کنترلر ۱۴/۳ آمپر خواهد بود. بنابراین یک شارژکنترلر ۱۵ آمپر نیز برای کاربرد مدنظر مناسب می‌باشد. اما این تمام ماجرا نیست و باید دقت شود که شارژکنترلر انتخابی قابلیت پذیرش ولتاژ ورودی از طرف آرایه فتوولتائیک (مجموع ماژول‌های PV) را نیز داشته باشد. از این‌رو با توجه به اینکه آرایش ماژول‌ها بصورت ۲ رشته موازی شامل ۶ ماژول سری در هر رشته است و نیز ولتاژ مدار باز هر ماژول از جدول (۳-۶)، برابر با ۲۳ ولت می‌باشد بنابراین ولتاژ خروجی از آرایه فتوولتائیک در شرایط استاندارد برابر است با:

$$V_{PV,Array} = N_S \times V_{OC,PV} = 6 \times 23 = 138 \text{ V} \quad (۳-۴)$$

در نتیجه شارژکنترلر انتخابی باید تحمل ولتاژ ورودی از طرف آرایه PV تا ۱۳۸ ولت را داشته باشد. همچنین در انتخاب شارژ کنترلر باید به حداکثر پذیرش ظرفیت آرایه PV بر اساس ولتاژ بانک باتری و نیز راندمان آنها توجه داشت. با توجه به اینکه ولتاژ بانک باتری برای کاهش ظرفیت شارژ کنترلر، ۴۸ ولت انتخاب شده است بنابراین شارژ کنترلر انتخابی نیز باید از ولتاژ بانک باتری تا ۴۸ ولت پشتیبانی کرده و توانایی مدیریت ۱/۲ کیلووات آرایه PV را در این ولتاژ داشته باشد. برخی جزئیات شارژ کنترلر مورد مطالعه در جدول زیر آمده است.

جدول ۴-۴- مشخصات شارژکنترلر انتخابی [۱۱۲]

نوع شارژ کنترلر	MPPT
شرکت سازنده و مدل دستگاه	VICTRON Energy, Blue solar 150/35
حداکثر توان قابل قبول از آرایه PV (W)	(۴۸) / ۲۰۰۰ (۳۶) / ۱۵۰۰ (۲۴) / ۱۰۰۰ (۱۲) / ۵۰۰
حداکثر ولتاژ مدار باز قابل قبول از آرایه PV (V)	۱۵۰
حداکثر جریان اتصال کوتاه قابل قبول از آرایه PV (A)	۴۰
نرخ شارژ باتری (A)	۳۵
ولتاژ باتری قابل قبول (V)	۱۲/۲۴/۳۶/۴۸ (قابلیت تشخیص و تطبیق خودکار)
حداکثر راندمان (%)	۹۸
ابعاد (mm)	۱۳۰×۱۸۶×۷۰

اگرچه شارژ کنترلر مذکور در ولتاژ ۳۶ ولت برای بانک باتری توانایی مدیریت ۱۵۰۰ وات آرایه فتوولتائیک را دارا می‌باشد اما در صورت تغییر ولتاژ بانک باتری از ۴۸ ولت به ۳۶ ولت، تعداد باتری‌ها از ۸ به ۹ عدد افزایش پیدا خواهد کرد که با توجه به قیمت بالای هر عدد باتری از آن صرف نظر شده است. همچنین با توجه به اینکه ماژول‌های PV دارای مشخصات ولتاژ-جریان غیر خطی بوده که تحت تأثیر بار، شدت تابش خورشیدی و دمای ماژول قرار دارد بنابراین برای افزایش بهره‌وری و کسب حداکثر توان از ماژول PV، مجهز بودن برخی تجهیزات مانند اینورتر و شارژکنترلر به الگوریتم MPPT ضروری به نظر می‌رسد. ازینرو شارژکنترلر انتخابی نیز دارای الگوریتم دنبال کننده حداکثر نقطه توان (MPPT) داخلی است تا به این ترتیب بر اساس ادعای شرکت سازنده تا ۳۰ درصد دارای راندمان بیشتری نسبت به نمونه‌های معمولی PWM^۱ باشد [۱۱۱]. این شارژکنترلر دارای راندمان کل ۹۸ درصد بوده و توانایی تحمل جریان ورودی از سوی آرایه فتوولتائیک تا ۴۰ آمپر و نرخ جریان شارژ باتری تا ۳۵ آمپر را دارا می‌باشد. تصویری از شارژ کنترلر مورد مطالعه در شکل زیر آمده است.

^۱ Pulse Width Modulation



شکل ۴-۹- شارژ کنترلر انتخابی در مطالعه حاضر [۱۱۲]

همچنین برای اطمینان از انتخاب صحیح شارژ کنترلر مورد مطالعه، شبیه سازی عملکرد این تجهیز با استفاده از نرم افزار شرکت سازنده‌ی آن و نیز وارد کردن برخی اطلاعات ورودی به نرم افزار بر اساس شرایط مساله از جمله تعداد ماژول‌های PV مورد استفاده و نیز نحوه سری-موازی بودن آنها، ولتاژ بانک باتری و بازه تغییرات دمایی محیط منطقه از شکل (۳-۱) انجام شده است. این نرم افزار مبتنی بر محیط Excel بوده و نتایج آن مطابق جداول زیر می‌باشد.

جدول ۴-۵- نحوه عملکرد شارژ کنترلر انتخابی در دماهای مختلف محیط برای شارژ بانک باتری

دما (درجه سانتیگراد)	حداکثر نرخ شارژ باتری (آمپر)	حداکثر جریان خروجی از آرایه PV (آمپر)	ولتاژ بانک باتری	حداکثر جریان باتری (آمپر)	حداقل جریان باتری (آمپر)
۱۵	۳۵	۱۰/۶۴	۴۸	۲۵/۳۷	
۲۰	۳۵	۱۰/۶۷	۴۸	۲۴/۹۴	
۲۵	۳۵	۱۰/۷۰	۴۸	۲۴/۵۱	
۳۰	۳۵	۱۰/۷۳	۴۸	۲۴/۰۸	
۲۰	۳۵	۱۰/۶۷	۴۸		۲۴/۹۴
۲۵	۳۵	۱۰/۷۰	۴۸		۲۴/۵۱
۳۰	۳۵	۱۰/۷۳	۴۸		۲۴/۰۸
۳۵	۳۵	۱۰/۷۶	۴۸		۲۳/۶۴

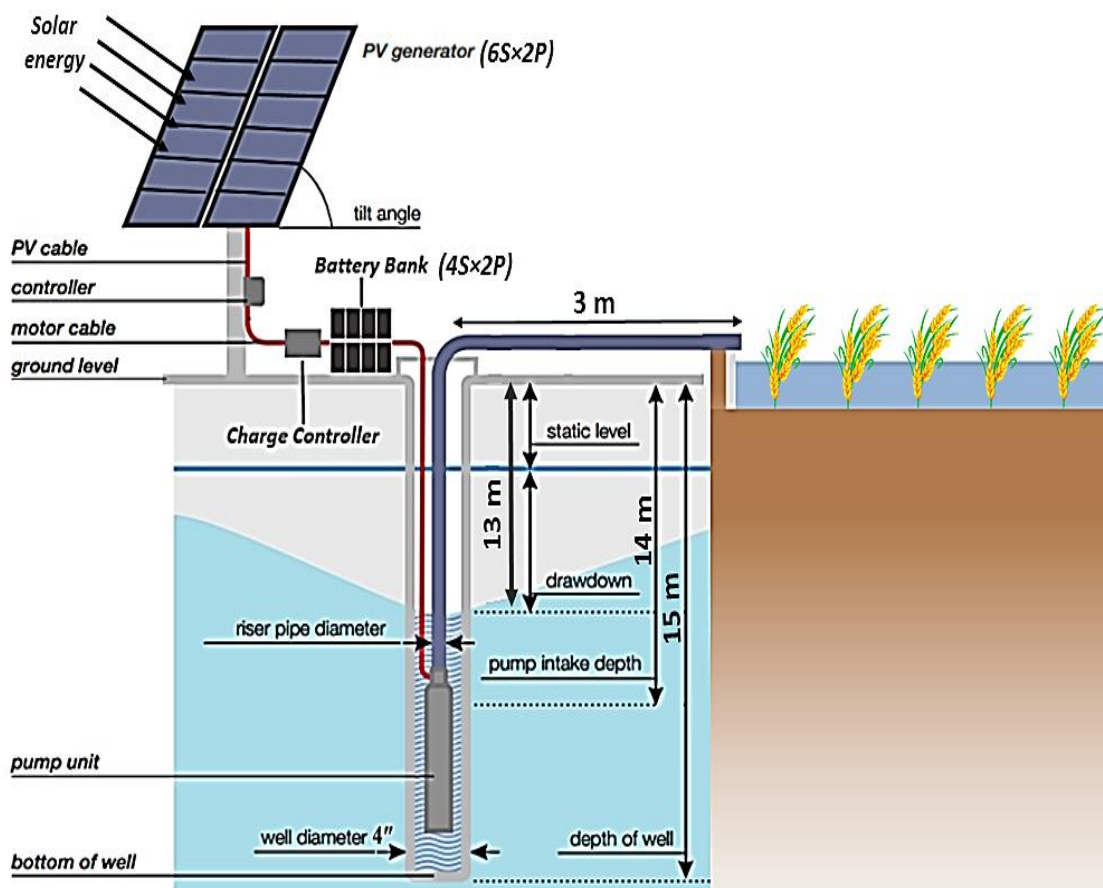
همانطور که از جدول بالا مشاهده می‌شود، حد آستانه حداکثر جریان شارژ باتری در ولتاژ ثابت بانک باتری (۴۸ ولت) در شارژکنترلر مورد مطالعه، ۳۵ آمپر است حال آنکه حداکثر جریان شارژ باتری در شرایط واقعی، ۲۵/۳۷ آمپر در دمای ۱۵ درجه سانتیگراد محاسبه شده است که کمتر از حد آستانه حداکثر جریان شارژ باتری توسط شارژکنترلر انتخابی است. علاوه بر این حداکثر جریان ورودی از طرف آرایه فتوولتائیک نیز ۱۰/۷۶ آمپر در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد می‌باشد که باز هم کمتر از حد آستانه حداکثر جریان قابل قبول از آرایه PV توسط شارژکنترلر (۴۰ آمپر) است. تغییرات ولتاژ آرایه فتوولتائیک نیز در دماهای متفاوت در جدول (۴-۶) قابل مشاهده است که با توجه به آن و همانطور که در جدول مشخصات شارژکنترلر انتخابی نیز آمده بود، حداکثر ولتاژ قابل قبول از طرف آرایه فتوولتائیک ۱۵۰ ولت است حال آنکه حداکثر ولتاژ تولیدی آرایه PV مورد مطالعه در دمای محیط ۱۵ درجه سانتیگراد، معادل ۱۴۲/۶ ولت می‌باشد. کمترین ولتاژ جهت روشن شدن دستگاه نیز ۴۹ ولت در حداکثر توان بوده درحالی‌که حداقل ولتاژ در توان بیشینه از آرایه PV برابر با ۱۰۷/۶ ولت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد می‌باشد. همچنین حداقل ولتاژ شروع به کار شارژکنترلر انتخابی ۵۳ ولت است اما کمترین ولتاژ تولیدی آرایه PV، ۱۳۳/۴ ولت در دمای ۳۵ درجه سانتیگراد می‌باشد بنابراین ازین جهت نیز مشکلی وجود نخواهد داشت.

