

فصلنامه پژوهش‌های سیاست‌گذاری و برنامه‌ریزی انرژی

سال چهارم/ شماره ۱۱/ تابستان ۱۳۹۷/ صفحات ۲۲۸-۲۰۱

تحلیل فنی - اقتصادی آبیاری خورشیدی: مقایسه با منابع متداول انرژی در آبیاری

عاطفه پرورش ریزی

استادیار گروه مهندسی آبیاری و آبادانی دانشگاه تهران

(نویسنده مسئول)

parvarsh@ut.ac.ir

افشین اشرف‌زاده

استادیار گروه مهندسی آب دانشگاه گیلان

ashrafzadeh@guilan.ac.ir

حفظ محیط‌زیست، دستیابی به رشد اقتصادی و توسعه پایدار، سیاست‌گذاری‌ها را به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر سوق داده است. بخش کشاورزی از مصرف‌کننده‌های عمده انرژی است بویژه اینکه سیاست دولت توسعه آبیاری تحت فشار است و تامین انرژی آن اهمیت زیادی دارد. در این تحقیق، روش طراحی و انتخاب پمپ آب کشاورزی در یک سیستم فتوولتائیک (PV)، با توجه به شرایط بومی ارائه شد. سپس با معرفی روش‌شناسی، تحلیل هزینه‌های دوره عمر در سامانه‌های پمپاژ خورشیدی، دیزلی و برقی در مورد کاوی محصول انگور در منطقه کاشمر انجام شد. طبق نتایج، پمپ خورشیدی در این طرح آبیاری می‌تواند فقط برای توان کمتر از ۴/۵ kW با پمپ دیزلی رقابت کند، مگر اینکه یارانه متعلق به هزینه برق و سوخت دیزل کاهش یابد. بنا بر نتایج، امکان آبیاری خورشیدی به سطح زیرکشت، نوع محصول، قیمت و میزان دسترسی به انرژی‌های دیگر، نوع فناوری سامانه خورشیدی و نوع سامانه آبیاری وابسته است و مطالعه امکان‌سنجی در هر منطقه باید به دقت انجام شود. هر چند که پژوهش‌های بیشتری در این زمینه نیاز است، اما ترویج، اختصاص تسهیلات مالی و نظارت بر طراحی از ارکان سیاست‌گذاری برای گسترش آبیاری خورشیدی است.

واژه‌های کلیدی: آبیاری خورشیدی، انتخاب پمپ، انرژی تجدیدپذیر، هزینه دوره عمر، یارانه انرژی

تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۳/۸

تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۲/۲۵

۱. مقدمه

با توجه به رشد روز افزون استفاده از انرژی و مواجهه با آلودگی‌های ناشی از سوخت فسیلی و نیز پایان‌پذیر بودن آن، نیاز به استفاده از انرژی‌های نو و تجدیدپذیر (RES^۱) بویژه انرژی خورشیدی در دنیا رو به گسترش است. انرژی خورشیدی یکی از منابع پاک و بی‌پایان طبیعی است که می‌تواند جایگزین سوخت‌های معمول برای تولید انرژی باشد. بر اساس آمار منتشرشده بی‌پی^۲ (تجارت انرژی جهانی، ۲۰۱۳)، گرچه مصرف انرژی‌های تجدیدپذیر در مقابل انرژی‌های تجدیدناپذیر سهم ناچیزی دارد، اما با گذشت زمان و اعمال سرمایه‌گذاری‌ها و زیرساخت‌های لازم، میزان کاربرد آنها روند رو به رشدی را نشان می‌دهد. بر این اساس، در بین کشورهای آسیایی، چین با ۱۳/۴، هند با ۴/۶ و ژاپن با ۳/۴ درصد به ترتیب، رتبه‌های اول تا سوم را در سهم انرژی تجدیدپذیر نسبت به کل انرژی تولیدی در داخل هر کشور به خود اختصاص داده‌اند. بخشی از انرژی‌های تجدیدپذیر را انرژی خورشیدی تشکیل می‌دهد. سامانه‌هایی که انرژی خورشیدی را استحصال و ذخیره کرده و امکان استفاده از آن را فراهم می‌کنند، فتوولتائیک^۳ نامیده می‌شوند. در استفاده از پمپ‌ها، هزینه سیستم پمپ فتوولتائیک تقریباً نصف پمپ‌های دیزلی، بادی و الکتریکی بوده است. با گسترش استفاده از پمپ‌های فتوولتائیک، قیمت آنها کاهش چشم‌گیری داشته است، به طوری که بین سال‌های ۲۰۱۰ تا ۲۰۱۴ قیمت کلی سیستم‌های فتوولتائیک نصب‌شده از ۲۹ تا ۶۵ درصد نسبت به سال ۲۰۰۹ بر حسب نوع منطقه کم شده است. مقایسه قیمت تولید برق نشان می‌دهد که در بهترین حالت، سیستم‌های فتوولتائیک بدون دریافت کمک مالی، با قیمت ۰/۰۸ دلار به ازای هر کیلووات ساعت و نیروگاه‌های سوخت فسیلی با قیمت ۰/۴۵ تا ۰/۱۴ دلار به ازای هر

-
1. Renewable Energy Sources
 2. BP global
 3. Photovoltaic (PV)

کیلووات ساعت، الکتروسیسته تحویل می دهند (Adnan, 2015). علاوه بر هزینه های اولیه، بالا بودن هزینه های جاری پمپ های دیزلی، فرصت رقابت به پمپ های فتوولتائیک را می دهد. همچنین استفاده از سیستم های فتوولتائیک با توان مصرفی کم، اقتصادی تر از پمپ های دیزلی است. اما با افزایش توان مصرفی، گرچه هزینه هر واحد آب پمپ شده کاهش می یابد، اما پمپ های دیزلی مقرون بصرفه تر خواهند بود (گزارش بانک جهانی، ۱۹۹۳). در تمام مطالعات انجام شده، بالا بودن هزینه های تعمیرات پمپ های دیزلی و در مقابل ناچیز بودن هزینه نگهداری پمپ های فتوولتائیک موجب توجیه پذیری اقتصادی پمپ های فتوولتائیک شده است. از استفاده از سیستم های پمپ خورشیدی در آبیاری در دنیا - که اصطلاحاً آبیاری خورشیدی نامیده می شود - چند دهه می گذرد و همزمان با پیشرفت فناوری، این بخش نیز توسعه زیادی یافته است. در ایران، گزارش، استاندارد، سیاست گذاری و یا پژوهش قابل توجهی در این زمینه یافت نمی شود. با توجه به گسترش آبیاری مدرن و نیاز بیشتر به انرژی در این بخش و ضرورت توجه به بهره وری آب- انرژی در کشور، لزوم تحقیقات گسترده و کاربرد آن به شکلی سنجیده و علمی در این زمینه احساس می شود. از آنجا که محاسبه توان لازم برای آبیاری و انتخاب پمپ مناسب از نظر هیدرولیکی و مکانیکی در طرح های آبیاری تحت فشار بسیار مهم است، در تحقیق حاضر روش طراحی و انتخاب پمپ آب کشاورزی در یک سیستم فتوولتائیک (PV)، با توجه به شرایط بومی کشور (از نظر محصول، اقلیم منطقه، شیوه آبیاری، هزینه های متداول در احداث و نگهداری سامانه های مختلف پمپاژ آب کشاورزی، ضرایب اقتصادی متداول در کشور و...) ارائه شد. سپس با معرفی روش شناسی، تحلیل هزینه های دوره عمر در سامانه های پمپاژ خورشیدی، دیزلی و برقی در مورد کاوی محصول انگور در منطقه کاشمر انجام و مقایسه شد. بدیهی است همچنان به تحقیقات مستمر در زمینه آبیاری خورشیدی برای امکان سنجی، ترویج، فراهم بودن بسترهای عملیاتی و اصول طراحی و اجرای بومی نیاز است.

