

## ارزیابی اقتصادی سیستم پمپاژ آب با تغذیه برق فتوولتائیک (PV) در مزارع تحت آبیاری قطره‌ای

مرتضی شجاعی<sup>۱</sup> و سمیرا اخوان<sup>۲\*</sup>

### چکیده

یکی از ملزومات آبیاری تحت فشار، تأمین انرژی برای پمپاژ آب است. تجدیدناپذیری و مضرات زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، استفاده از انرژی خورشیدی را اجتناب‌ناپذیر کرده است. سیستم فتوولتائیک، یکی از سیستم‌های خورشیدی به‌منظور تبدیل مستقیم انرژی خورشیدی به جریان الکتریسیته است. در این مطالعه به بررسی اقتصادی کاربرد پنل‌های خورشیدی در مقایسه با پمپ‌های برقی برای پمپاژ در شبکه‌های آبیاری قطره‌ای در ۹ باغ، شامل ۳ محصول پسته، بادام و گردو پرداخته شد. مقایسه‌ها در دو حالت با و بدون در نظر گرفتن فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، به روش ارزش فعلی هزینه‌های سرمایه‌گذاری در دو نرخ بهره‌ی ۵ و ۱۰٪ صورت گرفت. نتایج نشان داد که استفاده از پمپاژ فتوولتائیک بدون فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، تنها برای باغ پسته ۶۰ هکتاری با نرخ بهره‌ی ۱۰٪ اقتصادی است. در باغ متوسط گردو نیز با همین نرخ بهره، با وجود اختلاف ناچیز هزینه‌ی سرمایه‌گذاری (۰/۹۴٪) نسبت به پمپاژ برقی تفاوت چندانی ندارد. در حالت با فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، هرچه ابعاد مزرعه کوچک‌تر (ظرفیت و فشار کمتر) و فاصله از شبکه بیشتر باشد، پمپاژ فتوولتائیک اقتصادی‌تر بود. همچنین در فاصله‌ی ۰/۵ کیلومتری از شبکه‌ی توزیع، پمپاژ فتوولتائیک شبکه آبیاری باغ‌های کوچک و متوسط پسته و گردو در هر دو نرخ، اقتصادی است.

**واژه‌های کلیدی:** انرژی خورشیدی، آبیاری قطره‌ای، ارزش فعلی، سوخت‌های فسیلی.

ارجاع: شجاعی م. و اخوان س. ۱۳۹۹. ارزیابی اقتصادی سیستم پمپاژ آب با تغذیه برق فتوولتائیک (PV) در مزارع تحت آبیاری قطره‌ای. مجله پژوهش آب ایران. ۱۹-۲۸: ۳۶.

۱- دانش‌آموخته کارشناسی ارشد آبیاری و زهکشی، گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.

۲- استادیار گروه علوم و مهندسی آب، دانشکده کشاورزی، دانشگاه بوعلی سینا.

\* نویسنده مسئول: [sakhavan@basu.ac.ir](mailto:sakhavan@basu.ac.ir)

تاریخ پذیرش: 1397/10/23

تاریخ دریافت: 1397/02/25

## مقدمه

وابستگی شدید و نیاز فزاینده به منابع انرژی که به‌عنوان عامل اساسی توسعه و زیربنای اصلی فعالیت‌های اقتصادی محسوب می‌شود و همچنین محدودیت ذخایر نفتی، جهان را با مسئله‌ی پیچیده‌ی چگونگی تأمین انرژی مورد نیاز، مواجه ساخته است (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱)؛ چرا که این منابع، تجدیدنپذیر هستند و تکیه بر آن‌ها برای تولید محصولات کشاورزی می‌تواند زندگی آیندگان را به خطر اندازد (حسین پناهی و کافی، ۱۳۹۰). بنابراین، جایگزین کردن انرژی‌های تجدیدنپذیر با این نوع انرژی، ضروری به نظر می‌رسد. انرژی خورشیدی، یکی از مهم‌ترین و پاک‌ترین نوع انرژی‌های نو است که می‌تواند در درازمدت، هزینه‌ی اولیه‌ی اجرای سیستم را به مصرف‌کننده بازگرداند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱). امروزه، آب به‌عنوان کلید توسعه، نقش و جایگاه ویژه‌ای پیدا کرده و افزایش بهره‌وری آب به‌ویژه در بخش کشاورزی از ضروریات اولیه‌ی نیل به مدیریت بهینه‌ی منابع آب است. در سال‌های اخیر، اجرای سیستم‌های آبیاری تحت فشار برای افزایش راندمان کاربرد آب در مزرعه و به‌عنوان راهی برای برون‌رفت از بحران خشک‌سالی کشاورزی مورد تأکید مدیران و برنامه‌ریزان قرار گرفته است (قربانی و زمانیان، ۱۳۹۳). با توجه به گسترش سیستم‌های آبیاری تحت فشار در کشور و نیاز این نوع تکنولوژی آبیاری به انرژی، سبب شده است که نیاز به انرژی در بخش کشاورزی افزایش یابد. در ایران، در سال ۱۳۴۶ مصرف انرژی در بخش کشاورزی، معادل  $\frac{2}{8}$  میلیون بشکه نفت خام بوده است که کل این انرژی از طریق سوخت‌های فسیلی تأمین می‌شد. در سال ۱۳۷۱ با توجه به رشد تولیدات کشاورزی، به  $\frac{33}{7}$  میلیون بشکه افزایش یافته و پس از آن، مصرف انرژی در این بخش  $\frac{51}{4}$  میلیون بشکه نفت خام در سال ۱۳۹۴ گزارش شد (ترازنامه انرژی ۱۳۹۴). انرژی خورشیدی، می‌تواند در تأمین انرژی مناطق دورافتاده نقش مؤثری داشته باشد و در درازمدت، هزینه اولیه اجرای سیستم را به مصرف‌کننده بازگرداند (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱). در کشور ایران، به‌دلیل اقلیم گرم و خشک، شدت تابش خورشیدی و میزان ساعت آفتابی قابل قبول، استفاده از این نوع انرژی، پتانسیل بسیار خوبی را فراهم خواهد کرد (حسینی و همکاران، ۱۳۹۱). یکی از علل عدم موفقیت کشور ایران در به‌کارگیری بخش زیادی