جدول ۴-۶- نحوه مدیریت ولتاژ خروجی آرایه PV برای شارژ بانک باتری توسط شارژکنترلر انتخابی در دماهای مختلف محیط

دما (درجه سانتیگراد)	حداکثر ولتاژ قابل قبول از آرایه PV (ولت)	حداقل ولتاژ مدارباز آرایه PV برای شروع بکار شارژکنترلر (ولت)	حداقل ولتاژ آرایه PV برای روشن شدن شارژکنترلر (ولت)
۱۵	۱۵۰	۵۳	۴۹
۲۰	۱۵۰	۵۳	۴۹
۲۵	۱۵۰	۵۳	۴۹
۳۰	۱۵۰	۵۳	۴۹
۲۰	۱۵۰	۵۳	۴۹
۲۵	۱۵۰	۵۳	۴۹
۳۰	۱۵۰	۵۳	۴۹
۳۵	۱۵۰	۵۳	۴۹

دما (درجه سانتیگراد)	حداکثر ولتاژ مدارباز خروجی از آرایه PV (ولت)	حداکثر/حداقل ولتاژ ماکزیمم توان خروجی از آرایه PV (ولت)
۱۵	۱۴۲/۶	۱۱۶/۸
۲۰	۱۴۰/۳	۱۱۴/۵
۲۵	۱۳۸	۱۱۲/۲
۳۰	۱۳۵/۷	۱۰۹/۹
۲۰	۱۴۰/۳	۱۱۴/۵
۲۵	۱۳۸	۱۱۲/۲
۳۰	۱۳۵/۷	۱۰۹/۹
۳۵	۱۳۳/۴	۱۰۷/۶

در نتیجه با توجه به موارد گفته شده، شارژکنترلر انتخابی به خوبی قادر به مدیریت آرایه فتوولتائیک و مجموعه بانک باتری بوده و با آنها در تطابق و هماهنگی خوبی است. در نهایت تصویر کلی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد مطالعه در شکل (۴-۱۰) قابل مشاهده است.



شکل ۴-۱۰- نمای کلی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد مطالعه

۸-۴- نتایج و تحلیل اقتصادی مطالعه حاضر

تحلیل اقتصادی به عنوان تکنیک‌های مقایسه، تصمیم‌گیری و انتخاب از میان راه‌حل‌ها، بر اساس شرایط مطلوب پولی و اقتصادی تعریف می‌شود. به‌طور کلی استفاده از این تحلیل دارای اهمیت اساسی است، زیرا میزان سود یا ضرر حاصل از کیفیت روش انتخاب شده، به استفاده‌ی مناسب از این تکنیک بستگی دارد. پس از مدل‌سازی اقتصادی سیستم PVWPS مورد مطالعه و سیستم پمپاژ مرسوم در فصل قبل، جداول (۷-۴) و (۸-۴) جزئیات مربوط به هزینه‌های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب PV مستقل از شبکه برای شرایط ایران و منتخب جهان را نشان می‌دهند.

جدول ۴-۷- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مستقل از شبکه برای شرایط ایران

هزینه های PVWPS مستقل از شبکه (ایران)			
اجزاء	هزینه اولیه (ریال)	ارزش حال (ریال)	ارزش حال (دلار)
ماژول ها	۲۱۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۶۰۰
موتور پمپ	۵۶۳۵۰۰۰	۵۶۳۵۰۰۰	۱۶۱۰
بانک باتری	۱۲۰۹۶۰۰۰	۱۲۰۹۶۰۰۰	۳۴۵۶
شارژ کنترلر	۱۰۳۲۵۰۰۰	۱۰۳۲۵۰۰۰	۲۹۵
استراکچر آرایه	۶۰۰۰۰۰	۶۰۰۰۰۰	۱۷۰
نصب	۲۱۴۹۰۰۰	۲۱۴۹۰۰۰	۶۱۴
تعویض موتور پمپ بعد از ۱۰ سال	۵۶۳۵۰۰۰	۳۴۸۶۰۰۰	۹۹۶
تعویض موتور پمپ بعد از ۲۰ سال	۵۶۳۵۰۰۰	۲۱۵۶۰۰۰	۶۱۶
تعویض موتور بعد از ۵ سال	۲۱۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰	۶۰۰
تعویض موتور بعد از ۱۵ سال	۲۱۰۰۰۰۰	۱۲۹۸۵۰۰	۳۷۱
تعویض بانک باتری بعد از ۹ سال	۱۲۰۹۶۰۰۰	۷۸۵۰۰۰۰	۲۲۴۳
تعویض بانک باتری بعد از ۱۸ سال	۱۲۰۹۶۰۰۰	۵۰۹۱۲۰۰	۱۴۵۵
تعویض شارژ کنترلر بعد از ۱۵ سال	۱۰۳۲۵۰۰۰	۵۰۴۰۰۰	۱۴۴
تعمیر و نگهداری سالیانه	۳۵۰۰۰۰	۴۹۷۰۰۰۰	۱۴۲۰
هزینه های چرخه عمر		۵۱۰۶۸۲۰۰	۱۴۵۹۰
متوسط نرخ تورم (۲۰۱۷)	٪۹/۶		
متوسط نرخ تنزیل (۲۰۱۷)	٪۱۵		

به طور کلی هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب خورشیدی به دلیل هزینه های تعمیر و نگهداری بسیار پایین آنها بعضاً تا ۵۰٪ کمتر از سیستم پمپاژ آب دیزل است [۱۱۳]. در این مطالعه نیز مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری PVWPS مورد مطالعه (۱۴۲۰ دلار) حدود ۸/۷ برابر کمتر از مجموع هزینه های تعمیر و نگهداری سیستم پمپاژ متداول مورد مطالعه (۱۲۳۵۴ دلار) از جدول (۹-۳) در طول ۲۵ سال عمر پروژه است. همچنین جدول (۸-۴) هزینه های PVWPS مستقل از شبکه را برای کشورهای منتخب جهان نشان می دهد.

جدول ۴-۸- هزینه های چرخه عمر سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مستقل از شبکه برای کشورهای منتخب جهان

هزینه های PVWPS مستقل از شبکه (منتخب جهان)		
اجزاء	هزینه اولیه (دلار آمریکا)	ارزش حال (دلار آمریکا)
ماژول ها	۶۰۰	۶۰۰
موتور پمپ	۱۶۱۰	۱۶۱۰
بانک باتری	۳۴۵۶	۳۴۵۶
شارژ کنترلر	۲۹۵	۲۹۵
استراکچر آرایه	۱۳۲	۱۳۲
نصب	۶۱۷	۶۱۷
تعویض موتور پمپ بعد از ۱۰ سال	۱۶۱۰	۱۴۱۶
تعویض موتور پمپ بعد از ۲۰ سال	۱۶۱۰	۱۲۴۵
تعویض موتور بعد از ۵ سال	۶۰۰	۶۰۰
تعویض موتور بعد از ۱۵ سال	۶۰۰	۵۲۸
تعویض بانک باتری بعد از ۹ سال	۳۴۵۶	۳۰۷۸
تعویض بانک باتری بعد از ۱۸ سال	۳۴۵۶	۲۷۴۱
تعویض شارژ کنترلر بعد از ۱۵ سال	۲۹۵	۲۴۴
تعمیر و نگهداری سالیانه	۱۰۰	۲۱۲۴
هزینه های چرخه عمر		۱۸۶۸۶
متوسط نرخ تورم (۲۰۱۷)	٪۴/۰۸	
متوسط نرخ تنزیل (۲۰۱۷)	٪۵/۴۳	

با توجه به جداول بالا، هزینه های کل چرخه عمر PVWPS مستقل از شبکه در ایران در مدت زمان طول عمر ۲۵ ساله پروژه حدود ۱۴۵۹۰ دلار و برای کشورهای منتخب جهان در این مطالعه حدود ۱۸۶۸۶ دلار خواهد بود که این اختلاف به دلیل تفاوت در نرخ تورم و نرخ تنزیل ایران با کشورهای منتخب دنیا و نیز هزینه های دستمزد پایین در ایران به نسبت سایر کشورهاست. همچنین هزینه های کل چرخه عمر سیستم PVWPS مورد مطالعه (۱۴۵۹۰ دلار) حدود ٪۲۶/۸۴ کمتر از هزینه های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ مرسوم مورد مطالعه (۱۸۵۰۶ دلار) از جدول (۹-۳) می باشد.

۴-۹- فروش برق به شبکه

با توجه به اینکه تعداد ماژول مورد نیاز در این مطالعه بعد از فرآیند بهینه‌سازی ۱۲ عدد محاسبه شد، بنابراین این تعداد در محدوده ۴ تا ۱۸ عدد ماژول قابل قبول از طرف اینورتر انتخابی نیز می‌باشد که نشان از انتخاب صحیح اینورتر مورد مطالعه دارد. حال برای محاسبه میزان انرژی تزریق شده به شبکه دو سناریو را دنبال خواهیم کرد. اول اگر زاویه شیب پنل بدون تغییر در طول سال همانند ماه‌های دوره آبیاری یعنی ۱۵ درجه باشد و دوم تنظیم شیب پنل در زاویه ۵۳ درجه برای شش ماهه دوم سال (بخش‌های باقیمانده از ماه‌های آوریل و سپتامبر با همان شیب بهینه ۱۵ درجه). نتایج شبیه‌سازی این بخش در نرم افزار PVSYST برای محاسبه میزان دقیق برق تزریق شده به شبکه توسط نیروگاه ۱/۲ کیلوواتی و اینورتر انتخابی مورد مطالعه در ماه‌های غیرآبیاری به مدت ۲۲۰ روز برای مختصات جغرافیایی منطقه موردنظر با زاویه آزیموت صفر و زاویه شیب پنل در دو سناریوی مذکور انجام شده است که جزئیات آن در جداول (۴-۹) و (۴-۱۰) آمده است.