۲. پیشینه تحقیق

سیستم فتوولتائیک (PV) طراحی شده برای ۵ هکتار باغ انار تحت آبیاری قطره‌ای در منطقه خشک جاده‌پور در هند مورد آزمایش قرار گرفت. نتایج نشان داد سیستم قطره‌ای با پمپ خورشیدی برای گسترش باغات در مناطق خشک مناسب است. بررسی عملکرد سیستم در مزارع پژوهشی نشان داد که پمپ PV می‌تواند با تولید فشار مناسب، دبی مورد نیاز هر قطره چکان را در طول ساعات مختلف روز با یکنواختی انتشار ۹۲ تا ۹۶ درصد ایجاد کند. نسبت سود به هزینه این سیستم (حتی با هزینه پمپ خورشیدی تک بلور سیلیکونی) برای محصول انار بیشتر از ۲ ارزیابی شد (Pande et al., 2003). تامین انرژی برای زمین‌های کشاورزی در مناطق بیابانی و نیمه‌بیابانی به دلیل محدودیت منابع آبی از جمله چاه یکی از مشکلات عمده کشاورزان این مناطق است. در این زمین‌ها با مکان‌یابی منبع آبی قابل اطمینان می‌توان از فراگیر بودن انرژی خورشیدی استفاده نمود و به کمک پمپ‌های فتوولتائیک نه تنها از تخریب مرغزارهای این مناطق جلوگیری کرد، بلکه باعث پیشرفت‌های اقتصادی-اجتماعی و بهبود کیفیت زندگی مردم منطقه شد. تحقیقات بسیاری در زمینه مکان‌یابی این پمپ‌ها در نقاط مختلف جهان انجام شده است (Yu et al., (2011); Ben Belgacem (2012)). مطالعه‌ای بر روی نیم هکتار از اراضی ایالت آگیدیر ترکیه به منظور بررسی تحلیل اقتصادی سیستم‌های دیزلی و فتوولتائیک برای آبیاری قطره‌ای یک باغ سیب انجام شد. با توجه به بالا بودن قیمت سوخت در ترکیه (نسبت به بسیاری از نقاط از جمله ایران)، نتایج نشان داد طی دوره آماری ۲۵ سال طبق تحلیل LCC^۱ استفاده از سیستم فتوولتائیک به صرفه است (Senol, 2012). در مطالعه‌ای در شمال غرب چین با تعیین نیاز آبی گیاهان کشت شده، حجم آب برای پمپاژ محاسبه شده است. نتایج نشان داده است هزینه نصب و استفاده پمپ‌های خورشیدی برای سیستم آبیاری مورد نظر کمتر از پمپ‌های دیزلی است که به طور معمول استفاده می‌شوند و همزمان اثرات

1. Life Cycle Cost

اکولوژیکی - محیط‌زیستی مثبتی هم به همراه دارند (Gao et al., 2013). در دلتای نیل در کشور مصر ۶۰۰ ایستگاه پمپاژ دیزلی کار انتقال آب به کانال‌های آبیاری را انجام می‌دهند که برای ۲۰ درصد آنها نحوه تبدیل به پمپ‌های خورشیدی مطالعه شده است. پارامترهای مهم در این تحقیق، تعداد ایستگاه‌های لازم مجهز به پمپ خورشیدی، سطح لازم برای گسترش پانل‌های خورشیدی و همچنین برآورد اثرات زیست‌محیطی است که در اثر حذف CO₂ پمپ‌های دیزلی حاصل می‌شود. در نتایج این مطالعه، اطلاعات لازم در مورد هر نوع ایستگاه پمپاژ وجود دارد تا تصمیم‌گیرندگان بتوانند روش درست را برای پمپاژ آب پیدا کنند (Eshraa, 2013). در تحقیقی در هند برای ارتقای فناوری پمپ‌های آب کشاورزی، قابل اطمینان بودن، هزینه بهره‌برداری ناچیز، عدم نیاز به هزینه نگهداری و کاهش انتشار کربن به عنوان مزایای پمپ‌های خورشیدی نسبت به پمپ‌های دیزلی عنوان شده است. همچنین در این مطالعه پیشنهاد شده است که برای استخراج آب از چاه‌های کم - عمق به لحاظ صرفه اقتصادی از پمپ خورشیدی استفاده شود (Relph, 2014). انرژی حاصل از سیستم پمپ‌های خورشیدی برای زمین‌های کشاورزی دورافتاده که دسترسی به انرژی الکتریکی ندارند، یک منبع قابل اعتماد، ایمن و کاربردی است (Kaldellis et al., 2011). در این راستا، مطالعه‌ای در شمال بنگلادش انجام شده و نتایج حاکی از آن است که با وجود قیمت اولیه بالای پمپ‌های خورشیدی، استفاده از آنها به دلیل هزینه‌های نگهداری کم و طول عمر مفید بالا، مقرون به صرفه است (Roy et al., 2015). در تحقیقی در هند، قابلیت‌های فنی و جنبه‌های اقتصادی سیستم‌های پمپ فتوولتائیک به طور دقیق بررسی و نتایج تحقیق نشان داد با وجود یارانه‌های سنگینی که از منابع مختلف به پمپ‌های دیزلی و الکتریکی تعلق می‌گیرد، مزایای استفاده از انرژی خورشیدی، هزینه اولیه تبدیل پمپ‌های دیزلی و الکتریکی به پمپ‌های فتوولتائیک را توجیه نمی‌کند. در حالت ایده‌آل، یارانه دولتی باید زمانی تعلق گیرد که مزایای اجتماعی طرحی بیش از هزینه‌های اجتماعی آن باشد و با استفاده از یارانه دولتی هزینه‌های شخصی برای هر فرد کاهش یابد.

اما این موضوع برای پمپ‌های فتوولتائیک آبیاری اتفاق نیفتاده است (Bassi, 2015). هند به منظور کاهش انتشار کربن اقدام به افزایش ظرفیت انرژی خورشیدی متصل به شبکه نموده است، اما با وجود یارانه‌های سنگین در بخش کشاورزی برای پمپ‌های دیزلی و الکتریکی و همچنین نبود قوانین لازم برای استخراج آب زیرزمینی از چاه‌ها، بهره‌برداری از آب‌های زیرزمین و به تبع آن، انتشار کربن افزایش یافته است. تجزیه و تحلیل اقتصادی پمپ‌های دیزلی و خورشیدی در هند نشان می‌دهد که با در نظر گرفتن سود ناشی از کاهش انتشار کربن و هزینه طول عمر پمپ‌های خورشیدی (دوره ۲۰ ساله)، استفاده از پمپ‌های خورشیدی مقرون به صرفه نیست. همچنین با احتساب مخارج پمپ‌های دیزلی شامل سرمایه اولیه، تعمیر و نگهداری، سوخت و انتشار کربن، استفاده از پمپ‌های خورشیدی هزینه‌های طرح‌ها را افزایش می‌دهد. بنابراین، انرژی خورشیدی در هند، زمانی قابل رقابت با سایر انرژی‌های موجود است که در مقیاس وسیع تولید شود (Bassi, 2017). به هر صورت، توسعه پایدار در بخش کشاورزی مسأله‌ای حائز اهمیت است که هدف اصلی آن حیات و پایداری سیستم غذایی است. برای دستیابی به پایداری غذایی نه تنها افزایش تولیدات کشاورزی، بلکه کاهش مصرف انرژی و کاهش هدررفت منابع نیز لازم است. در همین راستا، کاربرد انرژی‌های تجدیدپذیر یک راه حل مناسب برای دستیابی به توسعه پایدار تلقی می‌شود. (Rockstrom et al., 2017)

بر اساس آمار وزارت نیرو در سال ۱۳۹۰، ۸۳/۵ درصد از کل ظرفیت تولید برق کشور مربوط به نیروگاه‌های حرارتی، ۱/۵ درصد مربوط به نیروگاه اتمی، ۱۴ درصد متعلق به واحدهای نیروگاهی برق آبی، ۰/۳ درصد انرژی‌های نو و ۰/۷ درصد مربوط به نیروگاه‌های مولد مقیاس کوچک یا تولید پراکنده است. طبق آمار سال ۲۰۰۲، روزانه از مجموع ۳/۵ میلیون بشکه نفت، ۱/۲ میلیون بشکه صرف مصارف داخلی از جمله تولید برق می‌شود. میزان آلودگی بوجود آمده و تولید CO₂ در این نیروگاه‌ها در حدود ۳۷/۵ میلیون تن در سال ۲۰۰۲ بوده است که با توجه به رشد ۶ الی

۸ درصدی تقاضای برق درایران، این میزان تا سال ۲۰۲۰ به حدود ۱۰۷/۵ میلیون تن در سال خواهد رسید (عامری و همکاران، ۱۳۸۴). از سوی دیگر، میزان تابش دریافتی در اکثر مناطق ایران نسبت به سایر مناطق جهان بسیار بالاست (کمالی و مرادی، ۱۳۸۴). قسمت اعظم مناطق بیابانی ایران به طور متوسط $4/5 \text{ kW.h/m}^2$ الی $5/2$ در سطح افقی خورشید، انرژی خورشیدی دریافت می‌کند. با توجه به ضرورت رشد اقتصادی در کشورهای در حال توسعه مانند ایران، جایگزینی انرژی‌های تجدیدپذیر به جای سوخت‌های فسیلی می‌تواند باعث ارتقا و امنیت انرژی شده و در حفظ محیط‌زیست نقش عمده‌ای را ایفا کند. یکی از مصرف‌کننده‌های بزرگ انرژی در ایران، بخش کشاورزی است. همچنین قسمت اعظمی از انرژی در کشت‌های آبی صرف راه‌اندازی و بهره‌برداری پمپ‌ها و ایستگاه‌های پمپاژ می‌شود. پمپ‌های آب کشاورزی در تامین آب برای آبیاری سطحی و یا تامین فشار در آبیاری تحت فشار استفاده می‌شوند و در بیشتر مواقع برای استحصال آب زیرزمینی از چاه‌ها به کار می‌روند. با توسعه روز افزون روش‌های جدید آبیاری و سیاست‌های دولت ایران برای گسترش آبیاری تحت فشار، افزایش کاربرد پمپ‌ها و انرژی مصرفی آنها اجتناب‌ناپذیر است. بنابراین، بخش عمده هزینه‌ای که بر کشاورزان و همچنین دولت تحمیل می‌شود، هزینه گزاف انرژی است که از دید کلان نقش مهمی در غیراقتصادی بودن کشاورزی ایفا می‌کند. در مناطق دورافتاده، تامین انرژی برای گسترش روش‌های مدرن آبیاری مشکل است و این مساله باعث می‌شود همچنان از روش‌های سنتی برای آبیاری استفاده شود و این موضوع، تلفات آب و پایین بودن بهره‌وری آب را به همراه دارد. در مناطقی که به دلیل دوری از مراکز شهری به انرژی الکتریکی دسترسی ندارند، استفاده از سوخت‌های فسیلی و پمپ‌های دیزلی رواج دارد که علاوه بر هزینه، مشکلات زیست محیطی را نیز به همراه دارند.