از اراضی قابل کشت خود، فاصله‌ی زیاد اراضی از شبکه‌ی سراسری برق و در نتیجه هزینه‌های بالای برق‌رسانی است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۲). بنابراین، استفاده از انرژی‌های تجدیدنپذیر، از جمله انرژی خورشیدی، بهترین راه‌حل برای تأمین برق بخش کشاورزی و توسعه‌ی اراضی دور دست است (فرجی و همکاران، ۱۳۹۲). خمسه و همکاران (۱۳۹۱) دریافتند که با استفاده از پمپ فتوولتاییک در آبیاری باغات انار، نسبت سود به هزینه، حتی با پمپ فتوولتاییک پرهزینه، بالاتر از ۲ است. خوش‌اخلاق و همکاران (۱۳۸۴) بیان کردند که تأمین برق فتوولتاییک برای روستایی با فاصله‌ی ۵ کیلومتری از شبکه‌ی توزیع، در مقایسه با برق دیزلی یا توسعه‌ی شبکه‌ی برق سراسری اقتصادی‌تر است. نتایج مطالعات شمیتز و همکاران (۲۰۱۸) بیانگر پتانسیل بالای اتیوپی به‌منظور استفاده از سیستم فتوولتاییک برای پمپاژ آب است. این امر، کشاورزان کوچک را قادر به سازگاری با یک تکنولوژی هوشمند اقلیمی خواهد ساخت. جونز و همکاران (۲۰۱۶) در پژوهش خود به اقتصادی بودن پمپاژ آب با استفاده از سیستم فتوولتاییک در مقایسه با روش دیزلی و شبکه‌ای در دره‌ی اردن اشاره کردند. مهمود و همکاران (۲۰۱۵)، استفاده از سیستم فتوولتاییک در کشور پاکستان را نقطه‌ی عطفی در کشف مسائل مربوط به کشاورزی، انرژی و اقتصاد و کاهش نگرانی‌های زیست‌محیطی دانستند. نتایج مطالعات ام سی هنری (۲۰۱۲) به‌منظور بررسی فنی، اقتصادی و اثر گازهای گلخانه‌ای استفاده از سیستم فتوولتاییک در مقابل دیزلی، نشان داد استفاده از سیستم فتوولتاییک در مقابل سیستم دیزلی برتری محسوسی از لحاظ اقتصادی ندارد و در فواصل دورافتاده که هزینه‌ی توزیع و انتقال برق بالا می‌رود، استفاده از سیستم فتوولتاییک توجیه اقتصادی پیدا می‌کند. چانداسکار و کاندپال (۲۰۱۰) با ارزیابی سیستم‌های فتوولتاییک برای تأمین کامل برق مناطق روستایی در هند، به این نتیجه رسیدند که سیستم‌های فتوولتاییک برای تأمین نیاز برق روستاها از جنبه‌ی اقتصادی و زیست‌محیطی مناسب‌تر از سایر روش‌های تأمین انرژی است. اوانس و همکاران (۲۰۰۹) بیان کردند که سیستم‌های مدرن انرژی نسبت به سیستم‌های سنتی، گزینه‌های بهتری برای تأمین برق در مناطق روستایی هستند و تولید گازهای گلخانه‌ای را کاهش می‌دهند.

است که بر نوع و تعداد تجهیزات مورد استفاده در یک سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه اثر می‌گذارد (حاتمی و همکاران، ۱۳۹۳).

جدول ۱- مشخصات باغات مورد مطالعه

منطقه	مساحت (هکتار)	نوع باغ	محصول
محمد آباد (استان تهران)	۳/۵	کوچک	
کریم خانی (استان تهران)	۶۰	متوسط	پسته
کریم خانی (استان تهران)	۱۰۰	بزرگ	
سفیدخانه (استان همدان)	۴/۴۴	کوچک	
شهرستانه (استان همدان)	۱۸	متوسط	بادام
وهمان (استان همدان)	۸۹/۲۵	بزرگ	
لامیان (استان همدان)	۳/۵	کوچک	
نقده (استان همدان)	۱۰/۲	متوسط	گردو
تویسرکان (استان همدان)	۱۰۰	بزرگ	

برای تمامی باغات مورد بررسی در مناطق مختلف، ابتدا ایستگاه پمپاژ برقی طراحی و هزینه‌های سرمایه‌گذاری برآورد شد. در گام بعدی با استفاده از نرم‌افزار تخصصی طراحی پمپ خورشیدی شرکت لورنتز، سیستم فتوولتائیک طراحی و شبیه‌سازی شد و از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت.

### تحلیل اقتصادی

روش ارزش فعلی، روش معادل (یکنواخت) سالانه، تجزیه و تحلیل سرمایه‌گذاری اضافی، روش ترسیمی، روش محاسباتی و روش منافع به مخارج، از جمله تکنیک‌های اقتصاد مهندسی هستند که نتیجه‌ی برگزیدن اقتصادی‌ترین پروژه در همه‌ی آن‌ها یکسان است. در این پژوهش نیز از روش ارزش فعلی استفاده شد. برای تبدیل هزینه‌های آینده به ارزش حال، شاخص نرخ بهره واقعی مورد نیاز است. با توجه به تفاوت بین طول عمر مفید تجهیزات پمپ‌های برقی و پمپ‌های خورشیدی و همچنین پنل‌های خورشیدی، در محاسبه‌ی ارزش فعلی هرکدام، عمر پروژه‌ها نابرابر در نظر گرفته شد. بنابراین، ابتدا عمر مشترکی برای پروژه‌ها در نظر گرفته شد. برای این منظور، ابتدا کوچک‌ترین مضرب مشترک عمر پروژه‌ها به دست آمد و پروژه‌ها تکرار شدند تا به این عمر مشترک برسند. در این دوره بر اساس عمر مفید اجزای مختلف، هر یک از این تجهیزات مجدداً خریداری شدند. به دلیل اینکه نرخ بهره‌ی واقعی در هر یک از محاسبات لحاظ می‌شود و

رشد مصرف انرژی در کشور ایران ۵ برابر رشد مصرف انرژی در جهان است. از طرفی، این کشور از نظر دریافت انرژی خورشیدی موقعیت بسیار مناسبی دارد؛ به نحوی که سالیانه حدود ۱۰۱۶ مگاژول انرژی خورشیدی (معادل ۱۶۳۴ میلیارد بشکه نفت خام) دریافت می‌کند (نیکنام و همکاران، ۱۳۹۴). این انرژی می‌تواند در بخش‌های مختلف به‌ویژه کشاورزی استفاده شود؛ چرا که در سال‌های اخیر، پیشرفت سامانه‌های نوین آبیاری، نیاز به انرژی را افزایش داده‌اند. طبق مطالعات انجام شده، این سیستم به دلیل هزینه‌ی سرمایه‌گذاری بالا نیاز به تحلیل اقتصادی دارد. هدف از این مطالعه نیز بررسی تأثیر نوع محصول، ابعاد مزرعه و تأثیر فاصله‌ی زمین کشاورزی از شبکه‌ی توزیع برق بر هزینه‌های سرمایه‌گذاری سیستم‌های آبیاری قطره‌ای فتوولتائیک در دو استان تهران و همدان است. در نهایت، هزینه‌های پمپاژ فتوولتائیک آبیاری قطره‌ای با سیستم پمپاژ برقی مقایسه می‌شود.