جدول ۴-۹- اطلاعات مربوط به تزریق برق به شبکه برای نیروگاه مورد مطالعه با زاویه شیب ۱۵ به کمک نرم افزار PVSyst

پارامترها	InvLoss	OhmLoss	MisLoss	ModQual	PR	E_Grid	GlobInc	واحد
ماه	kWh	kWh	kWh	kWh	%	kWh	kWh/m ²	
ژانویه	-۴/۲۹۴	-۰/۷۱	-۴/۰۷۳	۱/۳۲۱	۷۸/۲۲	۷۹/۹	۱۰۴/۳	
فوریه	-۴/۰۵۶	-۰/۷۴۴	-۴/۱۳۷	۱/۳۴۲	۷۸/۰۲	۹۹/۸	۱۰۶/۶	
مارس	-۵/۱۸	-۱/۰۶۱	-۵/۱۰۷	۱/۶۵۷	۷۶/۳۷	۱۲۲/۸	۱۳۴	
آوریل (۰۱-۱۴)	-۲/۶۴۹	-۰/۶۵۲	-۲/۸۵۴	۰/۹۲۵	۷۵/۶	۶۸/۸	۷۵/۹	
سپتامبر (۰۷-۳۰)	-۴/۱۷	-۰/۹۲۴	-۴/۱۲۹	۱/۳۳۹	۷۲/۷۸	۹۹/۳	۱۱۳/۷	
اکتبر	-۴/۸۵۲	-۰/۹۸۶	-۴/۸۱۵	۱/۵۶۲	۷۴/۴۱	۱۱۵/۹	۱۲۹/۸	
نوامبر	-۴/۰۰۸	-۰/۶۹۹	-۳/۹۶۶	۱/۲۸۷	۷۶/۳	۹۵/۵	۱۰۴/۳	
دسامبر	-۳/۹۰۹	-۰/۵۸	-۳/۵۶۹	۱/۱۵۸	۷۷/۳۷	۸۵/۷	۹۲/۳	
میانگین/کل	-۳۳/۱۱	-۶/۳۵	-۳۲/۶۵	۱۰/۵۹	۷۶/۰۶	۷۸۵/۷	۸۶۰/۹	

جدول ۱۰-۴- اطلاعات مربوط به تزریق برق به شبکه برای نیروگاه مورد مطالعه با زاویه شیب ۵۳ به کمک نرم افزار PVsyst

پارامترها	GlobInc	E_Grid	PR	ModQual	MisLoss	OhmLoss	InvLoss
واحد	kWh/m ²	kWh	%	kWh	kWh	kWh	kWh
ماه							
ژانویه	۱۳۸/۴	۱۳۰/۲	۷۸/۴	۱/۷۵۲	-۵/۳۴۲	-۱/۳۲۴	-۵/۰۳۳
فوریه	۱۲۵	۱۱۶/۶	۷۷/۷۳	۱/۵۶۷	-۴/۷۷۶	-۱/۰۶۶	-۴/۵۰۵
مارس	۱۳۶/۴	۱۲۳/۷	۷۵/۵۷	۱/۶۶۹	-۵/۰۸۷	-۱/۱۳۸	-۵/۲۶۸
آوریل (۰۱-۱۴)	۶۸/۲	۶۰/۹۴	۷۴/۴۴	۰/۸۲	-۲/۵۰۱	-۰/۵۴	-۲/۴۸۲
سپتامبر (۰۷-۳۰)	۱۱۰	۹۴/۶۴	۷۱/۷	۱/۲۸	-۳/۹۰۲	-۰/۸۸۸	-۴/۲۰۶
اکتبر	۱۴۸/۵	۱۳۱/۹	۷۴/۰۲	۱/۷۷۶	-۵/۴۱۵	-۱/۳۲	-۵/۲۹
نوامبر	۱۳۳/۱	۱۲۱/۹	۷۶/۳۲	۱/۶۳۹	-۴/۹۹۶	-۱/۲۲۴	-۴/۶۶۱
دسامبر	۱۲۴/۱	۱۱۵/۵	۷۷/۵۶	۱/۵۵۶	-۴/۷۴۳	-۱/۱۵۴	-۴/۶۱۷
میانگین/کل	۹۸۳/۷	۸۹۵/۴	۷۵/۸۵	۱۲/۰۶	-۳۶/۷۶	-۸/۶۵۴	-۳۶/۰۶

در این جداول پارامترهایی نظیر میزان تابش کل روی سطح شیبدار پنل^۱ (GlobInc)، میزان برق تزریق شده به شبکه^۲ (E_Grid)، ضریب عملکرد نیروگاه^۳ (PR) که برابر است با نسبت میزان انرژی تزریق شده به شبکه پس از کسر تلفات به حاصلضرب تابش کل روی سطح پنل (GlobInc) در ظرفیت نامی نیروگاه [۱۱۴] و برخی تلفات نظیر خطای شرکت سازنده در اعلام توان نامی ماژولها^۴ (ModQual) که طبق جدول (۳-۶) مقدار این تلورانس برای ماژول انتخابی همواره مثبت خواهد بود و همچنین تلفات ناهمگونی در ماژولها^۵ (MisLoss)، تلفات مربوط به کابل کشی نیروگاه^۶ (OhmLoss) و تلفات مربوط به راندمان اینورتر^۷ (InvLoss) در دو زاویه شیب متفاوت پنلها قابل رویت است. در نهایت میزان انرژی تزریق شده به شبکه پس از کسر تلفات دما، گرد و خاک، استهلاک^۸ و تلفات ذکر شده در جداول بالا توسط نرم افزار PVsyst برای شیبهای ۱۵ و ۵۳ درجه به

¹ Global incident on tilted PV panel

² Energy injected into grid

³ Performance ratio

⁴ Module Quality

⁵ Mismatch losses

⁶ Ohmic (Cabling) losses

⁷ Inverter losses

⁸ Ageing losses

ترتیب برابر با ۷/۷۸۵ و ۴/۸۹۵ کیلووات ساعت می‌باشد که این اختلاف معنادار (حدوداً ۱۱۰ کیلووات ساعت یا ۱۴ درصد در هر سال) باعث افزایش سودآوری به میزان قابل توجهی خصوصاً در طولانی مدت خواهد شد. هرچند که این قضیه باعث افزایش قیمت استراکچر از ۱۷۰ به ۳۴۰ دلار توسط سازندگان محلی نیز می‌شود.

سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهره‌وری انرژی برق ایران (ساتبا) برق حاصل از تولید نیروگاه‌ها و مولدهای خورشیدی را با توجه به ظرفیت نیروگاه طی قرارداد خرید تضمینی برق برای یک دوره ۲۰ ساله با نرخ‌های پایه خریداری می‌کند که این نرخ از سال ۲۰۱۶ برای نیروگاه‌های زیر ۲۰ کیلووات (از جمله نیروگاه ۱/۲ کیلوواتی مورد مطالعه) برابر با ۸۰۰۰ ریال (حدود ۰/۲۳ دلار) به ازای یک کیلووات ساعت برق تولیدی است [۲۳]. اما برای تضمین بیشتر توجیه‌پذیری اقتصادی و به منظور جبران کاهش ارزش پولی و یا کاهش ریسک سرمایه‌گذاری در شرایط مختلف اقتصادی با توجه به نوسانات احتمالی ارز و همچنین در نظر گرفتن تورم، نرخ‌های خرید تضمینی برق برای قراردادهای منعقد شده همه ساله و تا پایان دوره قرارداد بر اساس شاخص تغییرات نرخ ارز و قیمت خرده‌فروشی کالاها^۱ تعدیل می‌شود. همچنین نرخ قرارداد برای کلیه نیروگاه‌ها از ابتدای ۱۰ ساله دوم تا پایان قرارداد بعد از تعدیل در عدد ۰/۷ ضرب می‌شود. نرخ تعدیل سالیانه از رابطه زیر بدست می‌آید [۲۳]:

$$\alpha \times \left[\frac{\text{شاخص قیمت خرده‌فروشی در ابتدای سال پرداخت}}{\text{شاخص قیمت خرده‌فروشی در ابتدای سال ابتدای بهره‌برداری}} \right] - \text{ضریب تعدیل}$$

$$\left[\frac{\text{متوسط نرخ رسمی یورو در دوره یکساله قبل از زمان پرداخت}}{\text{متوسط نرخ رسمی یورو در دوره یکساله قبل از شروع بهره‌برداری}} \right]^{1-\alpha} \quad (4-4)$$

α همواره عددی بین ۰/۱۵ تا ۰/۳ می‌باشد که توسط ساتبا ۰/۳ اعلام شده است. اما با فرض اینکه نیروگاه مورد مطالعه در سال ۲۰۱۷ احداث شده و با توجه به این حقیقت که نرخ CPI و همچنین نرخ ارز در سال‌های پیش رو تا سال ۲۰۲۰ قابل پیش‌بینی نیست لذا با توجه به اینکه نرخ پایه خرید تضمینی برق از سال ۲۰۱۶ تاکنون بدون تغییر مانده از این‌رو جهت محاسبه نرخ تعدیل ابتدا آن را برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ که تغییرات نرخ ارز و CPI آنها موجود است محاسبه می‌کنیم و سپس

¹ Consumer Price Index

میانگین آنها را برای سال‌های ۲۰۱۸ تا ۲۰۳۶ (قرارداد ۲۰ ساله خرید تضمینی برق) اعمال خواهیم

کرد. بنابراین با توجه به اطلاعات جدول (۴-۱۱) نرخ تعدیل سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ برابر است با:

جدول ۴-۱۱- متوسط نرخ رسمی یورو و قیمت خرده فروشی مواد در سال‌های ۲۰۱۵ تا ۲۰۱۸ [۹۴]