در مطالعه‌ای که در زمینه کاربرد پمپ‌های خورشیدی در ایران در منطقه حفاظت‌شده تنگ صیاد (۲۰ کیلومتری شهر کرد) انجام شده، هزینه یک دوره بهره‌برداری (بدون احتساب تورم) از سه منبع

تولید انرژی شامل استفاده از سوخت فسیلی، استفاده از شبکه برق سراسری و احداث نیروگاه خورشیدی مقایسه شد. بر اساس نتایج بررسی، احداث نیروگاه خورشیدی به دلیل هزینه بهره‌برداری کمتر در مقایسه با دو منبع انرژی دیگر و عدم ایجاد آلودگی در محیط به عنوان مناسب‌ترین گزینه برای تامین انرژی مورد نیاز منطقه انتخاب شد (سخانی، ۱۳۸۴). در پژوهشی دیگر در ایران، از مبنای الگوی خود رگرسیون ساختاری (SVAR^۱) برای تحلیل تاثیر افزایش سهم منابع انرژی تجدیدپذیر در تولید انرژی الکتریسته بر روی تولید ناخالص داخلی و انتشار گازهای گلخانه‌ای استفاده شده است. نتایج حاکی از این است که بروز شوکی مثبت در مصرف انرژی تجدیدپذیر، منجر به افزایش رشد اقتصادی و کاهش انتشار CO₂ می‌شود. بنابراین، با توجه به مزیت‌های انرژی‌های تجدیدپذیر، توصیه شده است که سهم این نوع انرژی از کل انرژی تولیدی کشور افزایش یابد (صادقی و همکاران، ۱۳۹۶). قائمی راد و شاهین (۱۳۹۵) در تحلیل SWOT از فناوری انرژی خورشیدی در ایران نتایجی را ارائه دادند که به نظر می‌رسد در مورد آبیاری خورشیدی نیز صادق است. طبق این تحقیق، از نقاط قوت می‌توان به وجود پتانسیل بالای انرژی خورشیدی در ایران و فناوری مناسب برای مناطق دورافتاده و ناهموار؛ از نقاط ضعف می‌توان به بالا بودن هزینه اولیه، فقدان سیاست‌های موثر و ارائه مشوق‌ها؛ از فرصت‌ها می‌توان به ورود و توسعه بخش خصوصی و گام برداشتن در جهت توسعه اقتصادی و توسعه پایدار و از تهدیدها می‌توان به ارزان بودن سوخت‌های فسیلی و حامل‌های انرژی و عدم آگاهی اجتماعی اشاره کرد. با وجود تحقیقات زیادی که در دنیا در خصوص آبیاری خورشیدی صورت گرفته است، در ایران خلاء زیادی در این زمینه وجود دارد و بر خلاف نیاز شدید ما به حفظ و توسعه منابع آب و انرژی، همچنان مصرف زیاد و بی‌رویه انرژی در ایستگاه‌های پمپاژ آب، هزینه‌های ریالی و محیط‌زیستی بالایی را به دولت، مردم

1. Structural Vector Autoregressive

و کشاورزان تحمیل می‌کند. مطالعه کاربرد پمپ‌های خورشیدی در ایران و ارائه روش‌های مناسب و علمی طراحی در این زمینه می‌تواند آغاز راه حل مناسبی برای استفاده از انرژی‌های پاک در این صنعت و کاهش هزینه‌ها در بخش کشاورزی باشد. با توجه به پیشینه استفاده از پمپ‌های خورشیدی در کشاورزی، بویژه در کشورهای در حال توسعه، این مطالعه در نظر دارد با طرح و نشان دادن قابلیت‌ها و الزامات استفاده از آبیاری خورشیدی^۱ در شرایط ایران و تقویت ایده استفاده از این پمپ‌ها در کشاورزی، گامی رو به جلو در استفاده بهینه از آب و تامین انرژی بردارد.

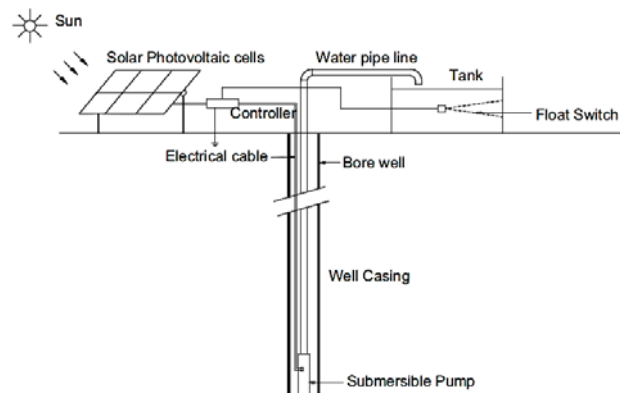
در این تحقیق، چگونگی طراحی، الزامات و کاربرد سیستم فتولتائیک در سیستم‌های آبیاری تحت فشار نشان داده شده و مقایسه اقتصادی بین کاربرد سیستم‌های خورشیدی، دیزلی و برقی (با شرایط گوناگون) برای ۵ هکتار باغ انگور (مقیاس کوچک) انجام شده است. منطقه مورد مطالعه، شهرستان کاشمر در استان خراسان است که در عرض جغرافیایی ۳۵°۱۴ شمالی و ۵۸°۲۸ طول شرقی قرار دارد. ارتفاع این شهر از سطح دریا ۱۰۵۲ متر است و یکی از محصولات عمده آن انگور است که در نواحی معتدل کشت می‌شود. این منطقه که به عنوان مورد کاوی تحقیق حاضر انتخاب شده است، همانند اکثر مناطق ایران از تابش نسبتاً بالایی برخوردار است و مستعد استفاده از انرژی خورشیدی برای آبیاری تحت فشار در باغ‌هاست.

۳. روش‌شناسی پژوهش

معیارهای طراحی آبیاری خورشیدی

هدف این بخش، ارائه نحوه تطبیق نیازهای یک سیستم آبیاری تحت فشار با یک پمپ خورشیدی مناسب است، به نحوی که دبی و فشار لازم برای سیستم آبیاری توسط یک پمپ خورشیدی با ابعاد و میزان توان مصرفی متناسب تامین شود. بنابراین، اطلاعات کافی از طراحی شبکه آبیاری مورد نظر، نیاز آبی گیاهان و همچنین اطلاعات مربوط به قسمت‌های مختلف یک سیستم پمپاژ خورشیدی و ارتباط

آن با اهداف شبکه آبیاری ضرورت دارد. با اینکه هدف این تحقیق به مسائل فنی در خصوص اجزای یک سیستم پمپاژ خورشیدی معطوف نیست، مختصری از اصول فنی و ساختار این سیستم‌ها در ادامه آمده است. طبق شکل (۱) سیستم پمپاژ خورشیدی متشکل از پنج قسمت عمده است: صفحات خورشیدی الکتریکی، پمپ، کنترل‌کننده پمپ، مخزن ذخیره و کلیدهای قطع و وصل. در صورت استفاده از باتری، استفاده از شارژر کنترلر و یا اگر برای راه اندازی پمپ نیاز به جریان متناوب باشد، استفاده از اینورتر نیز پیشنهاد می‌شود. (Vick and Nolan, 2009)



شکل ۱. تصویر شماتیک از سیستم پمپاژ خورشیدی (Meah et al., 2008)

قیمت بالای ابزار لازم، باعث شده است محاسبات مربوط به ابعاد تجهیزات فتوولتائیک به صورت دقیق و قبل از مطالعه در مورد اجرای سیستم انجام شود. به عبارت دیگر، انرژی مورد نیاز یک سیستم برای تعیین ابعاد تجهیزات فتوولتائیک در مرحله اول باید محاسبه و توجه‌پذیری سیستم از نظر اقتصادی در کوتاهترین زمان ممکن مطالعه شود. سیستم‌های آبیاری تحت فشار خصوصاً آبیاری موضعی برای کاربرد سیستم‌های فتوولتائیک مناسب‌ترین گزینه است. مراحل اولیه طراحی سیستم پمپاژ آب فتوولتائیک شامل تعیین نیاز آبی با توجه به نوع و بافت خاک و اقلیم منطقه، تحلیل