### مواد و روش

#### منطقه‌ی مورد مطالعه

در این پژوهش، ۹ باغ شامل سه محصول بادام، گردو و پسته، واقع در استان‌های همدان و تهران انتخاب شدند و مورد مطالعه قرار گرفتند. برای هر محصول، سه باغ در ابعاد کوچک، متوسط و بزرگ در نظر گرفته شد؛ بدین‌صورت که باغ‌هایی با مساحت کمتر از ۵ هکتار در طبقه‌بندی کوچک، ۵ تا ۶۰ هکتار در طبقه‌بندی متوسط و بیش از ۶۰ هکتار در گروه باغ‌های بزرگ دسته‌بندی شدند. آبیاری کلیه‌ی باغات به روش قطره‌ای صورت گرفت. مشخصات باغات در جدول ۱ ذکر شده است.

#### طراحی ایستگاه پمپاژ فتوولتائیک

اجزای یک سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه، عبارت‌اند از: پنل خورشیدی، شارژ کنترل، باتری و مبدل. انرژی اولیه‌ی مورد استفاده در این سیستم، نور تابیده شده از خورشید بر سطح زمین است. تعداد روزهای ابری، ساعت‌های آفتابی روزانه، زاویه‌ی پنل‌ها با سطح افق، توان و راندمان پنل‌ها، ظرفیت و ولتاژ باتری‌ها، تلفات سیستم، عمق دشارژ باتری، توان وسایل برقی و مدت زمان استفاده از وسایل برقی در شب یا روز از جمله مواردی

### نتایج و بحث

جدول ۲، مشخصات ایستگاه پمپاژ باغ‌های پسته به‌وسیله‌ی برق و انرژی خورشید را نشان می‌دهد. مطابق جدول، با وجود یکسان بودن ظرفیت شبکه‌ی آبیاری در باغ‌های ۶۰ و ۱۰۰ هکتاری، به‌دلیل اختلاف در فشار عملکرد شبکه‌ی آبیاری قطره‌ای و مدت آبیاری در طول یک روز، اختلاف توان پنل‌های خورشیدی متفاوت بوده و منجر به استفاده از یک پمپ اضافه‌تر برای باغ ۱۰۰ هکتاری شده است. به عبارت دیگر، یک پمپ خورشیدی نمی‌تواند نیاز شبکه‌ی آبیاری باغ ۱۰۰ هکتاری را تأمین کند. استفاده از پمپ اضافه با توجه به هزینه‌ی بالا، زمانی اقتصادی است که اراضی کشاورزی از شبکه‌ی توزیع برق فاصله داشته باشد. همچنین، نتایج نشان داد که باغ ۱۰۰ هکتاری، بیشترین میزان پنل خورشیدی (۸۵ کیلووات) و فشار مورد نیاز شبکه (۴۶/۸ متر) را لازم دارد. گفتنی است تأمین فشار شبکه آبیاری و دبی در طول روز، مهم‌ترین عوامل در انتخاب مجموعه‌ی خورشیدی هستند. اطلاعات پمپاژ آب برای آبیاری باغ‌های بادام واقع در سفیدخانه، شهرستان و وهمان به‌ترتیب به‌عنوان باغ کوچک، متوسط و بزرگ در جدول ۳ ارائه شده است. بر اساس نتایج حاصل از جدول، بیشترین ظرفیت شبکه برای باغ‌های بادام مربوط به باغ بزرگ با ۸۹/۲۵ هکتار مساحت و معادل ۴۶/۵ لیتر بر ثانیه است. برای طراحی مجموعه‌ی خورشیدی علاوه بر دبی، مدت کارکرد شبکه آبیاری در طول روز حائز اهمیت است. در واقع، شبکه‌ی خورشیدی باید در زمان تابش مناسب خورشیدی روزانه، نیاز کل شبکه آبیاری را در مدت آبیاری تأمین کند. جدول ۴، نیز مشخصات ایستگاه پمپاژ آب برای باغات گردو به‌وسیله‌ی برق و انرژی خورشید را نشان می‌دهد. همان‌گونه که در جدول بیان شده است، در باغ بزرگ (۱۰۰ هکتاری)، یک پمپ خورشید قادر به تأمین حجم آب مورد نیاز آبیاری نیست و استفاده از یک پمپ اضافه را ضروری می‌سازد که این امر، به‌دلیل هزینه‌ی بالای خرید پمپ‌های خورشیدی، غیراقتصادی است. سیستم آبیاری قطره‌ای باغ بزرگ گردو، در این جدول بر اساس نیاز آبی گردو، شرایط اقلیمی و تبخیر و تعرق در منطقه تویسرکان و همچنین فاصله‌ی کاشت ۱۰ در ۱۰ متر درختان لحاظ شده است. توان پنل خورشیدی باغ کوچک و متوسط به‌ترتیب ۳ و

اثر تورم از نرخ بهره واقعی کم شده است، بنابراین قیمت لوازم مورد نیاز در هر پروژه، ثابت در نظر گرفته شد و اثر تورمی بر قیمت اجناس در طول دوره ۳۰ ساله لحاظ نشد. سپس، تمامی فرایندهای مالی به ارزش فعلی رسانده و مورد مقایسه قرار گرفتند. در حقیقت، در این روش ارزش فعلی هزینه‌های آینده طرح تعیین می‌شود. در اینجا، تعداد دوره، ۳۰ سال در نظر گرفته شد. در تکنیک مقایسه‌ی اقتصادی ارزش فعلی، برای محاسبه‌ی نرخ تنزیل ارزش آینده سرمایه‌گذاری تجهیزات برای هر یک از دو روش پمپاژ برقی یا فتوولتائیک، نیاز به تبدیل ارزش آینده سرمایه (F) به ارزش فعلی سرمایه (P) است. برای این تبدیل هزینه‌ها از تبدیل فاکتور P به F استفاده شد.

$$P = F(P/F, i\%, n) \quad (1)$$

هزینه‌ی برق مصرفی سالیانه شبکه‌ی پمپاژ برقی با لحاظ‌کردن قیمت هر کیلووات ساعت برق مصرفی ۱۳۰۰ ریال و با توجه به مدت کارکرد شبکه طی دوره آبیاری در طول سال که برای هر محصول با توجه به نیاز آبی آن متفاوت است، با استفاده از معادله‌ی (۲) محاسبه می‌شود.