سال	۲۰۱۵	۲۰۱۶	۲۰۱۷	۲۰۱۸
شاخص قیمت خرده فروشی	-	۹۵	۱۰۷/۷	۱۱۵/۶
متوسط نرخ رسمی ارز (یورو) به ریال	۳۲۶۱۹	۳۴۴۸۴	۳۹۹۴۹	-

در نتیجه ضریب تعدیل برای سال‌های ۲۰۱۷ و ۲۰۱۸ برابر است با:

$$\text{ضریب تعدیل در سال ۲۰۱۷} = \left[\frac{107.7}{95}\right]^{0.3} \times \left[\frac{34484}{32619}\right]^{0.7} = 1.0777 - 1 = 0.0777 \times 100 = 7.77\%$$

$$\text{ضریب تعدیل در سال ۲۰۱۸} = \left[\frac{115.6}{107.7}\right]^{0.3} \times \left[\frac{39949}{34484}\right]^{0.7} = 1.1341 - 1 = 0.1341 \times 100 = 13.41\%$$

بنابراین میانگین نرخ تعدیل را حدوداً ۱۱ درصد در نرخ پایه خرید تضمینی برق (۸۰۰۰ ریال) از

سال دوم (۲۰۱۸) تا سال بیستم (۲۰۳۶) اعمال خواهیم کرد که در نهایت میزان سود فروش ۸۹۵/۴

کیلووات ساعت برق تولیدی از آرایه ۱/۲ کیلوواتی مورد مطالعه به مدت ۲۰ سال بر اساس نرخ

۴۲۰۰۰ ریال به ازای هر دلار از سال ۲۰۱۸ [۹۴] برابر است با:

جدول ۴-۱۲- قیمت خرید هر کیلووات ساعت برق فتوولتائیک و سود حاصل از فروش آن در مدت زمان قرارداد ۲۰ ساله

سال	قیمت خرید هر کیلووات ساعت برق خورشیدی در هر سال (ریال)	سود حاصل از فروش برق تولیدی نیروگاه فتوولتائیک مورد مطالعه در هر سال (ریال)
۱	۸۰۰۰	۷۱۶۳۲۰۰
۲	۸۸۸۰	۷۹۵۱۱۵۲
۳	۹۸۵۷	۸۸۲۵۷۷۹
۴	۱۰۹۴۱	۹۷۹۶۶۱۴
۵	۱۲۱۴۵	۱۰۸۷۴۲۴۲
۶	۱۳۴۸۰	۱۲۰۷۰۴۰۹
۷	۱۴۹۶۳	۱۳۳۹۸۱۵۴
۸	۱۶۶۰۹	۱۴۸۷۱۹۵۰
۹	۱۸۴۳۶	۱۶۵۰۷۸۶۵
۱۰	۲۰۴۶۴	۱۸۳۲۳۷۳۰
۱۱	۲۲۹۰۱	۱۴۲۳۷۵۳۸
۱۲	۲۵۶۵۰	۱۵۸۰۳۶۶۷
۱۳	۲۹۵۹۱	۱۷۵۴۲۰۷۱
۱۴	۳۱۷۴۶	۱۹۴۷۱۶۹۹
۱۵	۳۴۱۳۸	۲۱۶۱۳۵۸۶
۱۶	۳۶۷۹۴	۲۳۹۹۱۰۸۰
۱۷	۳۹۷۴۱	۲۶۶۳۰۰۹۹
۱۸	۴۳۰۱۳	۲۹۵۵۹۴۱۰
۱۹	۴۶۶۴۴	۳۲۸۱۰۹۴۵
۲۰	۴۰۶۷۵	۳۶۴۲۰۱۴۹
مجموع		۳۵۷۸۸۲۰۰۰

همچنین با توجه به اضافه شدن اینورتر با میانگین طول عمر ۱۰ سال و نیز افزایش قیمت استراکچر آرایه فتوولتائیک بدلیل تغییر از حالت شیب ثابت برای کل سال به حالت تنظیم دستی شیب آرایه برای شش ماهه دوم سال جهت دریافت انرژی خروجی بیشتر، هزینه‌های چرخه عمر سیستم را یکبار دیگر اینبار برای شرایط مذکور محاسبه می‌کنیم که جزئیات آن مطابق جدول (۱۳-۴) می‌باشد.

جدول ۴-۱۳- هزینه های چرخه عمر PVWPS با هدف فروش برق به شبکه در ماه های غیر آبیاری در ایران

هزینه های PVWPS متصل به شبکه (ایران)			
اجزاء	هزینه اولیه (ریال)	ارزش حال (ریال)	ارزش حال (دلار آمریکا)
ماژول ها	۲۱۰۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰۰	۶۰۰
اینورتر	۲۱۰۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰۰	۶۰۰
موتورپمپ	۵۶۳۵۰۰۰۰	۵۶۳۵۰۰۰۰	۱۶۱۰
بانک باتری	۱۲۰۹۶۰۰۰۰	۱۲۰۹۶۰۰۰۰	۳۴۵۶
شارژ کنترلر	۱۰۳۲۵۰۰۰	۱۰۳۲۵۰۰۰	۲۹۵
استراکچر آرایه	۱۲۰۰۰۰۰۰	۱۲۰۰۰۰۰۰	۳۴۰
نصب	۲۴۱۵۰۰۰۰	۲۴۱۵۰۰۰۰	۶۹۰
تعویض اینورتر بعد از ۱۰ سال	۲۱۰۰۰۰۰۰	۱۲۹۸۵۰۰۰	۳۷۱
تعویض موتورپمپ بعد از ۱۰ سال	۵۶۳۵۰۰۰۰	۳۴۸۶۰۰۰۰	۹۹۶
تعویض موتورپمپ بعد از ۲۰ سال	۵۶۳۵۰۰۰۰	۲۱۵۶۰۰۰۰	۶۱۶
تعویض موتور بعد از ۵ سال	۲۱۰۰۰۰۰۰	۲۱۰۰۰۰۰۰	۶۰۰
تعویض موتور بعد از ۱۵ سال	۲۱۰۰۰۰۰۰	۱۲۹۸۵۰۰۰	۳۷۱
تعویض بانک باتری بعد از ۹ سال	۱۲۰۹۶۰۰۰۰	۷۸۵۰۰۰۰۰	۲۲۴۳
تعویض بانک باتری بعد از ۱۸ سال	۱۲۰۹۶۰۰۰۰	۵۰۹۱۲۰۰۰	۱۴۵۵
تعویض شارژ کنترلر بعد از ۱۵ سال	۱۰۳۲۵۰۰۰	۵۰۴۰۰۰۰	۱۴۴
تعمیر و نگهداری سالیانه	۴۲۰۰۰۰۰	۵۹۶۴۰۰۰۰	۱۷۰۴
هزینه های چرخه عمر		۵۶۳۱۸۵۰۰۰	۱۶۰۹۱
متوسط نرخ تورم (۲۰۱۷)	٪۹/۶		
متوسط نرخ تنزیل (۲۰۱۷)	٪۱۵		

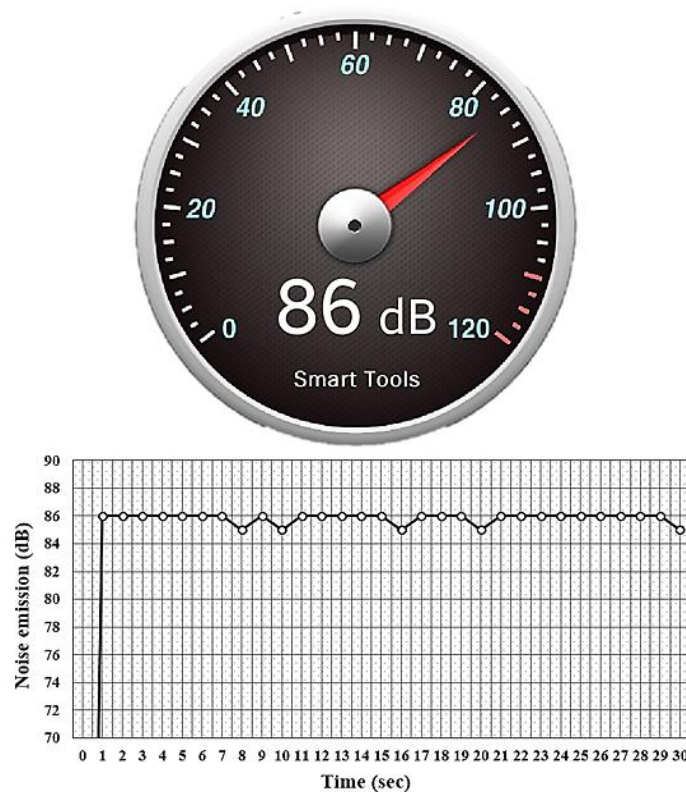
در این حالت مطابق جدول بالا هزینه‌های چرخه عمر سیستم در ایران به ۱۶۰۹۱ دلار افزایش پیدا خواهد کرد که بازهم از هزینه‌های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ دیزل (۱۸۵۰۶ دلار از جدول ۳-۳)

۹) کمتر بوده و علاوه بر آن باعث سودآوری به میزان ۳۵۷ میلیون و ۸۸۲ هزار ریال (۸۵۲۱ دلار) درآمد بواسطه فروش برق به شبکه در مدت زمان ۲۰ ساله قرارداد خرید تضمینی برق از سوی وزارت نیرو ایران مطابق جدول (۴-۱۲) خواهد شد. بنابراین استفاده از PVWPS مستقل و خصوصاً متصل به شبکه در طولانی مدت به لحاظ اقتصادی منطقی و مقرون به صرفه تر از سیستم پمپاژ متداول است.

۴-۱۰- نتایج اثرات زیست محیطی در مطالعه حاضر

شکل (۴-۱۱) نتایج آزمایش تست آلودگی صوتی سیستم پمپاژ متداول مورد مطالعه را نشان می-

دهد.