هیدرولیکی سیستم پمپاژ بر اساس هد مورد نیاز برای تثبیت فشار آب در شبکه توزیع و تعیین حداکثر توان فتولتائیک مورد نیاز برای آبیاری (با توجه به محاسبات عملکرد کلی سیستم پمپاژ خورشیدی) است. (Cuadros et al., 2004)

برآورد آب مورد نیاز

مهم ترین متغیر برای طراحی سیستم آبیاری برای گیاه خاص در یک رژیم آب و هوایی مشخص، پارامتر تبخیر و تعرق است. محاسبه تبخیر و تعرق اولین مرحله برای تعیین نیاز آبی گیاه است. به مجموع آب مصرفی توسط گیاه از طریق تعرق و تبخیر از طریق خاک، تبخیر و تعرق (ET) گفته می شود. روش رایج برای محاسبه ET، روش پیشنهادی سازمان خواروبار جهانی است. پارامترهای مورد نیاز در محاسبه تبخیر و تعرق گیاه در رابطه (۱) آمده است:

$$ET = ET_0 \cdot K_c \cdot K_r \quad (1)$$

در این رابطه، ET_0 تبخیر و تعرق گیاه مرجع بر حسب میلیمتر در ماه است. این پارامتر به اقلیم منطقه مورد نظر وابسته است. K_c ضریب مشخصه گیاهی است که وابسته به ویژگی ها و نوع گیاه است. K_r ضریب رشد نامیده می شود و با توجه به درصد سایه انداز گیاه محاسبه می شود. پارامتر ET_0 با نرم افزار Crop Wat 7 و مبتنی بر رابطه فائو- پنمن ماتیس محاسبه شده است.

معمولا در اولین گام برای برنامه ریزی آبیاری، اختلاف تبخیر و تعرق و باران موثر محاسبه می شود. این اختلاف برای یک دوره زمانی (معمولا یک ماه) که بیشترین تبخیر و تعرق و کمترین باران موثر را دارد، محاسبه می شود. سپس نیاز آبی خالص گیاه از رابطه (۲) به دست می آید:

$$NIR = ET - R_e + LR \quad (2)$$

که در آن، R_e باران موثر و LR مقدار آبشویی است که به علت مقادیر ناچیز از آنها صرف‌نظر می‌شود. نیاز آبی خالص (NIR) بر حسب میلیمتر در روز محاسبه می‌شود. نیاز آبی ناخالص (GIR) در طرح آبیاری قطره‌ای با احتساب راندمان کاربرد کلی (η_s) از رابطه (۳) بدست می‌آید:

$$GIR = \frac{NIR}{\eta_s} \quad (3)$$

مقدار پیشنهاد شده برای η_s توسط آرویزا (۱۹۹۶) برای آبیاری قطره‌ای، ۸۰ الی ۸۵ درصد است. میانگین داده‌های هواشناسی درازمدت از پایگاه‌های معتبر هواشناسی دریافت گردید و توان روزانه تابش خورشیدی در طول دوره رشد گیاه انگور در منطقه طرح محاسبه شد (جدول ۱). تبخیر و تعرق، نیاز خالص آبیاری و مقدار باران موثر در طول دوره رشد گیاه انگور مطابق جدول (۲) از نرم‌افزار Netwat استخراج شد. در طراحی متداول در کشور، طراحی سیستم آبیاری بر اساس حداکثر نیاز آبی صورت می‌گیرد و در بقیه زمانها، آبیاری با توجه به شرایط مزرعه و گیاه برنامه‌ریزی می‌شود.

جدول ۱. پارامترهای اقلیمی شهرستان کاشمر

ماه	حداقل دم (°C)	حداکثر دم (°C)	رطوبت (%)	سرعت باد (km/day)	ساعات آفتابی (Hr)	تابش (MJ/m ² /day)	ET ₀ (mm/day)
اردیبهشت	۱۶/۶	۲۹/۱	۳۱/۰	۱۵۵/۵	۹/۷	۲۲/۴	۵/۳
خرداد	۲۱/۵	۳۴/۸	۲۴/۰	۱۸۱/۴	۱۰/۳	۲۴/۸	۷/۰
تیر	۲۳/۱	۳۶/۶	۲۲/۰	۱۹۷/۷	۱۱/۶	۲۷/۲	۸/۱
مرداد	۲۰/۹	۳۵/۴	۲۲/۰	۱۸۱/۴	۱۱/۵	۲۶/۷	۷/۶
شهریور	۱۷/۱	۳۱/۵	۲۴/۰	۱۴۶/۹	۱۰/۰	۲۳/۳	۶/۱

مأخذ: اداره هواشناسی کشور

جدول ۲. محاسبه نیاز آبی برای درختان انگور در منطقه مورد نظر

ماه	تبخیر و تعرق روزانه (mm/day)	باران مؤثر (mm)	نیاز خالص گیاه (mm/day)	دور آبیاری (day)	نیاز خالص (mm)	نیاز ناخالص آبیاری (mm)	حجم آبیاری (m ³)	زمان آبیاری (hour)
اردیبهشت	۱/۹	۰/۲	۰/۹	۲/۰	۱/۶	۱/۹	۱۴/۱	۱/۵
خرداد	۵/۷	۰/۰	۲/۹	۲/۰	۵/۸	۶/۹	۵۱/۵	۴/۵
تیر	۷/۲	۰/۰	۳/۶	۲/۰	۷/۳	۸/۶	۶۴/۲	۵/۵
مرداد	۶/۳	۰/۰	۳/۲	۲/۰	۶/۴	۷/۵	۵۶/۲	۵/۰
شهریور	۲/۷	۰/۰	۱/۴	۲/۰	۲/۸	۳/۳	۲۴/۴	۲/۰

طبق جدول (۱)، مقدار ET_0 برای درخت انگور در تیر ماه $۸/۱$ میلیمتر در روز است. در این ماه، مقادیر K_c و K_r در این منطقه به ترتیب $۰/۸۷$ و $۰/۵$ هستند. بدین ترتیب، حداکثر تبخیر و تعرق روزانه گیاه $۳/۵$ میلیمتر محاسبه می‌شود. با احتساب راندمان کاربرد ۸۵ درصد، مقدار نیاز آبی ناخالص $۴/۱$ میلیمتر در روز و با در نظر گرفتن فواصل $۳ \times ۲/۵$ متر برای کاشت درختان، اوج نیاز آبیاری انگور در طول فصل رشد ۳۱ لیتر در روز برای هر درخت برآورد شده است. بنابراین برای هر درخت ۳ قطره‌چکان با دبی ۴ lit/h پیشنهاد می‌شود و زمان لازم برای آبیاری هر بخش از باغ $۲/۵$ ساعت است. در این طرح، برای برنامه‌ریزی آبیاری به دو صورت می‌توان زمین را تقسیم‌بندی کرد: ۱- باغ به هشت بخش تقسیم شود و در این صورت، ۲۰ ساعت برای آبیاری تمام باغ لازم است و دبی لازم برای آبیاری $۰/۵۷ \text{ lit/s.ha}$ خواهد بود. در این حالت، اندازه پمپ و اتصالات کوچکتر خواهد شد، اما برای ذخیره انرژی خورشیدی و استفاده از آن در ساعات غیرآفتابی باید از باتری برای ذخیره انرژی استفاده کرد که دارای هزینه بالا و طول عمری کوتاه‌تر از سایر اجزای فتوولتائیک است. ۲- باغ به چهار بخش آبیاری تقسیم شود که در این صورت، ۱۰ ساعت برای آبیاری تمام باغ لازم است. در این صورت،

دبی لازم برای آبیاری ۱/۱ lit/s.ha به دست می‌آید. در نتیجه، برنامه را می‌توان به صورتی تنظیم کرد که به وسیله پمپی بزرگتر از پمپ روش اول، کل آبیاری در ساعات روز صورت پذیرد. این طرح برای اجرای آبیاری خورشیدی منطقی‌تر به نظر می‌رسد. بر این اساس، خط لوله اصلی با قطر ۹۰ میلی‌متر و خط لوله جانبی با قطر ۱۲ میلی‌متر انتخاب شده است. محاسبات طراحی خطوط لترال، مانیفولد و اصلی به ترتیب در جداول (۳) تا (۵) آمده است. بدیهی است که طراح با توجه به شرایط خاص بهره‌برداری در هر منطقه می‌تواند برنامه‌ریزی‌های مختلفی برای آبیاری ارائه دهد.