$$R_p = P \times H_y \times R \quad (2)$$

که  $R_p$ ، هزینه‌ی برق مصرفی سالیانه (ریال)؛  $P$ ، توان مصرفی ایستگاه پمپاژ (کیلووات)؛  $H_y$ ، کارکرد سالیانه ایستگاه پمپاژ (ساعت)؛ و  $R$ ، هزینه‌ی هر کیلووات ساعت برق مصرفی (ریال) است. با تعداد دوره‌ی ۳۰ ساله، اعداد نهایی برای هر محاسبه ( $R_p$ ) در ۳۰ ضرب شد. تأمین برق برای این مناطق می‌تواند به دو روش صورت گیرد: حالت اول، نصب سیستم‌های فتوولتائیک به‌صورت متمرکز در محل‌های دورافتاده و فاقد شبکه سراسری برق است؛ حالت دوم، انتقال برق از طریق احداث خطوط انتقال و نصب ترانس تا مناطق موردنیاز است. هدف این پژوهش، مقایسه‌ی این دو حالت است؛ به‌گونه‌ای که هزینه‌ی سرمایه‌گذاری برای برق‌رسانی تا اراضی موردنظر با سرمایه‌گذاری برای تأسیس سیستم فتوولتائیک مقایسه شد. برای این منظور با فرض فاصله از شبکه‌ی برق در بازه‌ی صفر تا ۱۰ کیلومتری مقایسه‌ی اقتصادی بین این دو حالت صورت گرفت و میزان فاصله‌ی از شبکه‌ی توزیع برق که استفاده از روش پمپاژ خورشیدی، از لحاظ اقتصادی توجیه‌پذیر است، تعیین شد.

آبیاری، اقتصادی‌تر و از لحاظ فنی و امکان‌پذیری، بهره‌گیری از پمپاژ فتوولتائیک کاربردی‌تر خواهد بود. نرخ بهره ۱۰ درصد سبب کاهش نرخ تنزیل شده‌ی هزینه‌های پمپاژ نسبت به نرخ بهره‌ی ۵ درصد می‌شود؛ به عبارت دیگر، ارزش فعلی برای هر یک از هزینه‌ها به‌جز هزینه‌ی برق مصرفی کاهش می‌یابد. بر اساس شکل ۲، در باغ پسته با ابعاد متوسط (۶۰ هکتار) استفاده از روش خورشیدی اقتصادی است. اجرای این سیستم در باغات کوچک و بزرگ پسته اقتصادی به نظر نمی‌رسد. در باغ کوچک به علت مدت کارکرد بالای شبکه آبیاری در طول روز و وجود ناهمواری و پستی بلندی‌های منطقه کشت پسته، نسبت به باغ متوسط به توان یک پمپاژ بیشتر نیاز است و این مسئله باعث افزایش هزینه پمپاژ خورشیدی شده است.

۱۰ کیلووات است که استفاده از این پنل‌ها در اراضی امکان‌پذیر است و فضای کمی را اشغال می‌کنند. شکل‌های ۱ و ۲، هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ خورشیدی را در مقایسه با پمپاژ برقی در باغ پسته به ترتیب با نرخ بهره‌ی ۵ و ۱۰ درصد در حالت بدون فاصله از شبکه‌ی توزیع برق (منطقه‌ای که برق در دسترس باشد) نشان می‌دهد. در چنین شرایطی، استفاده از شبکه‌ی پمپاژ خورشیدی، اقتصادی به نظر نمی‌رسد؛ هر چند، اختلاف سرمایه‌ی لازم برای راه‌اندازی شبکه‌ی پمپاژ خورشیدی در برابر پمپ برقی، در دو باغ کوچک و متوسط، زیاد نیست. برای باغ بزرگ پسته، استفاده از دو پمپ در شبکه‌ی خورشیدی، منجر به ایجاد بیشترین درصد اختلاف هزینه در مقایسه با پمپاژ برقی در (۲۴/۸۶%) شده است. در مجموع، می‌توان گفت سیستم پمپاژ فتوولتائیک برای باغ‌های پسته با ظرفیت کمتر و فشار پایین‌تر شبکه‌ی

جدول ۲- مشخصات ایستگاه پمپاژ باغ‌های پسته به وسیله برق و انرژی خورشید

مشخصات شبکه آبیاری	باغ کوچک	باغ متوسط	باغ بزرگ
ظرفیت شبکه (لیتر بر ثانیه)	۱/۲	۳۵	۳۵
فشار مورد نیاز شبکه (متر)	۲۵/۵	۳۴	۴۶/۸
نوع پمپ برقی	۴۰/۳ WKL کوپل با الکتروموتور ۲/۲ کیلووات	۱۰۰/۲ WKL کوپل با الکتروموتور ۳۰ کیلووات	۱۰۰/۳ WKL کوپل با الکتروموتور ۳۷ کیلووات
نوع پمپ خورشیدی طراحی شده	PS1200 HR/07	PS40k2-C-SJ120-3	PS40k2-C-SJ120-3+PS15K2-C-SJ130-12
توان پنل خورشیدی (کیلووات)	۶/۵	۴۳/۱	۸۵

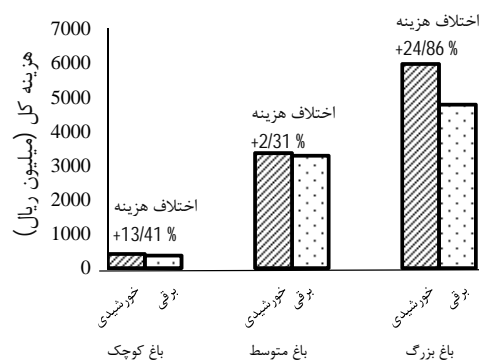
جدول ۳- مشخصات ایستگاه پمپاژ باغ‌های بادام به وسیله برق و انرژی خورشید

مشخصات شبکه آبیاری	باغ کوچک	باغ متوسط	باغ بزرگ
ظرفیت شبکه (لیتر بر ثانیه)	۳/۳۱	۱۴	۴۶/۵
فشار مورد نیاز شبکه (متر)	۳۴	۳۷	۳۸/۵
نوع پمپ برقی	۵۰/۴ WKL کوپل با الکتروموتور ۴ کیلووات	۸۰/۳ WKL کوپل با الکتروموتور ۱۵ کیلووات	۱۲۵/۲ WKL کوپل با الکتروموتور ۷۵ کیلووات
نوع پمپ خورشیدی طراحی شده	PS4000 CS-F8-8	PS21K2 CS-F85-20	PS40K2 CS-F85-40+PS40K2 CS-G125
توان پنل خورشیدی (کیلووات)	۷/۲	۲۶/۴	۹۲/۵