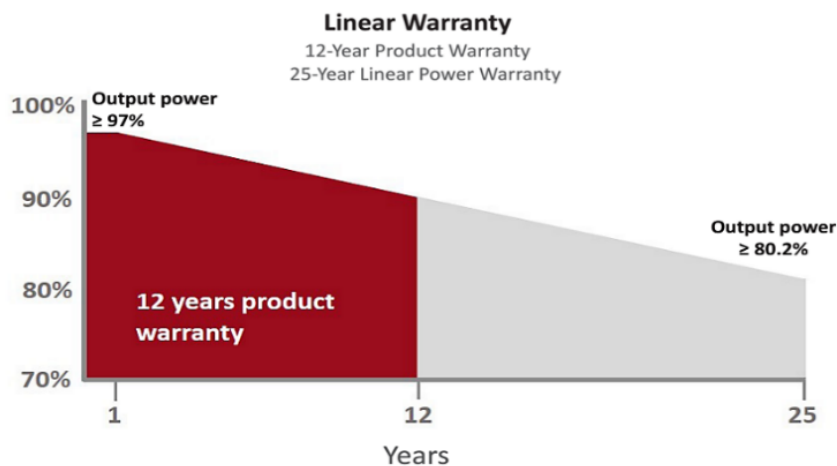


شکل ۴-۱۱- میزان آلودگی صوتی سیستم پمپاژ آب متداول نوع دیزل در زمین های کشاورزی کشت برنج ساری

همانطور که ملاحظه می شود میانگین نویز صدای تولید شده توسط موتور دیزل، ۸۶ دسیبل اندازه گیری شده است که طبق استاندارد ANSI S3.6-1989 و گزارش موسسه ملی تحقیقات بهداشت و

ایمنی شغلی (NIOSH^۱) به عنوان زیر مجموعه مرکز مدیریت و پیشگیری بیماری (CDC^۲) ایالت متحده آمریکا، نويز بالای ۸۵ دسیبل در مدت زمان بیش از ۸ ساعت در روز در محدوده آستانه ناراحتی و مضر^۳ برای شنوایی محسوب می‌شود [۱۱۵].

اما در زمینه کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید باید ابتدا میزان انرژی موثر خروجی از آرایه فتوولتائیک در دوره آبیاری محصول از رابطه (۳-۲۵) محاسبه شود که مقدار آن برابر با ۵۹۹/۸۴ کیلووات ساعت می‌باشد. از طرفی طول عمر ماژول‌های فتوولتائیک ۲۵ سال می‌باشد اما معمولا ماژول‌های PV مطابق شکل (۴-۱۲) بعد از ۱۲ سال با ۹۰٪ راندمان اولیه و بعد ۲۵ سال با ۸۰ درصد راندمان نسبت به سال ابتدای بهره‌برداری قادر به تولید انرژی خواهند بود.



شکل ۴-۱۲- نمودار خطی ضمانت مقدار توان خروجی پنل‌های خورشیدی با گذشت زمان [۱۱۶]

ازینرو میزان توان خروجی موثر از آرایه PV از رابطه (۳-۲۵)، از سال اول با فرض ۱ درصد و از سال دوم تا سال ۲۵م به طور میانگین با فرض ۰/۹ درصد تلفات استهلاک در نظر گرفته می‌شود. در نتیجه میانگین توان موثر تولیدی نیروگاه در طول عمر ۲۵ ساله ماژول‌های فتوولتائیک مطابق جدول (۴-۱۴) خواهد بود.

¹ National Institute for Occupational Safety and Health

² Centers for Disease Control and Prevention

³ Threshold of discomfort and hazardous noise

جدول ۴-۱۴- میزان خروجی موثر آرایه ۱/۲ کیلوواتی مورد مطالعه بعد از کسر تلفات پیری در دوره آبیاری

سال	انرژی موثر خروجی از آرایه PV در دوران آبیاری (Kwh)
۱	۵۹۴
۲	۵۸۸
۳	۵۸۳
۴	۵۷۸
۵	۵۷۳
۶	۵۶۸
۷	۵۶۲
۸	۵۵۷
۹	۵۵۲
۱۰	۵۴۷
۱۱	۵۴۳
۱۲	۵۳۸
۱۳	۵۳۳
۱۴	۵۲۸
۱۵	۵۲۳
۱۶	۵۱۹
۱۷	۵۱۴
۱۸	۵۰۹
۱۹	۵۰۵
۲۰	۵۰۰
۲۱	۴۹۶
۲۲	۴۹۱
۲۳	۴۸۷
۲۴	۴۸۲
۲۵	۴۷۸
میانگین	۵۳۳/۹

بنابراین با توجه به جدول (۴-۱۴) میانگین انرژی تولیدی توسط پنل‌ها در طول دوره آبیاری و در بازه طول عمر پنل‌ها برابر با ۵۳۳/۹ کیلووات ساعت می‌باشد. در نهایت میزان کاهش انتشار آلاینده کربن دی اکسید از رابطه (۳-۲۴) در مدت زمان طول عمر پروژه (۲۵ سال) با توجه به میزان چرخه عمر آلاینده‌گی شبکه سراسری برق و نیروگاه فتوولتائیک طبق رابطه برابر است با:

$$CB = (533.9 \times 0.6949 \times 25) - (533.9 \times 0.041 \times 25) = 8.728 \text{ ton}$$

از طرفی طبق مرجع [۱۱۷ و ۱۱۸] یک درخت بالغ و یک درخت جوان به ترتیب در سال ۲۱/۷۷۲۴ و ۱۱/۷۹۳۴ کیلوگرم کربن دی اکسید جذب می کنند و از آنجا که طبق رابطه فوق میزان کاهش انتشار دی اکسید کربن توسط سیستم فتوولتائیک مورد مطالعه در سال بطور میانگین ۳۴۹/۱ کیلوگرم می باشد بنابراین سیستم موردنظر هرساله به اندازه حدود ۱۶ درخت بالغ^۱ و یا حدود ۳۰ درخت جوان در میزان تولید CO₂ به جو جلوگیری می کند. همچنین در صورت اضافه شدن سیستم مذکور در روزهای غیرآبیاری سال به مجموعه بالا با توجه به میزان انرژی تولید شده در شیب های ۱۵ و ۵۳ درجه به ترتیب از جداول (۹-۴) و (۱۰-۴)، میزان کاهش انتشار گاز کربن دی اکسید در مدت زمان طول عمر پروژه مطابق جدول (۴-۱۵) خواهد بود.

جدول ۴-۱۵- مقایسه میزان کربن دی اکسید صرفه جویی شده در سناریوهای مختلف در مدت زمان طول عمر پروژه

دوره غیر آبیاری		فقط دوره آبیاری	زمان
۵۳	۱۵	۱۵	زاویه شیب نصب پنل
۸۹۵/۴	۷۸۵/۷	۵۳۳/۹	انرژی موثر خروجی از آرایه PV (کیلووات ساعت)
۱۴۲۹/۳	۱۳۱۹/۶	۵۳۳/۹	کل انرژی موثر خروجی از آرایه PV در سال (کیلووات ساعت)
۲۴/۸۳	۲۲/۹۲	۹/۲۷	چرخه عمر آلاینده گی شبکه در مدت ۲۵ سال (تن)
۱/۴۶	۱/۳۵	۰/۵۴	چرخه عمر آلاینده گی نیروگاه PV در مدت ۲۵ سال (تن)
۲۳/۳۷	۲۱/۵۷	۸/۷۳	میزان کاهش انتشار کربن دی اکسید
۴۳/۷۹	۴۰/۷۳	۱۶/۳۰	معادل تعداد درخت بالغ/جوان

اما در صورتیکه بخواهیم از سیستم پمپاژ متداول دیزل جهت آبیاری مزرعه شالیکاری استفاده کنیم آنگاه با توجه به میزان مصرف سوخت موتور دیزل مورد مطالعه و نیز با توجه به فاکتور آلاینده گی برای هر لیتر گازوئیل و روغن موتور که طبق گزارش سازمان حفاظت از محیط زیست ایالات متحده آمریکا (EPA^۲) به ترتیب معادل ۲/۶۹۷ و ۲/۸۲۴ کیلوگرم کربن دی اکسید می باشد [۱۱۹]، سالانه حدود ۴۸۸۵-۵۱۴۹ کیلوگرم و در مجموع ۲۵ سال طول عمر پروژه بالغ بر ۱۲۲-۱۲۸ تن کربن دی

^۱ Mature tree

^۲ United States Environmental Protection Agency

اکسید به جو آزاد خواهد شد که با جایگزینی این سیستم با نوع PVWPS می‌توان از این پدیده منفی زیست محیطی جلوگیری کرد. همچنین با مقایسه کل انرژی موثر خروجی از آرایه PV در سال (مجموع دوره آبیاری و غیره آبیاری) درمی‌یابیم که این پارامتر برای شیب ۵۳ درجه حدود ۸/۳۱٪ بیشتر از شیب ۱۵ درجه می‌باشد.

فصل پنجم:

نتیجه گیری و پیشنهادات

۵-۱- نتیجه گیری

در این مطالعه یک PVWPS مستقل از شبکه برای آبیاری محصول برنج در زمینی به مساحت یک هکتار به روش کرتی غرقابی در موقعیت مکانی با مختصات جغرافیایی و هواشناسی شهرستان ساری بصورت بهینه طراحی شده است. محاسبات و نتیجه گیری عمده به شرح زیر است:

- تعیین دبی بهینه به میزان ۸/۴۲ متر مکعب بر ساعت در طول دوره آبیاری برنج در زمینی به مساحت یک هکتار
- تعیین ابعاد بهینه پنل خورشیدی به مساحت ۸/۰۸۲ متر مربع معادل ۱/۲ کیلووات از نوع مونوکریستال و نصب به صورت طولی با آرایش ۶×۲ (۶ ماژول سری در ۲ رشته موازی) با زاویه آزمایشی صفر و زاویه شیب بهینه ۱۵ درجه نسبت به افق بصورت ثابت در طول دوره آبیاری
- تعیین مجموعه موتور پمپ شامل یک موتور جریان مستقیم (DC) بدون جاروبک^۱ با حداکثر توان ۷۰۰ وات بصورت یکپارچه با یک پمپ شناور گریز از مرکز با بازده میانگین کل ۴۸ درصد برای آبکشی از چاهی با هد دینامیکی کل ۱۴ متر (با احتساب تلفات اصطکاکی لوله ها)
- تعیین یک بانک باتری ۴۸ ولت متشکل از ۸ عدد باتری ۱۲ ولت با آرایش ۴×۲ (۴ باتری سری در ۲ رشته موازی) و ظرفیت نهایی ۱۶۴۰ آمپر ساعت با مساحت کل ۰/۵۳۵ مترمربع برای افزایش قابلیت اطمینان سیستم با فرض میانگین ۳ روز هوای ابری (بارانی) متوالی در ماه
- تعیین یک عدد شارژکنترلر با ظرفیت ۳۵ آمپر و حداکثر ولتاژ ورودی ۱۵۰ ولت مجهز به الگوریتم دنبال کننده حداکثر نقطه توان با راندمان ۹۸ درصد جهت محافظت از بانک باتری در برابر شارژ و تخلیه بیش از حد
- افزایش میزان انرژی موثر خروجی از آرایه PV به میزان حدوداً ۱۴٪ با تغییر دستی شیب آرایه PV از ۱۵ به ۵۳ درجه در دوره غیر آبیاری سال