جدول ۳. مشخصات طراحی خطوط لترال (جانبی) باغ انگور

طول (m)	Pe (m)	تعداد خروجی	دبی (l/s)	f	افت مجاز (m)	افت (m)	قطر (mm)	سرعت (m/s)	شیب (m/m)	فشار ورودی (m)
۶۰	۱۲	۲۴	۰/۰۸	۰/۳۷	۱/۳	۰/۴	۱۶	۰/۵	۰/۰۰	۱۲/۳

جدول ۴. مشخصات طراحی هر یک از خطوط مانیفولد (M8 تا M1) باغ انگور

طول (m)	شیب (m/m)	تعداد لترال	f	دبی (lit/s)	افت مجاز (m)	افت (m)	سرعت (m/s)	قطر (mm)	قطر داخلی (mm)	فشار ابتدا (m)
۱۰۲	۰/۰۰	۳۵	۰/۳۶	۲/۸۰	۰/۶	۰/۲	۰/۵۶	۹۰	۷۹/۷۴	۱۲/۴۵

جدول ۵. مشخصات طراحی خطوط اصلی باغ انگور

نام	طول (m)	قطر (mm)	قطر داخلی (mm)	دبی (l/s)	سرعت (m/s)	شیب (m/m)	افت (m)	فشار ابتدا (m)	فشار انتها (m)
S-P	۶۰	۹۰	۷۹/۷۴	۵/۶۰	۱/۱۲	۰/۰۰	۱/۰۲	۱۶/۹۷	۱۵/۹۵
S-S ₁	۲۰۵	۹۰	۷۹/۷۴	۵/۶۰	۱/۱۲	۰/۰۰	۳/۵۰	۱۵/۹۵	۱۲/۴۵

تعیین توان مورد نیاز سیستم فتوولتائیک

برای تعیین حداکثر توان مورد نیاز سیستم فتوولتائیک باید تعداد ساعات آبیاری در ماه‌های مختلف سال در نظر گرفته شود و سپس حداکثر توان بدست آمده برای طراحی استفاده شود. در این مطالعه، بر اساس اصول طراحی آبیاری قطره‌ای هد کل پمپاژ ۲۸ متر و دبی لازم برای آبیاری ۵ هکتار باغ ۵/۵lit/s به دست آمده است. آب توسط پمپ‌های خورشیدی از منبع سطحی (استخر) پمپاژ می‌شود. موتور بر اساس نیرو، توان و جریان مورد نیاز انتخاب می‌شود. اگر از موتور AC استفاده شود، ضروری است که یک مبدل DC به AC نصب شود. انرژی هیدرولیکی روزانه (E_H) به دبی و هد پمپاژ وابسته است و از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$E_H = \frac{\rho \cdot g \cdot Q \cdot H}{3600} \quad (۴)$$

E_H بر حسب W.h/day، ρ چگالی آب برابر با 1000 kg/m^3 ، g شتاب گرانش برابر با 9.81 m/s^2 ، Q دبی کل جریان روزانه، H هد کل پمپاژ است. منظور از تقاضا در یک سیستم پمپاژ تامین ارتفاع و حجم آب مورد نیاز در واحد زمان است. واحد این اندازه گیری m^3/day است. با جایگذاری مقادیر ثابت در رابطه (۴)، رابطه زیر به دست می‌آید:

$$E_H = 2.725 \times 10^{-3} \cdot QH \text{ kw.h/day} \quad (۵)$$

با جایگذاری دبی و هد پمپاژ در رابطه (۵) انرژی هیدرولیکی محاسبه می‌شود. با در نظر گرفتن افت انرژی ناشی از اصطکاک آب در سیستم آبیاری، زمان‌هایی از روز که تابش خورشیدی بالای آستانه مورد نیاز برای شروع به کار پمپ است ($G_d > G_{\text{threshold}}$)، بازده مولد برق فتوولتائیک (μ_G)، بازده مبدل AC به DC (μ_I)، بازده پمپ (μ_{MB}) و حداکثر انرژی مورد نیاز از ژنراتور فتوولتائیک (E_{el}) از رابطه (۶) به دست می‌آید:

$$E_{el} = \frac{(E_H + R)}{(G_d (> G_{\text{threshold}}) \cdot \mu_G \cdot \mu_I \cdot \mu_{MB})} \quad (۶)$$

مقدار بهینه قابل قبول برای R حدود ۱۰ درصد از EH است. لورنزو (۱۹۹۴) مقادیر $G_d=0.95$ ، $\mu I=0.9$ ، $\mu MB=0.43$ را برای رابطه (۶) پیشنهاد داده است. در نتیجه، مقادیر داده شده بیشترین بازده اتصال پمپ و ژنراتور که مقدار آن $\mu=31.26\%$ است، حاصل می‌شود. توان ژنراتور خورشیدی (P_{el}) از رابطه زیر به دست می‌آید: (Lorenzo et al., 1994)

$$P_{el} = \frac{E_{el}}{h} \quad (7)$$

در این رابطه، P_{el} توان ژنراتور خورشیدی، E_{el} انرژی الکتریکی مورد نیاز بر حسب (kWh) و h تعداد ساعات آفتابی مؤثر در روز (تعداد ساعات بالای استاندارد سطح تابش 1000 W/m^2 در طول روز) است که مقدار آن برابر است با متوسط مقدار آهنگ انرژی روزانه در منطقه مورد نظر (بر حسب kWh/m^2). در نهایت، باید توان از دست‌رفته در زمان کار صفحات خورشیدی در دمای بالاتر از ۲۵ درجه سانتیگراد محاسبه شود. این مقدار تقریباً ۱۰ درصد توان الکتریکی مورد نیاز در نظر گرفته شده است. بنابراین، حداکثر توان فتوولتائیک مورد نیاز از رابطه (۸) به دست می‌آید:

$$P = P_{el} \cdot (1 + 0.1) \quad (8)$$

هد مورد نیاز در هر ماه ثابت، و دبی روزانه به علت تغییر در تعداد ساعات آبیاری متغیر است. بیشترین دبی مورد نیاز در تیرماه و معادل $221/76 \text{ m}^3/\text{day}$ به دست آمده است. انرژی هیدرولیکی مورد نیاز $16/92 \text{ kWh/day}$ است و با در نظر گرفتن ۱۰ درصد انرژی هیدرولیکی برای افت انرژی ناشی از اصطکاک در سیستم آبیاری، ضریب $G_d=0.95$ برای زمان‌هایی از روز که تابش خورشیدی بالای آستانه مورد نیاز برای شروع کار پمپ است، بازده $0/85$ برای مولد برق فتوولتائیک و بازده ۵۰ درصد برای پمپ، حداکثر انرژی مورد نیاز ژنراتور فتوولتائیک $46/1 \text{ kWh/day}$ است. با در نظر گرفتن ۱۰ درصد توان از دست‌رفته در زمان کار صفحات خورشیدی در دمای بالاتر از ۲۵ درجه

سانتیگراد و با در نظر گرفتن ۷ ساعت آفتابی موثر، حداکثر توان فتوولتائیک (P) مورد نیاز به صورت نظری $7/2 \text{ kW p}$ محاسبه می شود.

با توجه به حجم آبی که باید پمپاژ شود، فشار مورد نیاز با احتساب تلفات هد در مکش، خطوط تحویل و مونتاژ میکرو فیلتر و راندمان اجزایی مانند موتور و پمپ، پمپ خورشیدی مورد استفاده پمپ سطحی DC (مدل PS4000 CS-F16-3) انتخاب شد. این پمپ قادر است با مصرف توان ۳ کیلووات، هد و دبی مورد نیاز را تامین نماید. برای تامین توان مورد نیاز پمپ در ساعاتی که کمترین تابش مفید موجود است باید پنل های خورشیدی به گونه ای در کنار یکدیگر سری و موازی شوند که بتوانند ولتاژ و جریان مورد نیاز پمپ و در نتیجه، توان حداکثر توان فتوولتائیک $7/2 \text{ kW p}$ در ساعات با حداکثر تابش را تولید نمایند. بدین منظور، از ۹۰ پنل LC150-P36 (ساخت لورنتر آلمان) استفاده شده است. در این طرح، هر سه پنل سری شده و سپس این سری ها با یکدیگر موازی می شوند. با در نظر گرفتن تاثیر شرایط محیطی و تلفات بر روی راندمان پنل ها، حداکثر توان تولیدی هر پنل $80/5$ وات محاسبه می شود. بهترین جهت شیب آرایه های خورشیدی نیز از رابطه (۹) تعیین می شود.

(Kaldellis and Zafirakis, 2012)

$$\varphi = 90 - \text{latitude} \quad (9)$$

که در آن، φ بهترین زاویه ثابت پنل در طول فصول سال و latitude عرض جغرافیایی (بر حسب درجه) است.