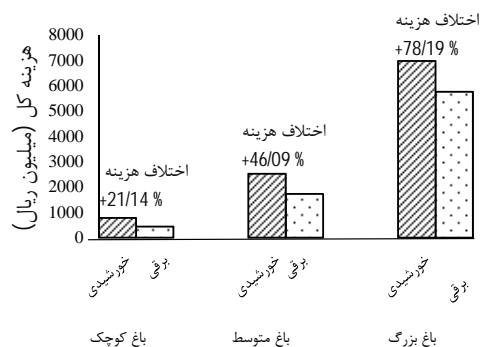
جدول ۴- مشخصات ایستگاه پمپاژ آب باغ‌های گردو به‌وسیله برق و انرژی خورشید

مشخصات شبکه آبیاری	باغ کوچک	باغ متوسط	باغ بزرگ
ظرفیت شبکه (لیتر بر ثانیه)	۵/۷۳۸	۱۱/۹۳	۹۵
فشار مورد نیاز شبکه (متر)	۱۴/۵	۱۹/۳۳	۳۸
نوع پمپ برقی	۵۰/۳ WKL کوپل با الکتروموتور ۳ کیلووات	۸۰/۲ WKL کوپل با الکتروموتور ۱۱ کیلووات	۱۵۰/۱ WKL کوپل با الکتروموتور ۷۵ کیلووات
نوع پمپ خورشیدی طراحی شده	PS1800 C-SJ17-2	PS7K2 C-SJ30-6	PS40k2-C-SJ120-3+PS4000 C-SJ17-4
توان پنل خورشیدی (کیلووات)	۳	۱۰	۶۸/۶

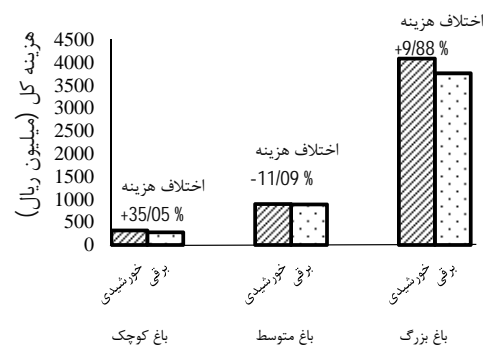
بنابراین، استفاده از روش پمپاژ خورشیدی در باغات بادام با نرخ بهره‌ی ۵ درصد در حالت بدون فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، غیراقتصادی خواهد بود. مطابق شکل ۴، هر سه باغ بادام با نرخ بهره ۱۰ درصد نیز از لحاظ اقتصادی نسبت به روش پمپاژ برقی، مقرون به‌صرفه نیستند. در باغ‌های بادام اختلاف هزینه‌ی دو روش پمپاژ در باغ بزرگ‌تر، کمتر است و دلیل این مسئله ظرفیت بالای پمپاژ در هنگام طراحی شبکه‌ی آبیاری در باغ‌های کوچک است.



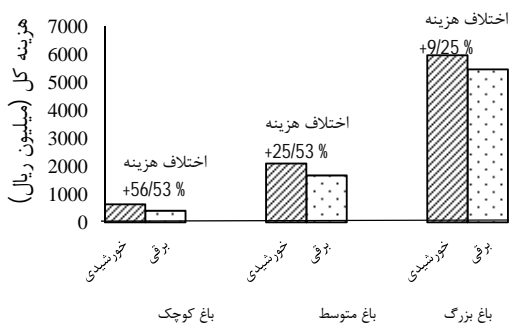
شکل ۱- هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ پسته با نرخ بهره ۵ درصد



شکل ۲- هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ بادام با نرخ بهره ۵ درصد



شکل ۳- هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ بادام با نرخ بهره ۱۰ درصد



شکل ۴- هزینه‌ی مورد نیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ بادام با نرخ بهره ۱۰ درصد

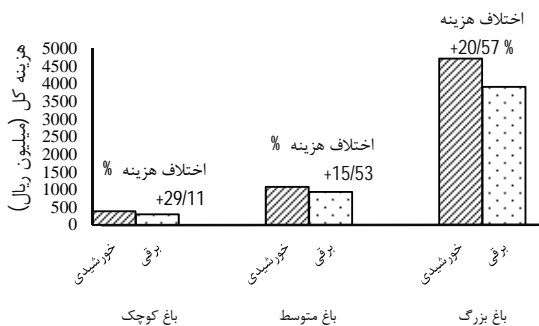
شکل‌های ۳ و ۴، نتایج مقایسه‌های دو روش پمپاژ آب (فتوولتائیک و برقی) در آبیاری باغات بادام را به ترتیب برای نرخ بهره‌ی ۵ و ۱۰ درصد در حالت بدون فاصله از شبکه‌ی توزیع برق نشان می‌دهد. بر اساس شکل ۳، برای باغ بزرگ بادام نیز همانند باغ بزرگ پسته نیاز به کارکرد هم‌زمان دو پمپ خورشیدی برای تأمین آب مورد نیاز شبکه‌ی پمپاژ است که همین امر، سبب افزایش هزینه‌ی سرمایه‌گذاری و در نهایت هزینه‌ی کلی طرح می‌شود.

شکل‌های ۵ و ۶، نتایج مقایسه‌ی هزینه‌های دو روش پمپاژ را برای باغات گردو به‌ترتیب با نرخ بهره‌ی ۵ و ۱۰ درصد در حالی که باغ با شبکه‌ی توزیع برق فاصله ندارد، نشان می‌دهند. مطابق شکل ۵، اقتصادی‌ترین مورد در بین سه باغ گردو، مربوط به باغ متوسط است؛ چرا که کمترین اختلاف هزینه‌ی سرمایه‌گذاری میان دو روش پمپاژ دیده می‌شود. برای استفاده از پمپاژ فتوولتاییک در این باغ، نیاز به  $15/53\%$  هزینه بیشتر نسبت به روش برقی است. همچنین با وجود هزینه‌ی بالای برق مصرفی شبکه‌ی آبیاری در طول ۳۰ سال دوره‌ی بررسی، به‌دلیل قیمت بالای خرید پمپ و پنل خورشیدی برای باغ بزرگ، با نرخ بهره‌ی ۵ درصد استفاده از پمپاژ خورشیدی، اقتصادی نیست. شکل ۶، ارزش فعلی هزینه سرمایه‌گذاری تجهیزات برقی و خورشیدی باغ‌های گردو را با نرخ بهره ۱۰ درصد نشان می‌دهد. هر سه باغ گردو نیز از لحاظ اقتصادی توجیهی در مقابل پمپاژ برقی ندارند؛ با وجود این، مساحت و هزینه‌ی پمپ و پنل خورشیدی در باغ  $3/5$  هکتاری (کوچک) بادام منطقی و قابل اجرا است و هزینه سرمایه‌گذاری آن تفاوتی معادل  $14/3\%$  با روش برقی دارد. همچنین، باغ متوسط گردو با اختلاف هزینه‌ی سرمایه‌گذاری ناچیز  $0/94\%$  از لحاظ اقتصادی شرایطی مشابه پمپاژ برقی دارد. هزینه‌ی برق مصرفی در طول دوره‌ی ۳۰ ساله برای باغ بزرگ گردو نسبت به باغ‌های متوسط و کوچک قابل توجه است. ۳ میلیارد و ۱۲ میلیون و ۷۵۰ هزار ریال برای استفاده از برق شبکه‌ای در مدت ۳۰ سال بررسی پرداخت خواهد شد. این میزان بهای برق، هزینه‌ی استفاده از برق در طول دوره‌ی آبیاری با توجه به مدت کارکرد شبکه آبیاری در طول روز است.