^۱ Brushless

- بیشتر بودن هزینه‌های اولیه^۱ PVWPS مستقل از شبکه به‌میزان ۲/۱۴۱ برابر هزینه‌های اولیه سیستم پمپاژ متداول درحالی‌که در مدت زمان ۲۵ ساله پروژه هزینه‌های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ دیزل نسبت به سیستم مذکور ۱/۲۶۸ برابر خواهد بود.
- ۲/۴۱ برابر بودن هزینه‌های اولیه PVWPS متصل به شبکه نسبت به هزینه‌های اولیه سیستم پمپاژ متداول درحالی‌که در مدت زمان طول عمر پروژه، هزینه‌های کل چرخه عمر سیستم پمپاژ متداول نسبت به سیستم مذکور ۲/۴۴ برابر خواهد بود. (بخاطر سودآوری حاصل از فروش برق به شبکه)
- جلوگیری از انتشار بیش از ۸/۷ تُن آلاینده کربن دی‌اکسید به جو (معادل حدوداً ۱۶ درخت بالغ یا ۳۰ درخت جوان) در طول عمر ۲۵ ساله ماژول‌های فتوولتائیک به عنوان تامین‌کننده برق مورد نیاز مجموعه موتورپمپ در دوران آبیاری
- صرفه جویی سالانه در مصرف گازوئیل به میزان ۱۷۲۲-۱۸۲۰ لیتر و روغن موتور به اندازه ۸۵ لیتر در صورت جایگزینی سیستم پمپاژ متداول با نوع PVWPS
- صرفه جویی سالانه در آزادسازی ۴/۸۸۵-۵/۱۴۹ تُن کربن دی‌اکسید به جو در صورت جایگزینی سیستم پمپاژ متداول با نوع PVWPS
- جلوگیری از انتشار ۲۱/۵۷ تُن کربن دی‌اکسید به جو در صورت استفاده از ماژول‌های فتوولتائیک در روزهای باقیمانده سال در همان زاویه شیب روزهای آبیاری (۱۵ درجه) معادل جذب دی‌اکسید کربن توسط ۴۰ درخت بالغ (یا ۷۳ درخت جوان)
- جلوگیری از ورود ۲۳/۳۷ تُن کربن دی‌اکسید به جو در صورت استفاده از ماژول‌های PV در زاویه شیب بهینه ۵۳ درجه برای شش ماهه دوم سال (ماه‌های غیر آبیاری) معادل جذب دی‌اکسید کربن توسط ۴۳ درخت بالغ (یا ۷۹ درخت جوان)

^۱ Capital and installation costs

- برتری PVWPS در زمینه انتشار آلودگی صوتی با عملکرد بی صدا در حالت مستقل از شبکه (و یا در بدترین حالت با تولید صدای کمتر از ۲۵ دسیبل اینورتر در حالت متصل به شبکه) در مقایسه با سیستم پمپاژ متداول با میانگین تولید صدای ۸۶ دسیبل

۵-۲- پیشنهادات

در این پژوهش مطلوبیت استفاده از سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک مورد بررسی قرار گرفت. پس از تعیین اندازه بهینه اجزاء مختلف PVWPS، پارامترهای مورد بررسی در این پژوهش، توان و راندمان خروجی از ماژول‌های PV، هزینه‌های چرخه عمر و میزان انتشار آلاینده‌های صوتی و زیست محیطی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک بود. نتایج، عملکرد بهتر سیستم پیشنهادی را نسبت به سیستم‌های مرسوم پمپاژ به لحاظ اثرات زیست محیطی و نیز اقتصادی (در بلند مدت) برای یک میزان تقاضای مشخص نشان داد؛ بنابراین پیشنهاد می‌شود در مطالعات آتی موارد زیر نیز مورد بررسی قرار گیرد:

- آنالیز اگزرژی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک
- آنالیز حساسیت برای پارامترهای توان و راندمان پمپ و نیز راندمان کلی سیستم پمپاژ PV
- مقایسه اقتصادی سیستم PVWPS با سیستم پمپاژ دیزلی و برقی نوع روبین^۱
- امکان سنجی فنی و اقتصادی PVWPS برای آبیاری سایر محصولات کشاورزی و همچنین مرکبات
- امکان سنجی فنی و اقتصادی PVWPS به صورت کوپل شده با سیستم آبیاری قطره‌ای
- امکان سنجی فنی و اقتصادی PVWPS با مخزن ذخیره‌سازی آب در مقایسه با بانک باتری
- ساخت و بومی‌سازی سیستم PCU (کنترلر) برای موتورپمپ‌های داخلی

^۱ Robin

- [1] Rahul Rawat, S.C. Kaushik, and Ravita Lamba. (2016). *A review on modeling, design methodology and size optimization of photovoltaic based water pumping, standalone and grid connected system.*, J.of. Renew. Sustain. Energy Rev., 57, pp.1506-1519.
- [2] IEA. *key electricity trends from excerpts from electricity information.* (2015). available in: <www.iea.org/statistics/topics/electricity> (Accessed 20.11.2018).
- [3] IEA. *key renewables trends from excerpts from renewable information.* (2015). available in: <www.iea.org/statistics/topics/electricity> (Accessed 20.11.2018).
- [4] REN21. *Global status report renewables 2018.* available in: <http://www.ren21.net/wpcontent/uploads/2018/06/178652_GSR2018_FullReport_web_final_.pdf> (Accessed 20.11.2018).
- [5] Iran Foreign Policy & Government Guide. (2006). USA: International Business Publications., 1348.
- [6] Reddy VS, Kaushik SC and Panwar NL. (2013). *Review on power generation scenario of India.*, J. of. Renew Sustain Energy Rev., 18, pp.43–48.
- [7] Zabihi, M.S., Soleimani, E. Asl, and Farhangi, S. (1998). *Photovoltaic manufacturing, system design and application trend in Iran.*, J. of. Renewable Energy.,15, pp.496–501
- [8] Saeb M. Besarati, Ricardo Vasquez Padilla, D. Yogi Goswami, and Elias Stefanakos. (2013). *The potential of harnessing solar radiation in Iran: Generating solar maps and viability study of PV power plants.*, J. of. Renewable Energy., 53, pp.193-199.
- [9] VC. Sontake and VR. Kalamkar. (2016). *Solar photovoltaic water pumping system - A comprehensive.*, J. of. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 59, pp.1038e1067
- [10] Padmavathi K and Daniel S Arul. (2011). *Studies on installing solar water pumps in domestic urban sector.*, J. of. Sustain Cities and Soc., 1, pp.135–141.

- [11] IRENA. *Renewable Power Generation Costs in 2014*. Available in: <<http://www.irena.org>> (Accessed 20.11.2018).
- [12] Ghoneim AA. (2006). *Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems.*, J. of. Energy Convers Manage, 47., pp.1449–1463.
- [13] IRAN CO2 emissions, Global Carbon Atlas. (2017). available in: <<http://www.globalcarbonatlas.org/en/CO2-emissions>> (Accessed 20.11.2018).
- [14] Mehdi Niajalili, Peyman Mayeli, Mohammad Naghashzadegan and Amin Haghghi Poshtiri. (2016). *Techno-economic feasibility of off-grid solar irrigation for a rice paddy in Guilan province in Iran: A case study.*, J. of. Solar Energy., 150, pp.546-557.
- [15] Khatib T and Elmenreich W. (2014). *Novel simplified hourly energy flow models for photovoltaic power systems.*, J. of. Energy Conversion and Management., 79, pp.441-448.
- [16] P. Moriarty and D. Honnery. (2012). *What is the global potential for renewable energy.*, J. of Renewable and Sustainable Energy Reviews., 16, pp.244-252.
- [17] Kaunmuang P, Kirtikara K, Songprakorb R, Thepa S and Suwannakum T. (2001). *Assessment of photovoltaic pumping systems in Thailand—on decade experience.*, J. of. Solar Energy Materials & Solar Cells., 67, pp.529-534.
- [18] Chandel SS, Nagaraju Naik M and Chandel R. (2015). *Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies.*, J. of. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 49, pp.1084-1099.
- [19] World Bank. *World development report 2008: agriculture for development*. Washington DC: World Bank., pp.3–4.
- [20] Iran's Ministry of Energy Tavanir holding company of Iran. (2016). *Detailed statistics of Iran electricity production industry*. Available in: <<https://amar.tavanir.org.ir/en/>> (Accessed 20.11.2018).
- [21] Mahmoud E and Nather H. (2003). *Renewable energy and sustainable developments in Egypt: photovoltaic water pumping in remote areas.*, J. of. Appl Energy., 74, pp.141–147.