۴. نتایج و بحث

تحلیل اقتصادی

معمولاً در تحلیل اقتصادی دو نوع هزینه برای پروژه تعریف می‌شود: هزینه‌های ثابت و هزینه‌های متغیر (جاری). در بعضی از سیستم‌های انرژی هزینه اولیه زیاد است، به طوری که به نظر می‌رسد استفاده از سیستم مقرون به صرفه نباشد در حالی که هزینه‌های متغیر این سیستم پایین است و بعد از چند سال این سیستم قابل رقابت با دیگر سیستم‌های انرژی خواهد بود. در کنار رشد فناوری و روش‌های بهینه طراحی، اولین ضرورت برای گسترش فناوری، امکان اجرای آن از نظر اقتصادی است. در این زمینه، گزارش‌هایی در رابطه با عملکرد اقتصادی پمپ‌های فتوولتائیک ارائه شده است. به طور کلی، برای مقایسه اقتصادی سیستم‌های پمپاژ مختلف باید تمام هزینه‌ها و درآمدهای ناشی از آنها بررسی شوند. این هزینه‌ها عبارتند از هزینه اولیه (شامل خرید تجهیزات و پمپ، هزینه طراحی، هزینه نصب و راه‌اندازی و ساخت ساختمان)، هزینه سوخت مصرفی و حمل و نقل آن در صورت نیاز، هزینه تعمیر و نگهداری و بهره‌برداری از سیستم و در نهایت، ارزش اسقاطی. در این پژوهش، مطالعه اقتصادی سه نوع پمپ دیزلی، برقی و خورشیدی برای آبیاری ۵ هکتار باغ انگور (مقیاس کوچک) انجام شده است. مشخصات کلی پمپ‌های دیزلی و برقی برای راه‌اندازی این سیستم آبیاری به این شرح است: پمپ دیزلی RobinPKX320,3 in و پمپ برقی WkL50. این پمپ‌ها قادرند با مصرف توان ۳ تا ۴ کیلووات، دبی ۵/۵ لیتر بر ثانیه و هد ۲۸ متر را برای سیستم تحت فشار تامین نمایند.

تحلیل اقتصادی کاربرد پمپ‌های خورشیدی، برقی و دیزلی با رویکرد LCC

روش LCC (Life Cycle Cost) یکی از کاملترین روش‌های تحلیل اقتصادی است که کل هزینه‌های اولیه، شامل تجهیزات و نصب (TCap) و همچنین هزینه‌های مربوط به تعمیرات و

نگهداری و هزینه‌های سالانه (TRC) در طول عمر سیستم را با توجه به ارزش فعلی پول محاسبه می‌کند. پارامترهایی که در این تحلیل به کار می‌روند، به شرح زیر هستند: (عامری و همکاران، ۱۳۸۴)

TCap: هزینه‌های اولیه شامل تجهیزات و نصب؛ TRC: هزینه‌های مربوط به تعمیرات و نگهداری؛ TW1 کل هزینه‌های سالانه؛ TPW: کل هزینه‌های یکبار پرداختی (تعویض قطعات)؛ Ca: هزینه سالانه؛ Cr: هزینه یکبار پرداخت؛ Pa: ضریب پرداخت سالانه؛ Pr: ضریب یکبار پرداخت؛ b: نرخ تورم؛ T: نرخ بهره بانکی؛ n: تعداد سال‌های مورد محاسبه.

$$LCC = T_{RC} + T_{Cap} \quad (10)$$

که در آن،

$$T_{RC} = T_{W1} + T_{PW} \quad (11)$$

$$P_W = P_r \times C_r \quad (12)$$

$$P_r = \left(\frac{1+b}{1+r} \right)^n \quad (13)$$

$$T_{W1} = P_a \times C_a \quad (14)$$

$$P_a = \frac{1+b}{1-b} \left[1 - \left(\frac{1+b}{1+r} \right)^n \right] \quad (15)$$

در تحلیل اقتصادی انجام‌شده، عمر پروژه ۲۰ سال منظور شده که معادل عمر مفید آرایه‌های فتوولتائیک است. محاسبات نیز براساس نرخ تورم ۱۷ درصد و نرخ بهره ۱۳ درصد است (شاخص‌های عمده اقتصادی، ۱۳۸۲). انتخاب پارامترهایی مانند نرخ بهره یا تورم به زمانی که طرح مورد نظر طراحی می‌شود، بستگی دارد و البته به پیش‌بینی از وضعیت بازار و ارز و... وابسته است. اعدادی که در این تحقیق به کار رفته‌اند، طبق اعداد متداول در پروژه‌های آبیاری در سال‌های اخیر انتخاب شده‌اند. از آنجا که تاکید این تحقیق بیشتر بر ارائه روش‌شناسی بوده است، هر مقدار عددی دیگری که توسط طراح مناسب تشخیص داده شود و منطقی باشد، می‌تواند در محاسبات به کار

رود. بدیهی است که مقدار عددی این پارامترها در توجیه اقتصادی بودن یا نبودن طرح موثر است. پارامترهای دیگر به تفکیک نوع انرژی مصرفی پمپ به شرح زیر است:

هزینه‌های مربوط به پمپ‌های برقی

$$T_{Cap} = \text{هزینه‌های (انشعاب + موتورالکتروپمپ + تابلوی برق + کابل کشی)}$$

$$\text{هزینه‌های مربوط به کابل کشی} = \text{مسافت (km)} \times \text{هزینه کلی یک کیلومتر کابل کشی}$$

$$T_{RC} = \text{هزینه‌های (نگهداری و تعمیرات سالانه + مصرف سوخت نیروگاه + تلفات خطوط انتقال + مصرف سالانه برق)}$$

$$\text{هزینه تلفات} = \text{هزینه مصرف سالانه} \times 2 \text{ درصد}$$

$$\text{هزینه مصرف سوخت نیروگاه} = \text{توان مورد نظر بر حسب kWh} \times \text{هزینه متوسط برای هر kWh}$$

$$\text{هزینه تعمیرات} = \text{هزینه مصرف سوخت کارخانه} \times 0.08$$

منظور از مسافت، فاصله نسبت به خطوط اصلی انشعاب است.

هزینه‌های مربوط به پمپ‌های دیزلی

$$T_{Cap} = \text{هزینه‌های (پمپ دیزلی + ساخت محل نصب + انتقال مربوط به نصب)}$$

$$\text{هزینه انتقال مربوط به نصب} = (\text{هزینه مربوط به پمپ دیزلی} + \text{هزینه ساخت محل نصب}) \times 0.1$$

$$T_{RC} = \text{هزینه‌های (تعمیرات کلی بعد از ۱۰ سال + مصرف سوخت + روغن کاری)}$$

$$\text{هزینه تعمیرات کلی} = \text{هزینه معادل پمپ دیزلی بعد از ۱۰ سال}$$

هزینه‌های مربوط به پمپ‌های خورشیدی

$$T_{Cap} = \text{هزینه‌های (الکتروموتورپمپ + دنبال کننده + مجموعه خورشیدی + شارژ کنترلر + باتری}$$

+ کنترلر + نصب)

$$\text{هزینه مجموعه خورشیدی} = \text{کل هزینه‌های مربوط به پنل ها} \times 1.06$$

$$\text{هزینه نصب} = \text{کل هزینه‌های مربوط به تجهیزات} \times 0.1$$

$$T_{RC} = \text{هزینه‌های (هر ۶ سال تعویض باتری + بازرسی از محل)}$$

در این طرح، به دلیل اینکه کوچک مقیاس است، از اجزای جانبی مانند دنبال کننده، شارژ کنترلر و باتری استفاده نشده است، اما این موارد در هر طرحی قابل بررسی اند و حتی در طرح هایی با مقیاس های بزرگ، استفاده از آنها لازم است. گفتنی است که پمپ های برقی، دیزلی و خورشیدی انتخاب شده در طرح، از نوع مرغوب موجود در بازارند که در شرایط استفاده بهینه، دارای عمر مفید بالایی هستند. بنابراین، در دوره آماری ۲۰ ساله، تعویضی برای پمپ های برقی و خورشیدی در نظر گرفته نشده است. عمر مفید ۲۵ ساله برای طراحی پمپ های خورشیدی مناسب است. با در نظر گرفتن هزینه تعمیرات و نگهداری سالانه، عمر مفید پمپ های برقی نیز افزایش می یابد. پمپ های دیزلی نیز معمولاً هر ۱۰ سال نیاز به تعویض دارند. البته در شرایطی که کارکرد پمپ ها بهینه نباشد و یا ساعات کاری افزایش یابد، این مدت ممکن است حتی به نصف کاهش یابد. برای تخمین هزینه های تعمیرات و نگهداری و یا زمان کارکرد موثر پمپ ها، مرجع و یا پایگاه داده خاصی در کشور وجود ندارد و برای لحاظ کردن آنها، بازدید از طرح های موجود و استفاده از تجربه بهره برداران بهترین روش است که در این تحقیق به کار رفت.