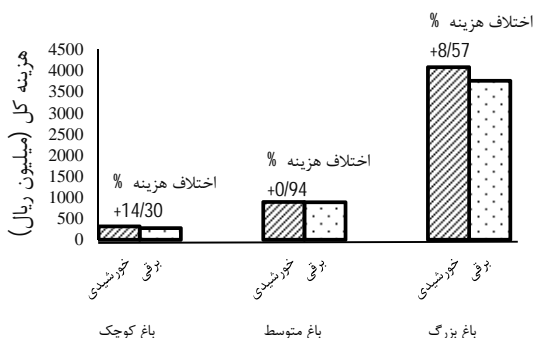
در مجموع، نتایج حاکی از آن است که کاربرد سیستم فتوولتاییک در حالت بدون فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، برای تمامی محصولات و شبکه‌های آبیاری مورد بررسی با وجود مدت کارکرد مختلف شبکه در طول روز، با کاهش ابعاد مزرعه و فشار شبکه، کارایی بیشتری دارد و اقتصادی‌تر خواهد بود. البته عوامل دیگری مانند دما، روزهای آفتابی، شدت تابش و زاویه‌ی خورشیدی در طول فصول مختلف سال نیز می‌تواند تأثیرگذار باشند. تغییرات ارزش فعلی هزینه‌ها برای هر روش پمپاژ با نرخ بهره ۱۰ درصد نسبت به نرخ بهره ۵ درصد، منجر به کاهش هزینه‌ها می‌شود. همچنین، نتایج نشان داد که با توجه به

قیمت بالای فروش پسته در بازارهای داخلی و خارجی و اقتصادی‌شدن پمپاژ خورشیدی باغ ۶۰ هکتاری پسته (با نرخ بهره ۱۰ درصد) استفاده از این روش پمپاژ برای مناطق کویری و مستعد کشت پسته کشور در مقیاس‌های پایین که ظرفیت آب آبیاری و فشار عملکرد شبکه پایین باشد، کاربردی و اقتصادی است. در صورتی که منبع تأمین آب آبیاری، حقاچه یا حوضچه‌های ذخیره‌ای باشد، به‌دلیل نیاز به تأمین فشار کمتر، ظرفیت‌های بالاتری پمپاژ می‌شود. به‌طور کلی، سیستم پمپاژ خورشیدی برای مناطقی که از شبکه‌ی توزیع برق فاصله ندارند، از نظر اقتصادی مناسب نیست؛ مگر اینکه سطح زیرکشت پایین باشد و توان مورد نیاز ایستگاه پمپاژ کم باشد. شکل ۷، هزینه‌های هر دو سیستم پمپاژ را برای باغات کوچک، متوسط و بزرگ پسته در فواصل مختلف از شبکه‌ی سراسری توزیع برق نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۷- الف مشاهده می‌شود احداث سیستم پمپاژ فتوولتاییک برای تأمین انرژی باغ پسته کوچک در فاصله‌ی  $0/25$  کیلومتری و دورتر از این فاصله، اقتصادی است و از این فاصله به بعد، هزینه‌ی برق‌رسانی بیشتر از هزینه‌ی پمپاژ خورشیدی است. با توجه به شکل ۷- ب می‌توان دریافت که در باغ متوسط پسته حتی در صورت عدم فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، هزینه‌ی سیستم پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی، کمتر و احداث آن اقتصادی‌تر است. با استنباط از شکل ۷- ج می‌توان دریافت که احداث سیستم فتوولتاییک بهتر است حداقل در فاصله‌ی یک کیلومتری از باغ بزرگ پسته باشد تا از نظر اقتصادی مقرون‌به‌صرفه باشد. شکل ۸، نیز بیانگر نتایج مقایسه‌های اقتصادی دو روش پمپاژ برای باغات بادام با ابعاد مختلف و در فواصل متعدد از شبکه‌ی سراسری توزیع برق است. مطابق شکل ۸- الف، احداث سیستم خورشیدی به‌منظور تأمین انرژی مورد نیاز باغ کوچک بادام از فاصله‌ی  $0/5$  کیلومتری به بعد توصیه می‌شود. استفاده از سیستم پمپاژ برقی، منجر به افزایش هزینه‌ها متناسب با افزایش فاصله از شبکه‌ی سراسری توزیع برق می‌شود. همان‌طور که در شکل ۸- ب مشاهده می‌شود، نمودار هزینه‌ی سیستم پمپاژ برقی و خورشیدی یکدیگر را در نقطه  $0/8$  کیلومتر قطع می‌کنند. این بدان معناست که احداث مجموعه‌ی فتوولتاییک برای تأمین و پمپ آب شبکه‌ی آبیاری باغ متوسط بادام در فواصل  $0/8$  کیلومتر و دورتر، توجیه

بزرگ گردو، در فواصل ۰/۷ کیلومتر و دورتر برای از جنبه‌ی اقتصادی قابل توجیه است.