- [22] Iran's Ministry of Energy. (2015). *Stats and Information Network.*, Available in: <<http://pep.moe.gov.ir/>> (Accessed 20.11.2018).
- [23] Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA)., Available in: <<http://www.satba.gov.ir/en/home>> (Accessed 20.11.2018).
- [24] Hosseini R, Soltani M and Valizadeh G. (2005). *Technical and economic assessment of the integrated solar combined cycle power plants in Iran.*, J. of Renewable Energy., 30, 10, pp.1541-1555.
- [25] SOLARGIS. (2017). *The maps and data for Iran.*, Available in: <<https://solargis.com/maps-and-gis-data/download/iran/>> (Accessed 20.11.2018).
- [26] Reshef B, Suehrcke H and Appelbaum J. (1995). *Analysis of a photovoltaic water pumping system.* Proceedings of the eighteenth convention on electrical and electronics engineers in Israel., pp.7-8.
- [27] Tao Ma, Hongxing Yang, Lin Lu and Jinqing Peng. (2014). *An Optimization Sizing Model for Solar Photovoltaic Power Generation System with Pumped Storage.*, J. of Energy Procedia., 61, pp.5-8.
- [28] Imene Yahyaoui, Mahmoud Ammous and Fernando Tadeo. (2015). *Algorithm for Optimum Sizing of a Photovoltaic Water Pumping System.*, J. of. Computer Applications., 111, 6, pp.21-28.
- [29] Tamer Khatib, Azah Mohameda, and K. Sopian. (2013). *A review of photovoltaic systems size optimization techniques.*, J. of. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 22, pp.454-465.
- [30] Windhoek. (2006). *Feasibility assessment for the replacement of diesel pumps with solar pumps. Final Report.*, Namibia's Ministry of Mines and Energy., pp.76.
- [31] M. Ayub Hossain, M. Shoeb Hassan, M. Abdul Mottalib and Sultan Ahmmed. (2015). *Technical and economic feasibility of solar pump irrigations for eco-friendly environment.*, J. of. Procedia Engineering., 105, pp.670-678.
- [32] Anna Stoppato, Giovanna Cavazzini, Guido Ardizzon and Antonio Rossetti. (2014). *A PSO (particle swarm optimization)-based model for the optimal management*

of a small PV(Photovoltaic)-pump hydro energy storage in a rural dry area., J. of Energy.,76, pp.168-174.

[33] M. Benghanem, K.O. Daffallah, S.N. Alamri and A.A. Joraid. (2014). *Effect of pumping head on solar water pumping system.*, J. of. Energy Conversion and Management., 77, pp.334-339.

[34] T. Markvarta, A. Fragakia and J.N. Rossb. (2006). *PV system sizing using observed time series of solar radiation.*, J. of. Solar Energy., 80, 1, pp.46-50.

[35] Alvar Closas and Edwin Rap. (2017). *Solar-based groundwater pumping for irrigation: Sustainability, policies, and limitations.*, J. of. Energy Policy. 104, pp.33-37.

[36] Valer, L. R., Melendez, T. A., Fedrizzi, M. C., Zilles, R., and de Moraes, A. M. (2016). *Variable-speed drives in photovoltaic pumping systems for irrigation in Brazil.*, J. of. Sustainable Energy Technologies and Assessments, 15, pp.20–26.

[37] Dhiaa Halboot Muhsen, Abu Bakar Ghazali, Tamer Khatib and Tawfeeq Enad Abdulabbas. (2017). *Techno-economic study and optimal sizing of a stand-alone photovoltaic water pumping system.* Wiley Online Library., 27, 9, pp.2355.

[38] P. Talebizadeh, M.A. Mehrabian and M. Abdolzadeh. (2011). *Prediction of the optimum slope and surface azimuth angles using the Genetic Algorithm.*, J. of. Energy and Buildings., 43, pp.2998-3005.

[39] Tabaei H and Ameri M. (2012). *The effect of booster reflectors on the photovoltaic water pumping system performance.*, J. of. Sol Energy Eng., 134, pp.1-4.

[40] Gopal C, Mohanraj M, Chandramohan P and Chandrasekar P. (2013). *Renewable energy source water pumping systems—a literature review.*, J. of. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 25, pp.351-370.

[41] Mazandaran Meteorological Administration. Iran, Sari. (2016). Available in: <<http://www.mazmet.ir/en>> (Accessed 20.11.2018).

[42] European Commission Joint Research Center, (2016). PVGIS Solar Irradiance Data. Available in: <<http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>> (Accessed .20.11.2018)

- [43] PVSYST software. Available in: <<https://www.pvsyst.com/>> (Accessed.20.11.2018)
- [44] Markvart, T. and Castaner, L., (2003). *Practical Handbook of Photovoltaic's: Fundamentals and Applications*. Elsevier Advanced Technology. Available in: <<https://goo.gl/1YGLV1>>
- [45] Islam, M.D., Kubo, I., Ohadi, M. and Alili, A.A. (2009). *Measurement of solar energy radiation in Abu Dhabi, UAE*. J. of. Appl. Energy., 86, pp.511–515.
- [46] Bouman, B.A., Lampayan, R.M. and Tuong, T.P. (2007). *Water Management in Irrigated Rice. International Rice Research Institute, Los Banos, Philipine*. Available in: <<https://goo.gl/9oCWbY>>
- [47] M. Sheidaean, M.Kh. Ziatabar Ahmadi and R. Fazloulou. (2015). *Study on Climate Change Effect on Net Irrigation Requirement and Yield for Rice Crop (Case Study: Tajan Plain)*., J. of. Water and Soil., 28, pp.1284-1297.
- [48] Cuadros F, Lopez-Rodriguez F, Marcos A and Coello J. (2004). *A procedure to size solar powered irrigation (photo irrigation) schemes.*, J. of. Sol Energy., 76, pp.465–73.
- [49] Olcan C. (2015). *Multi-objective analytical model for optimal sizing of stand-alone photovoltaic water pumping systems.*, J. of. Energy Conversion and Management., 100, pp. 358-369.
- [50] Arab A, Chenlo F and Benghanem M. (2004). *Loss-of-load probability of photovoltaic water pumping systems.*, J. of. Sol Energy., 76, pp.713–723.
- [51] Morales TD. (2010). *Design of small photovoltaic (PV) solar-powered water pump systems, Technical Note.*, Natural Resources Conservation Service(NRCS)., 28, pp.1–64
- [52] Kacira M, Simsek M, Babur Y and Demirkol S. (2004). *Determining optimum tilt angles and orientations of photovoltaic panels in Sanliurfa, Turkey.*, J. of. Renew Energ., 29, 8, pp.1265–1275.
- [53] M. Abdulaziz. (1994). *Optimum tilt angle for solar collection systems.*, International Journal of Solar Energy., 14, pp.191–202.

- [54] Kolhe M, Joshi JC and Kothari DP. (2004). *Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system.*, IEEE Trans Energy Convers., 19, 3, pp.613–618.
- [55] Katan RE, Agelidis VG and Nayar CV. (1996). *Performance analysis of a solar water pumping system.*, Proceedings of power electronics, drives and energy systems for industrial growth; 8, 11, pp. 81–87.
- [56] Caton P. (2014). *Design of rural photovoltaic water pumping systems and the potential of manual array tracking for a West-African village.*, J. of. Sol Energy., 103, pp.288–302.
- [57] Rustemli S, Dincer A, Unal E, Karaaslan M and Sabah C. (2013). *The analysis on sun tracking and cooling systems for photovoltaic panels.*, J. of. Renew Sustain Energy Rev., 22, pp.598–603.
- [58] Kelley, L.C., Gilbertson, E., Sheikh, A., Eppinger, S.D. and Dubowsky, S. (2010). *On the feasibility of solar-powered irrigation.*, J. of. Renew. Sustain. Energy Rev., 14, pp.2669–2682.
- [59] S.S. Chandel, M. Nagaraju Naik and Rahul Chandel. (2015). *Review of solar photovoltaic water pumping system technology for irrigation and community drinking water supplies.*, J. of. Renewable and Sustainable Energy Reviews., 49, pp.1084-1099.
- [60] Bloos Hans, Genthner Markus, Heinemann Detlev, Janssen Andreas, Moraes Rejane. (1996). *Proceedings of photovoltaic pumping systems a comparison of two concepts.*, EuroSun'96., pp. 583–87.
- [61] Lawrance W, Wichert B and Langridg D. (1995). *Simulation and performance of a photovoltaic pumping system.*, Proceedings of 1995 international conference on power electronics and drive systems., 1. pp. 513–518.
- [62] Wamy CLP, Singh B, Singh BP and Murthy S. (1996). *Experimental investigations on a permanent magnet brushless DC motor fed by PV array for water pumping system.*, Proceedings of the 31st intersociety energy conversion engineering conference., 3, pp.1663–1668.

- [63] Vick Brian D and Clark R. Nolan. (2009). *Determining the optimum solar water pumping system for domestic use, livestock watering or irrigation.*, Proceedings from the 38th ASES annual conference., 4, pp.2212–2239.
- [64] Vick B and Clark R. (2011). *Experimental investigation of solar powered diaphragm and helical pumps.*, J. of. Sol Energy., 85, pp.945–954.
- [65] T.D. Short and J.D. Burton. (2003). *The benefits of induced flow solar powered water pumps.*, J. of. Solar Energy., 74, pp.77-84.
- [66] Merino GG, Lagos LO and Gontupil JE. (2008). *Monitoring and evaluation of a direct coupled photovoltaic pumping system.*, J. of. Appl Eng Agric., 24, 3, pp.1–8.
- [67] Katan RE, Agelidis VG and Nayar CV. (1996). *Performance analysis of a solar water pumping system.*, Proceedings of power electronics, drives and energy systems for industrial growth., 1, pp. 81–87.
- [68] Akihiro Oi Taufik, Anwari Makbul and Taufik Mohammad. (2009). *Modelling and simulation of photovoltaic water pumping system.*, Proceedings of third Asia international conference on modelling simulation., pp. 497–02.
- [69] Mondol JB, Yohanis YG and Norton B. (2006). *Optimal sizing of array and inverter for grid-connected photovoltaic systems.*, J. of. Sol Energy., 80, pp.1517_1539.
- [70] Munzer S.Y. Ebaid, Hasan Qandil and Mahmoud Hammad. (2013). *A unified approach for designing a photovoltaic solar system for the underground water pumping well-34 at Disi aquifer.*, J. of. Energy Conversion and Management., 75, pp.780-795.
- [71] Roger A. Messenger and Jerry Ventre. (2010). *Photovoltaic systems engineering third edition*, Boca Raton: CRC Press.
- [72] Mukund RPatel. (1999). *Wind and solar energy*. CRC Press LLC.
- [73] Kolhe M, Joshi JC and Kothari DP. (2004). *Performance analysis of a directly coupled photovoltaic water-pumping system.*, IEEE Trans Energy Convers., 19, 3, pp.613–618.
- [74] Abdolzadeh M and Ameri M. (2009). *Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells.* J. of. Renew Energy., 34, pp.91–96.