تحلیل هزینه سیستم های برقی، دیزلی و فتوولتائیک در طرح آبیاری

در این بخش، حالت های ممکن برای سیستم های مورد نظر بر اساس تحلیل LCC مقایسه و نتایج بدست آمده در جداول (۶) تا (۹) آمده است. با توجه به جداول، اگر در سیستم فتوولتائیک از تجهیزات جانبی مثل باتری و دنبال کننده استفاده نشود، با پمپ برقی رقابت خواهد کرد و اگر صرفاً بهره برداری مورد نظر باشد و در نتیجه، هزینه سوخت نیروگاه حذف شود، سیستم برقی و خورشیدی دارای هزینه های تقریباً یکسانی می شوند. در صورتی که توان مورد نیاز بیشتر از توان مورد مطالعه شود، سیستم خورشیدی با بالا رفتن فاصله محل انشعاب برق با سیستم برقی قابل رقابت است. در توان تقریبی ۳ کیلووات، هزینه سیستم دیزلی تقریباً ۵۰ درصد کمتر از سایر سیستم هاست. از آنجایی که نرخ تورم سوخت های فسیلی بسیار تحت تاثیر سیاست های داخلی و خارجی است، با بالا رفتن

نرخ تورم، سیستم‌های خورشیدی امکان رقابت با سیستم دیزلی را خواهند داشت. همچنین در مقدار توان‌های کمتر، امکان این رقابت وجود دارد. در هر صورت، اهمیت مسائل محیط‌زیستی و رو به اتمام بودن سوخت‌های فسیلی، مزیت عمده سیستم‌های خورشیدی نسبت به دیزلی است.

جدول ۶. قیمت واحد اجزای سیستم برقی (ریال)

کابل کشی در هر کیلومتر	تابلو برق	موتور الکترومپ	انشعاب ۳ فاز ۱۵ آمپر
۵۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۰۰,۰۰۰,۰۰۰	۱۱,۰۰۰,۰۰۰	۱۸,۲۶۰,۰۰۰

جدول ۷. قیمت اجزای سیستم دیزلی (ریال)

قیمت هر لیتر گازوئیل	هزینه ساخت محل نصب	قیمت پمپ دیزلی
۵,۰۰۰	۸,۰۰۰,۰۰۰	۵۰,۰۰۰,۰۰۰

جدول ۸. قیمت اجزای اصلی سیستم فتوولتائیک (ریال)

پنل ۱۵۰ وات	الکترو موتور پمپ
۶,۰۰۰,۰۰۰	۲۸۷,۱۰۰,۰۰۰

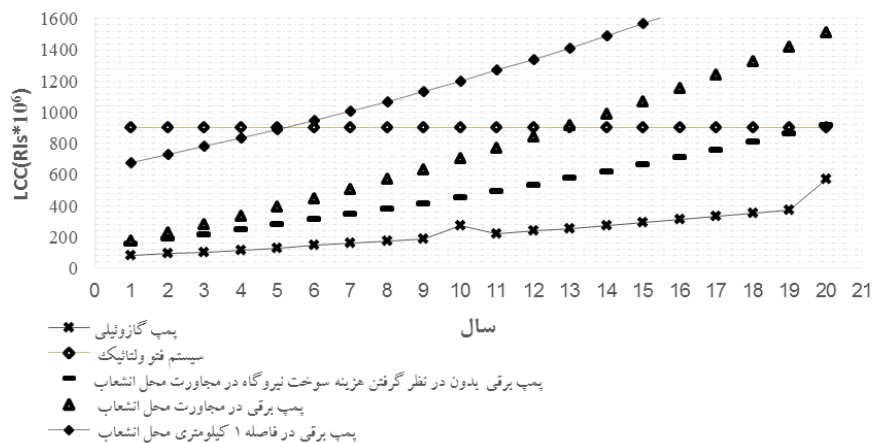
جدول ۹. مقایسه قیمت تمام‌شده سیستم‌های برقی، خورشیدی و دیزلی در حالت‌های مختلف

شرح سیستم	Tcap (10 ⁶ Rls)	TRe (10 ⁶ Rls)	LCC (10 ⁶ Rls)
سیستم فتوولتائیک بدون دنبال‌کننده و باتری	۹۰۲	۰	۹۰۲
پمپ برقی در مجاورت محل انشعاب	۱۲۹,۲۶	۱,۳۸۰	۱,۵۱
پمپ برقی بدون در نظر گرفتن هزینه سوخت نیروگاه در مجاورت محل انشعاب	۱۲۹	۷۸۴	۹۱۳
پمپ برقی در فاصله ۱ کیلومتری	۶۲۹,۲۶	۱,۳۸	۲,۰۱
پمپ گازوئیلی	۶۹	۵۰۱	۵۷۰

با توجه به شکل (۲)، هزینه پمپ برقی در مجاورت محل انشعاب در سال سیزدهم و پمپ برقی در فاصله یک کیلومتری از انشعاب در سال پنجم با هزینه سیستم فتوولتائیک برابر خواهند شد و

سپس هزینه تمام شده آنها پس از این سال‌ها بیشتر از سیستم فتوولتائیک خواهد شد. همچنین استفاده از سیستم فتوولتائیک نسبت به پمپ برقی بدون در نظر گرفتن هزینه سوخت نیروگاه پس از گذشت ۲۰ سال توجیه اقتصادی خواهد داشت.

عامری، مجد و نوروزی (۱۳۸۴)، کاربرد پمپ‌های خورشیدی در استان کرمان برای توان‌های مصرفی مختلف برای پمپاژ آب را مورد بررسی دادند و نتایج نشان داد پمپ‌های PV برای توان‌های پایین تا حدی با پمپ‌های دیزلی قابل رقابت هستند، اما در توان‌های بالاتر از ۲ kW دیگر قابل مقایسه نیستند. همچنین برای توان‌های بالا و فواصل کم نسبت به پمپ‌های برقی به صرفه نیستند. از آنجا که توان مصرفی پمپ در این تحقیق حدود ۳ کیلووات و حداقل توان فتوولتائیک مورد نیاز ۵/۵ kW و ۴/۵ است، نتایج بدست آمده با نتایج این محققان مطابقت دارد.



شکل ۲. نمودار LCC طی ۲۰ سال برای منابع مختلف انرژی پمپاژ آب در مورد کاوی تحقیق حاضر

۵. نتیجه‌گیری

به علت هزینه بالای سیستم‌های فتوولتائیک باید پیش از راه‌اندازی یک سایت آبیاری خورشیدی، اهداف طرح و بازده آن از جنبه‌های مختلف بررسی شود. مطالعه حاضر بر اساس اطلاعات منطقه کاشمر و محصول انگور در این منطقه است. برای طراحی آبیاری خورشیدی در دیگر مناطق باید بر اساس روندی که در این مقاله معرفی شده است، مطالعات دقیقی برای تعیین ضرایب گیاهی، ضریب رشد، نوع خاک و محصولات با بازدهی بالاتر با توجه به نوع منطقه، برنامه‌ریزی آبیاری، میزان انرژی مورد نیاز، امکان ذخیره انرژی استحصال شده و همچنین جزئیات طراحی سیستم فتوولتائیک صورت پذیرد. هدف نهایی از این طرح می‌تواند دسترسی به انرژی برای توسعه کشاورزی با بهره‌وری بالاتر آب، تولید ثروت در مناطق کمتر توسعه یافته، جلوگیری از فرسایش خاک، استفاده کمتر از سوخت‌های فسیلی و ایجاد فرصت برای کار و توسعه پایدار جمعیت روستایی باشد. از موارد موثر در تحلیل اقتصادی سیستم‌های آبیاری خورشیدی این است که می‌توان از توان اضافی تولیدشده در ماه‌هایی که به حداکثر توان فتوولتائیک نیازی نیست، برای مصارف دیگر استفاده نمود و یا در سیستم‌های متصل به شبکه، این توان اضافی را در اختیار شبکه برق‌رسانی قرار داد. همچنین اگر آرایه‌های خورشیدی به صورت متحرک نصب شوند، در فصلی که نیازی به آبیاری نیست می‌توانند برای مصارف دیگر جابجا شوند. در این صورت، بازگشت سرمایه در سال‌های کمتری اتفاق می‌افتد. عمر مفید آرایه‌های متحرک نیز نسبت به سیستم ثابت، به علت ایجاد شرایط نگهداری مطلوب‌تر و مصون ماندن از گزند شرایط آب و هوایی بیشتر است. با توجه به مطالعات انجام‌شده، پمپ دیزلی با نرخ تورم ۱۷ درصد برای سوخت، کم هزینه‌تر از سیستم خورشیدی است و با کاهش توان مورد نیاز یا افزایش نرخ تورم سوخت، سیستم خورشیدی مقرون به صرفه خواهد بود. همچنین اگر از تجهیزات جانبی مانند باتری در سیستم خورشیدی استفاده نشود