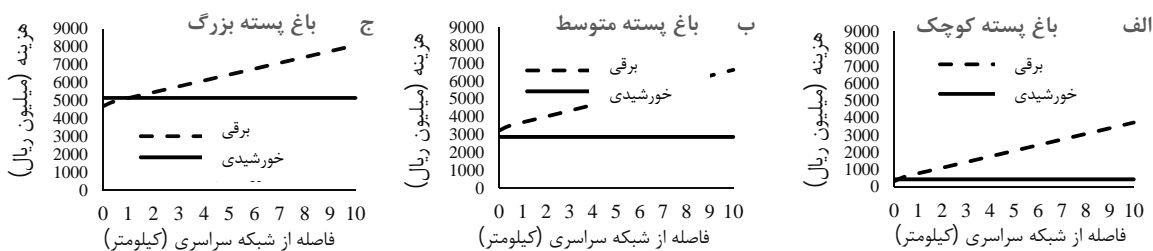


شکل ۵- هزینه موردنیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ گردو با نرخ بهره ۵ درصد

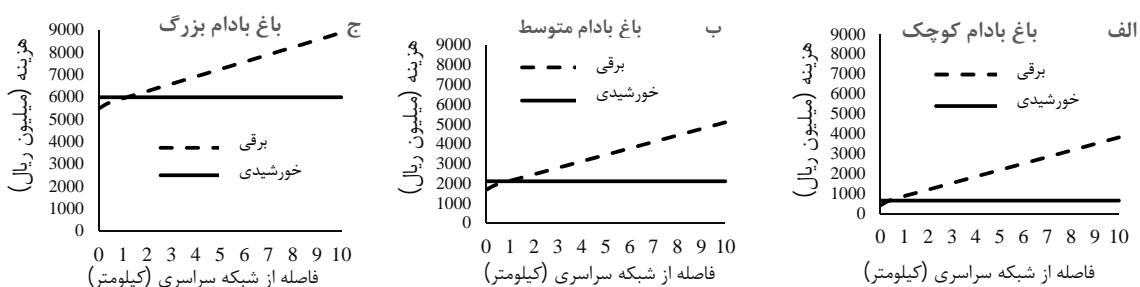


شکل ۶- هزینه موردنیاز برای پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی در باغ گردو با نرخ بهره ۱۰ درصد

اقتصادی دارد. همانند باغ کوچک بادام، روند افزایش هزینه‌ی پمپاژ، با افزایش فاصله، صعودی است؛ به‌نحوی که دورترین نقطه، بالاترین هزینه را در بر خواهد داشت. همچنین، با توجه به شکل ۸- ج می‌توان دریافت که احداث سیستم پمپاژ خورشیدی برای تأمین انرژی مورد نیاز باغ بزرگ بادام، در فاصله‌ی ۱/۲ کیلومتری و دورتر توجیه اقتصادی دارد. در فواصل نزدیک‌تر، بهتر است برق‌رسانی صورت گیرد. با توجه به شکل ۹- الف می‌توان دریافت که باغ کوچک گردو حتی اگر از شبکه‌ی توزیع برق فاصله نداشته باشد، هزینه‌ی سیستم پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی تقریباً برابر است و احداث هر دو سیستم توجیه اقتصادی دارد. ولی در فواصل دورتر، هزینه‌ی سیستم پمپاژ برقی بیشتر از خورشیدی خواهد بود. مطابق شکل ۹- ب، در باغ متوسط گردو نیز همانند باغ کوچک، در صورت نبود فاصله از شبکه‌ی سراسری توزیع برق، هزینه‌ی سیستم پمپاژ خورشیدی نسبت به پمپاژ برقی تقریباً یکسان و احداث هر دو سیستم پمپاژ، اقتصادی است. با افزایش فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، هزینه‌ی پمپاژ برقی افزایش می‌یابد و نسبت به هزینه‌ی سیستم فتوولتاییک بالاتر خواهد بود. بر اساس شکل ۹- ج، احداث سیستم فتوولتاییک برای پمپاژ آب مورد نیاز باغ

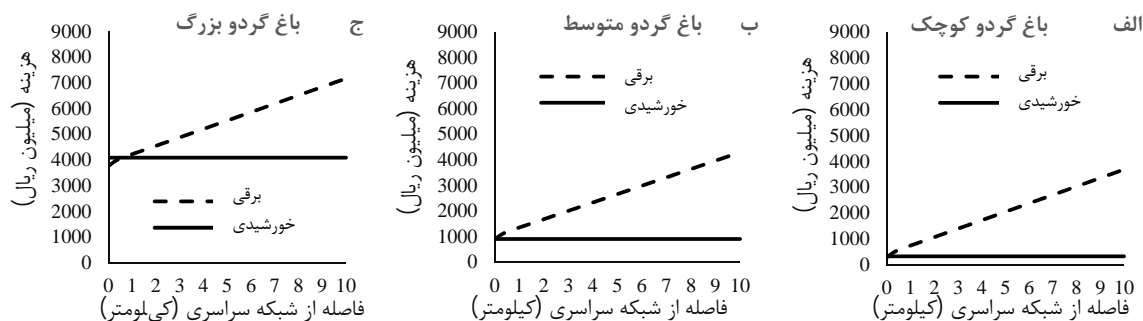


شکل ۷- مقایسه هزینه سیستم پمپاژ برقی و خورشیدی باغ پسته (الف: کوچک، ب: متوسط و ج: بزرگ) در فواصل مختلف از شبکه سراسری توزیع برق



شکل ۸- مقایسه هزینه سیستم پمپاژ برقی و خورشیدی باغ بادام (الف: کوچک، ب: متوسط و ج: بزرگ) در فواصل مختلف از شبکه سراسری توزیع برق





شکل ۹- مقایسه هزینه سیستم پمپاژ برقی و خورشیدی باغ گردو (الف: کوچک، ب: متوسط و ج: بزرگ) در فواصل مختلف از شبکه سراسری توزیع برق

آبیاری قطره‌ای، پمپاژ فتوولتائیک کارایی مناسب‌تری دارد و قابل‌استفاده با یک مجموعه از پمپ و پنل است. با افزایش ظرفیت و فشار شبکه، نیاز به افزایش قدرت و توان مورد نیاز مجموعه فتوولتائیک، منجر به افزایش هزینه می‌شود. در مناطق دورافتاده که دسترسی به شبکه‌ی توزیع و انتقال برق ندارند، استفاده از پمپاژ فتوولتائیک منطقی و اقتصادی است. نتایج در این حالت نیز نشان داد، با کاهش ظرفیت مزرعه و افزایش فاصله از شبکه‌ی برق، استفاده از پمپاژ به روش فتوولتائیک اقتصادی‌تر است. استفاده از این روش پمپاژ در شبکه‌های آبیاری تحت‌فشار می‌تواند کمک شایان توجهی به مناطق دورافتاده در راستای افزایش سطح زیرکشت، بهبود اشتغال، تمرکززدایی، افزایش تولیدات کشاورزی و اعتباربخشیدن به اراضی نواحی دورافتاده کند.