- [75] Boyle, G. (2004). *Renewable energy*. OXFORD.
- [76] The German solar energy society. (2005). Planning and installing photovoltaic systems.
- [77] S. A. Klein. (1977). *Calculation of monthly average insolation on tilted surfaces.*, J. of. Solar energy., 19, pp. 325-32.
- [78] A. Hamidat and B. Benyoucef. (2008). *Mathematic models of photovoltaic motor-pump systems.*, J. of. Renewable Energy., 33, pp.933-942.
- [79] BERNT LORENTZ GmbH. Available in:< <https://www.lorentz.de/products-and-technology> > (Accessed 20.12.2018).
- [80] Deb, K., et al. (2002). *A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II.*, IEEE Transactions on Evolutionary Computation., 6 ,2, pp.181–197.
- [81] Bennett, David A., Wade, Greg A. and Armstrong, Marc P. (1999). *Exploring the Solution Space of Semi-Structured Geographical Problems Using Genetic Algorithms.*, J. of. Transactions in GIS., 3, 1, pp. 51-71
- [82] Coello Coello, Carlos A., Lamont, Gary B. and Van Veldhuizen, David A. (2007). *Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems*, 2th edn, Springer.
- [83] Beheshtifar, S. (2014). PhD Thesis. *Design and implement of a simultaneous location-allocation model of different service centers using evolutionary algorithms.* Faculty of Geodesy and Geomatics. K. N. Toosi University of Technology. Tehran. Iran.
- [84] Shen WX. (2009). *Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia.*, J. of. Renew Energy., 34, 1, pp.348–352.
- [85] Fezai S and Belhadj J. (2014). *Optimal sizing of a stand-alone photovoltaic system using statistical approach.*, Int J Renew Energy Res., 4, 2, pp.329–337.
- [86] Meral ME and Dincer F. (2011). *A review of the factors affecting operation and efficiency of photovoltaic based electricity generation systems.*, J. of. Renew Sustain Energy Rev., 15, pp.2176–2184.

- [87] Schiffer J, Sauer DU, Bindner H, Cronin T, Lundsager P and Kaiser R. (2007). *Model prediction for ranking lead-acid batteries according to expected lifetime in renewable energy systems and autonomous power-supply systems.*, J. of. Power Sources., 168, 1, pp.66–78.
- [88] Domenech B, Ranaboldo M, Ferrer-Martí L, García-Villoria A and Pastor R. (2013). *Design of autonomous rural electrification systems for isolated Spanish communities.*, Proceedings of the 3rd edition of the International Conference on Microgeneration and Related Technologies, Napoli., pp.15-17.
- [89] Cloutier M and Rowley P. (2011). *The feasibility of renewable energy sources for pumping clean water in sub-Saharan Africa: a case study for Central Nigeria.*, J. of. Renew Energy., 36, pp.2220-2226.
- [90] Ahmad GE. (2002). *Photovoltaic-powered rural zone family house in Egypt.*, J. of. Renew Energy., 26, pp.379-390
- [91] Adeoti O, Oyewole BA and Adegboyega TD. (2001). *Solar photovoltaic-based home electrification system for rural development in Nigeria: domestic load assessment.*, J. of. Renew Energy., 24, pp.155-161.
- [92] Zobaa, A.F. and Bansal, R.C. (2011). *Handbook of Renewable Energy Technology.* The University of Queensland, Australia.
- [93] Bouzidi B. (2013). *New sizing method of PV water pumping systems.*, J. of. Sustainable Energy Technologies and Assessments., 4, pp.1-10.
- [94] Central Bank of the Islamic Republic of Iran. (2017). Available in: <<https://cbi.ir/showitem/16742.aspx>> (Accessed 20.11.2018).
- [95] Global-Rates. summary of current international inflation figures. (2017). Available in: <<https://www.global-rates.com/economic-indicators/inflation/inflation.aspx>> (Accessed.20.11.2018).
- [96] Central Intelligence Agency, Inflation and discount rate. (2017). Available in: <<https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2092rank.html>> (Accessed 20.11.2018).

- [97] National Renewable Energy Laboratory. (2017). Solar Photovoltaic System Cost Benchmark: Q1 2017., Available in: <<https://www.nrel.gov/docs/fy17osti/68925.pdf>> (Accessed 20.11.2018).
- [98] Kubota Corporation. Available in: <<https://www.kubota.com.au/product/rt100/>> (Accessed 20.11.2018).
- [99] Dhiaa Halboot Muhsen, Tamer Khatib and Haider Tarish Haider. (2017). *A feasibility and load sensitivity analysis of photovoltaic water pumping system with battery and diesel generator.*, J. of. Energy Conversion and Management., 148, pp.287_304
- [100] Burger B and Ruther R. (2006). *Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature.*, J. of. Sol Energy., 80, pp.32–45.
- [101] AEG company. Available in: <<https://www.aeg-industrialsolar.de/product/inverters/singe-phase-inverters/one-phase-inverter/>> (Accessed 20.12.2018).
- [102] Bangladesh Agricultural Development Corporation. (2012). Summary of irrigation equipment used, area irrigated and benefited farmers: Shech Bhavan, Dhaka.
- [103] Iran’s Ministry of Energy Deputy for power & energy affairs power & energy planning department. (2014). *Iran and world energy facts and figures.* Available in: <<http://isn.moe.gov.ir/?lang=en-us>> (Accessed 20.11.2018).
- [104] Daniel Weisser. (2007). *A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies.*, J. of. Energy., 32, pp.1543-1559.
- [105] Mitigation of Climate Change Annex III. (2014). *Technology - specific cost and performance parameters.*, IPCC., P.7
- [106] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2014). *Life Cycle Greenhouse Gas Emissions from Solar Photovoltaics.*, Available in: <<https://www.nrel.gov/docs/fy13osti/56487.pdf>> (Accessed 20.11.2018).
- [107] The Food and Agriculture Organization of the United Nations. Available in: <<http://www.fao.org/docrep/S2022E/s2022e07.htm>> (Accessed 20.11.2018).

- [108] Bucher W. (1996). *Aspects of solar water pumping in remote regions.*, J. of Energy Sustain Dev., 3, 4, pp.8–27.
- [109] Hwang, C.L. and Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision.*, Springer., 186, pp.58–191
- [110] Odeh I, Yohanis Y and Norton B. (2006). *Influence of pumping head, insolation and PV array size on PV water pumping system performance.*, J. of. Sol Energy., 1, pp.51_64.
- [111] Trojan Battery Company. Available in: <<https://www.trojanbattery.com/product/solar-sagm-12-205/>> (Accessed 20.12.2018)
- [112] VICTRON Energy B.V. Company. Available in: <<http://www.victronenergy.com/solar-charge-controllers/bluesolar-mppt-150-35/>> (Accessed 20.12.2018).
- [113] Mahjoubi Ammar, Mechlouch Ridha Fethi and Brahim Ammar Ben. (2010). *Economic viability of photovoltaic water pumping systems in the desert of Tunisia.*, Proceedings of international renewable energy congress., p. 39–43.
- [114] Michael Emmanuel, Daniel Akinyele and Ramesh Rayudu. (2016). *Techno-economic analysis of a 10 KWp utility interactive photovoltaic system at Maungaraki school, Wellington, New Zealand.*, J. of. Energy., 120, pp. 573-583.
- [115] John R, Franks, Mark R, Stephenson and Carol J. Merry. (1996). *Preventing occupational hearing loss*, NIOSH., Available in: <<http://www.cdc.gov/niosh/homepage.html>> (Accessed 20.11.2018).
- [116] Jinko Solar company. Available in: <<https://jinkosolar.com/us/utility/>> (Accessed 20.11.2018).
- [117] Badaru Yahaya Usman, Nassir Yakubu Mohammed and Musa Yakubu. (2016). *Change Detection of Forestry Trees Sequestration of Carbon Dioxide is Falling: Case Study of Pasali-Kuje of the Federal Capital Territory, Nigeria.*, International Journal of scientific research in Science and Technology., 2, 3.
- [118] John Durbin Husher. (2007). *Beyond Global Warming: The Bigger Problem and Real Crisis.*, iUniverse.Inc, P. 50.

[119] United States Environmental Protection Agency (EPA). (2018). Available in: <https://www.epa.gov/sites/production/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf> (Accessed 20.11.2018).

Abstract

The photovoltaic water pumping system (PVWPS) is emerging as one of the best options for pumping water due to simple installation, maintenance, and long life-time operation. However, these systems suffer from some major disadvantages such as high capital cost as well as low reliability under variable weather conditions during the irrigation process. Therefore, the effective design and optimal sizing of components are essential for a sustainable and proper operation which significantly result in the reduction of costs. Hence, in this study, the required pumping power was determined with the aim of supplying the required water in a rice paddy with an area of one hectare located in northern Iran according to the required crop flow rate. Then with determining the optimum slope for the installation of PV array, the optimal number of PV modules required to supply the power of the motor-pump was determined using the NSGA-II optimization algorithm. Also, a battery bank was utilized as a backup system to increase system reliability and sustainability in cloudy or rainy days. For protecting the batteries from over-charge and over-discharge, charge controllers were employed. Suggesting Power Purchase Agreement (PPA) to compensate for the high cost of PVWPS compared to conventional pumping systems in non-irrigation months of the year is probably the most important part of this research along with the economical comparison of PVWPS and conventional pumping systems. The results indicate that the capital and installation costs of the off-grid and grid connected PVWPS in this study were 2.141 and 2.41 times as the capital and installation costs of the conventional pumping system. However, for the project life-time of 25 years, the total life-cycle costs of the conventional pumping system were 1.268 and 2.44 times as those of the mentioned systems, respectively. The results of PVWPS environmental impact assessment showed that the system was able to reduce CO₂ emissions to the atmosphere by about 8.728 tons, equivalent to approximately 16 mature trees (or 30 young trees) during the irrigation period. Also, the conventional pumping system produces an average noise level of 86 dB, which is not a healthy level of noise. It indicates the tangible superiority of PVWPS over its competitor in noise level context.

Keyword:

PV module, Solar water pump, Battery bank, Charge controller, Optimization, NSGA-II, Sale of electricity to the grid, Economic analysis, Environmental analysis



Shahrood University of Technology

Faculty of Mechanical and Mechatronics Engineering

M.Sc. Thesis in Energy Systems Engineering

**Techno-economical Optimization of Solar Photovoltaic
Pump by using of NSGA-II Algorithm**

By: Amir Hossein Nikzad

Supervisor:

Dr. Mahmood Chahartaghi

Advisor:

Dr. Mohammad Hossein Ahmadi

January 2019