و برنامه آبیاری کلاً در ساعات روز باشد، باتری پمپ‌های خورشیدی با پمپ‌های برقی قابل رقابت هستند. در کلیه حالت‌ها با کاهش توان مورد نیاز، قابلیت رقابت سیستم خورشیدی با سایر سیستم‌ها بالاتر می‌رود. البته در نظر گرفتن مسائل زیست‌محیطی نیز در انتخاب نوع سیستم مهم است. باید به این نکته دقت داشت که محاسبات انجام شده در این تحقیق در حالی انجام گرفته که یارانه بالایی به بخش سوخت‌های فسیلی و همچنین انرژی الکتریکی (بویژه در بخش کشاورزی) در کشور تعلق دارد. حال اگر بخشی از این یارانه به انرژی‌های نو برسد، هزینه مربوط به پمپ‌های PV حتی در توان‌های بالا و فواصل کم، با هزینه‌ی مربوط به پمپ‌های دیزلی و برقی قابل رقابت است. بنابراین، با حمایت دولت و با توجه به مستعد بودن کشور ایران برای استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر می‌توان از پمپ‌های PV زیادی در مناطق مختلف ایران استفاده کرد. همچنین بالاتر رفتن نرخ‌های سود بانکی بر سرمایه‌گذاری‌های صورت گرفته برای اجرای سیستم‌های فتوولتائیک تاثیر نامطلوب خواهد داشت، چرا که درآمد ناشی از سود سپرده‌های بانکی ممکن است بیش از سود ناشی از سرمایه‌گذاری برای اجرای سیستم فتوولتائیک باشد. همچنین پایین بودن قیمت برق و سوخت در کشور باعث می‌شود سیستم فتوولتائیک از توجیه اقتصادی مطلوبی برخوردار نشود. از طرف دیگر، به علت اینکه بیشتر اجزای این سیستم‌ها وارداتی است و بشدت وابسته به قیمت ارز است، در نتیجه، نوسانات قیمت دلار بر وجود یا عدم وجود صرفه اقتصادی اجرای این سیستم‌ها موثر است. با این توصیف، ترویج استفاده از انرژی خورشیدی در آبیاری (بویژه در مناطق دورافتاده) و استفاده از این ظرفیت بزرگ در کشور، توجیه سیاست‌گذاران نسبت به مزایای بالقوه انرژی خورشیدی (در بخش کشاورزی) و استفاده وسیع از آن حتی در کشورهای در حال توسعه و توسعه‌نیافته، کاهش یارانه‌های فعلی کشاورزی در بخش انرژی، تشویق بخش خصوصی به سرمایه‌گذاری در پروژه‌های خورشیدی (مثل آبیاری تحت فشار و گلخانه‌ها و ...) می‌تواند به تامین انرژی طرح‌های پرشتاب

آبیاری تحت فشار کمک کند. بدیهی است که هرگونه سیاست‌گذاری کلان در این زمینه مستلزم مطالعات دقیق و درنظر گرفتن استثنائات است.

سیاست‌گذاری

این تحقیق حاصل بخشی از نتایج طرح پژوهشی به شماره ۸۷۰۴۱۰۴۴ است که از سوی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران ریاست جمهوری حمایت شده است. بدینوسیله نویسندگان مراتب قدردانی خود را از حمایت این طرح ابراز می‌دارند.

منابع

- سختی، مصطفی** (۱۳۸۴)، "ارزیابی کاربرد نیروگاه خورشیدی در پاسگاه‌های محیط‌بانی"، چهارمین همایش بین‌المللی بهینه‌سازی مصرف سوخت در ساختمان، تهران، سازمان بهینه‌سازی مصرف سوخت کشور. شاخص‌های عمده اقتصادی، (۱۳۸۲)، "نماگرهای اقتصادی، بانک مرکزی جمهوری اسلامی ایران"، شماره ۳۳، سه‌ماهه دوم ۱۳۸۲.
- صادقی، سیدکمال؛ سجودی، سکینه و فهیمه احمدزاده دلجوان** (۱۳۹۶)، "تاثیر انرژی‌های تجدیدپذیر بر رشد اقتصادی و کیفیت محیط زیست در ایران"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، شماره ۶، صص ۲۰۲-۱۷۱.
- عامری، مهران؛ مجد ثابتی، امیر مسعود و مریم نوروزی** (۱۳۸۴)، "امکان‌سنجی اقتصادی استفاده از پمپ‌های خورشیدی در استان کرمان"، سیزدهمین کنفرانس سالانه مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی اصفهان.
- قائم‌راد، مجتبی و آرش شاهین** (۱۳۹۵)، "تحلیل چشم‌انداز توسعه تکنولوژی‌های انرژی خورشیدی در ایران به روش تلفیقی از SWOT و DEMATL"، فصلنامه پژوهش‌های سیاستگذاری و برنامه‌ریزی انرژی، شماره ۵، صص ۱۳۰-۹۷.
- کمالی، غلامعلی و اسحق مرادی** (۱۳۸۴)، تابش خورشیدی، اصول و کاربردها در کشاورزی و انرژی‌های نو، نشر قرن ۲۱.
- Adnan, Z. A.** (2015), "Renewable Power Generation Costs In 2014", *International Renewable Energy Agency*, 75.
- Bassi, N.** (2017), "Solarizing Groundwater Irrigation in India: A Growing Debate", *International Journal of Water Resources Development*, Published Online, June 2017, pp. 1-15.
- Bassi, N.** (2016), Managing Groundwater Energy Nexus in India: The Curious Case of Using Solar Irrigation Pumps with Drip Systems. In P. K. Viswanathan, M. D. Kumar, & A. Narayanamoorthy (Eds.), *Micro Irrigation Systems in India: Emergence, Status and Impacts*, pp. 155-167 Singapore: Springer.
- Ben Ghanem Belgacem** (2012), "Performance of Submersible PV Water Pumping Systems in Tunisia", *Energy for Sustainable Development*, 16(4), pp. 415-420.
- BP Statistical Review of World Energy** (2013), www.bp.com.
- Cuadros, F; Lopez-Rodriguez, F; Marcos, A. and J. Coello** (2004), "A Procedure to Sized Solar-power Irrigation (Photo irrigation) Schemes", *Journal of solar energy*, 76, pp. 465-473.

- Eshraa N. M.** (2013), "Renewable Energy for Pump Stations Operation in Delta Region Using GIS Technique (Study Case: El_Menoufia Governorate)", *APCBEE Procedia*, 5, pp. 535-545.
- Gao, X; Liu, J; Zhang, J; Yan, J; Bao, S; Xu, H. and T. Qin** (2013), "Feasibility Evaluation of Solar Photovoltaic Pumping Irrigation System Based on Analysis of Dynamic Variation of Groundwater Table", *Applied Energy*, 105, pp. 182-193.
- Kaldellis, J. K; Meidanis, E. and D. Zafirakis** (2011), "Experimental Energy Analysis of a Stand-alone Photovoltaic-based Water Pumping Installation", *Applied Energy*, 88, pp. 4556-4562.
- Kaldellis J. and D. Zafirakis** (2012), "Experimental Investigation of the Optimum Photovoltaic Panels' Tilt Angle during the Summer Period", *Energy*, 38(1), pp. 305-314.
- Lorenzo, E. and G. Araujo** (1994), *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems*, Progensa, Spain.
- Meah, K; Fletcher S. And S. Ula** (2008), "Solar Photovoltaic Water Pumping for Remote Locations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12, pp. 472-487.
- Pande, P.C; Singh A.K; Ansari S; Vyas, S. K. and B. K. Dave** (2003), "Design Development and Testing of a Solar PV Pump Based Drip System for Orchards", *Renewable Energy*, 28, pp. 385-396.
- Relph, M. K.** (2014), "Solar Power's Low Cost to Farmers", *World Pumps*, 10, pp. 34- 35.
- Rockstro'm, J; Williams, J; Daily, G; Noble, A; Matthews, N; Gordon, L; Wetterstrand, H; DeClerck, F; Shah, M; Steduto, P; Fraiture, CH; Hatibu, N; Unver, O; Bird, J; Sibanda, L. and J. Smith** (2017), "Sustainable Intensification of Agriculture for Human Prosperity and Global Sustainability", *Ambio*. 46(1), pp. 4-17.
- Roy, A; Islam, W; Hasan, S. M. and S. M. Najmul Hoque** (2015), "Prospect of Solar Pumping in the Northern Area of Bangladesh", *American Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 1(4), pp. 172-179.
- Senol, R.** (2012), "An Analysis of Solar Energy and Irrigation Systems in Turkey", *Energy Policy*, 47, pp. 478-486.
- Vick, B. and R. Nolan Clark** (2009), "Determining the Optimum Solar Water Pumping System for Domestic Use, Livestock Watering or Irrigation", ASES National Solar Conference.
- Yu, Y; Liu, J; Wang, H. and Liu M.** (2012), "Assess the Potential of Solar Irrigation Systems for Sustaining Pasture Lands in Arid Regions: A Case Study in Northwestern China", *Applied Energy*, 88(9), pp. 3176-3182.