#### منابع

۱. ترازنامه‌ی انرژی. ۱۳۹۴. وزارت نیرو، معاونت امور برق و انرژی دفتر برنامه‌ریزی کلان برق و انرژی. ص. ۵۶۸.
۲. حاتمی م.، ناظمی ع. دولت‌آبادی ا. و مصطفی‌پور م. ۱۳۹۳. ارزیابی اقتصادی استفاده از سیستم فتوولتائیک مستقل از شبکه در روستاها با شبیه‌سازی مونت کارلو (مطالعه موردی: تهران). فصلنامه راهبردهای توسعه روستایی. ۱(۲): ۱۹-۳۳.
۳. حسین پناهی ف. و کافی م. ۱۳۹۰. ارزیابی بودجه انرژی و بهره‌وری آن در مزارع تولید سیب‌زمینی استان کردستان، مطالعه موردی: دشت دهگلان. نشریه بوم‌شناسی کشاورزی. ۴: ۱۵۹-۱۶۹.

به‌طور کلی، می‌توان نتیجه گرفت که در مناطق دورافتاده که دسترسی به شبکه‌ی توزیع و انتقال برق ندارند، استفاده از پمپاژ فتوولتائیک منطقی و اقتصادی است؛ البته برای هرکدام از این مناطق، فاصله از شبکه برق که از آن به بعد پمپاژ فتوولتائیک توجیه‌پذیر می‌شود، متفاوت است. با در نظر گرفتن هزینه‌ی بالای انتقال برق برای هر باغ که در ازای هر کیلومتر در سال ۱۳۹۴، ۴۵۳ میلیون و ۴۲۰ هزار ریال است (شامل هزینه انتقال خطوط و ترانسفورماتور)، می‌توان به توجیه اقتصادی استفاده از پمپاژ با کمک انرژی خورشید نیز در مناطق دورافتاده امیدوار بود. نتایج بررسی استفاده از پمپاژ فتوولتائیک برای تأمین آب آبیاری در مناطق دورافتاده نشان داد که هرچه ظرفیت مزرعه کمتر باشد، (که غالباً در اراضی کوچک‌تر رخ می‌دهد) و فاصله از شبکه برق بیشتر باشد، استفاده از روش پمپاژ فتوولتائیک اقتصادی‌تر است. با افزایش فاصله از شبکه‌ی توزیع برق، تنها هزینه‌ی انتقال خطوط جریان برق به هزینه‌های پمپاژ برقی افزوده می‌شود و استفاده از پمپاژ فتوولتائیک توجیه‌پذیرتر می‌شود.

#### نتیجه‌گیری

در این پژوهش، کاربرد روش پمپاژ فتوولتائیک در بخش آبیاری قطره‌ای برای ۹ باغ واقع در استان‌های تهران و همدان که شامل ۳ محصول پسته، بادام و گردو (در ابعاد مختلف) در حالت با و بدون فاصله از شبکه‌ی سراسری توزیع برق از نظر اقتصادی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد، در حالتی که باغ از شبکه‌ی توزیع برق فاصله ندارد، برای محصول یکسان هر چه ابعاد زمین کوچک‌تر باشد، به‌دلیل پایین‌ترین بودن ظرفیت و فشار شبکه‌ی

13. McHenry M. 2012. A technical, economic, and greenhouse gas emission analysis of a homestead-scale grid-connected and stand-alone nphotovoltaic and diesel systems, against electricity network extension. *Renewable Energy*. 38: 126-135.
14. Mehmood A. Waqas A. and Mahmood H. T. 2015. Economic viability of solar photovoltaic water pump for sustainable agriculture growth in Pakistan. *Materials Today: Proceedings*. 2(10): 5190-5195.
15. Schmitter P. Kibret K. S. Lefore N. and Barron J. 2018. Suitability mapping framework for solar photovoltaic pumps for smallholder farmers in sub-Saharan Africa. *Applied Geography*. 94: 41-57.
۴. حسینی ف. سلطانی ج. غیاثوند ز. و غیاثی ف. ۱۳۹۱. نقش استفاده از انرژی خورشیدی در حفظ و احیای مراتع در مناطق خشک. *مجله محیط‌شناسی*. ۶۲: ۱۳-۲۲.
۵. خمسه م. عالی پ. و رجائی م. ۱۳۹۱. طراحی و آزمایش پمپ خورشیدی فتوولتائیک برای سیستم آبیاری قطره‌ای. دومین همایش ملی انرژی و باد. هم‌اندیشان انرژی کیمیا. تهران، ایران. سوم اسفندماه. ۱۰ ص.
۶. خوش‌اخلاق ر. شریفی ع. م. و کوچک‌زاده م. ۱۳۸۴. ارزیابی اقتصادی استفاده از انرژی خورشیدی در مقایسه با نیروگاه دیزلی. *فصلنامه پژوهش‌های اقتصادی ایران*. ۲۴: ۱۷۱-۱۹۲.
۷. فرجی سبکبار ح. ع. پاک‌طینت مهدی‌آبادی ه. رحیمی کیان ا. و عشورنژاد غ. ۱۳۹۲. تناسب‌سنجی اراضی به‌منظور احداث مزارع فتوولتائیک به کمک تلفیق سیستم‌های جمع ساده وزنی و استنتاج فازی در ایران. *پژوهش‌های جغرافیای طبیعی*. ۴۵(۴): ۴۵-۶۰.
۸. قربانی ب. و زمانیان م. ۱۳۹۳. آبیاری تحت فشار، راه برون‌رفت از بحران خشکسالی کشاورزی (مطالعه موردی: آبیاری قطره‌ای). دومین همایش ملی بحران آب (تغییر اقلیم، آب و محیط‌زیست). شهرکرد. ایران. هجدهم شهریور. ۸ ص.
۹. نیکنام ن. محمدی ع. میرزاحسینی س. ع. و تقوی ل. ۱۳۹۴. فرصت‌ها و چالش‌های توسعه پایدار سیستم‌های فتوولتائیک در ایران. *فصلنامه پایداری. توسعه و محیط‌زیست*. ۲(۱): ۱۷-۲۹.
10. Chandrasekar B. and Kandpal T. C. 2010. An Opinion Survey Based Assessment of Renewable Energy Technology Development in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 11: 688-701.
11. Evans A. Strezov V. and Evans T. J. 2009. Assessment of Sustainability Indicators for Renewable Energy Technologies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 13: 1082-1088.
12. Jones M. A. Odeh I. Haddad M. Mohammad A. H. and Quinn J. C. 2016. Economic analysis of photovoltaic (PV) powered water pumping and desalination without energy storage for agriculture. *Desalination*. 387: 35-45.