

## Potential Evaluation and Sizing of an Off-grid Photovoltaic Generator for the Energy Supply of an Irrigation System

AHMAD OMIDI<sup>1</sup>, REZA ALIMARDANI<sup>\*2</sup>, MAJID KHANALI<sup>3</sup>

1. Ph.D. Student, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

2. Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

3. Assistant Professor, Department of Agricultural Machinery Engineering, Faculty of Agricultural Engineering and Technology, University College of Agriculture and Natural Resources, University of Tehran, Karaj, Iran

(Received: Nov. 12, 2017- Revised: Jan. 22, 2018- Accepted: Feb. 7, 2018)

### ABSTRACT

The use of photovoltaic (PV) systems is a useful solution for providing the required pumping power for irrigation of farms and gardens away from the grid (detached from the grid). The design of photovoltaic systems for water pumping completely depends on estimating the plant's water requirement. Because the water needs vary with time during the different irrigation season and solar radiation, performing accurate simulations is essential in order to achieve a successful and desirable design. The purpose of this paper is to provide a method for designing photovoltaic water pumping systems by combination water estimation relations and solar power models. In this study, Karaj station meteorological data during the ten year period (2005-2014) was used to estimate water demand and solar power. The water requirement of different months was estimated using the Penman-Monteith evapotranspiration model. The results showed that the highest water requirement was in July with 70 m<sup>3</sup>/day. It was estimated that in order to provide the necessary energy for daily pumping of up to 70 m<sup>3</sup>/day with a height of 30 m and taking into account the pump hydraulic efficiency and the efficiency of other components of the system, the pump with a power of 2200 W, the solar panel capacity of about 3222 W with 22 square meters area would be enough.

**Keywords:** Photovoltaic, energy, irrigation system, sizing

## پتانسیل سنجی و تعیین اندازه مولد فتوولتائیک مستقل جهت تامین انرژی یک سامانه آبیاری

احمد امیدی<sup>۱</sup>، رضا علیمردانی<sup>۲\*</sup>، مجید خانعلی<sup>۳</sup>

۱. دانشجوی دکتری، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس

کشاورزی و منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۲. استاد، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و منابع

طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

۳. استادیار، گروه مهندسی مکانیک ماشینهای کشاورزی، دانشکده مهندسی و فناوری کشاورزی، پردیس کشاورزی و

منابع طبیعی، دانشگاه تهران، کرج، ایران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۸/۲۱ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۱۱/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۱۱/۱۸)

## چکیده

استفاده از سامانه‌های فتوولتائیک (PV) راه‌حلی مفید برای تامین توان پمپاژ مورد نیاز آبیاری مزارع و باغات دور از شبکه (منفصل از شبکه) محسوب می‌شود. طراحی سامانه‌های فتوولتائیک پمپاژ آب به شدت به برآورد نیاز آبی گیاه وابسته است. از آنجا که نیاز آبی در طول فصل آبیاری متفاوت و تابش خورشیدی با زمان تغییر می‌کند، انجام شبیه سازی‌های دقیق به منظور دستیابی به طراحی موفق و مطلوب با اهمیت است. هدف این مقاله ارائه روشی برای طراحی سامانه‌های فتوولتائیک پمپاژ آب با ترکیب مدل‌های نیاز آب و توان خورشیدی است. در این مطالعه از داده‌های ایستگاه هواشناسی کرج طی دوره ده ساله (۲۰۰۵ - ۲۰۱۴) برای برآورد نیاز آبی و توان خورشیدی منطقه کرج استفاده شده است. نیاز آبی ماه‌های مختلف سال با استفاده از مدل تبخیر و تعرق پنمن-مانتیث برآورد گردید. نتایج بدست آمده نشان داد که بیشترین نیاز آبی مربوط به ماه جولای با ۷۰ مترمکعب در روز بود. با برآوردهای صورت گرفته مشخص گردید که جهت تامین انرژی لازم برای پمپاژ روزانه حداکثر ۷۰ متر مکعب آب در روز با ارتفاع ۳۰ متر و در نظر گرفتن راندمان هیدرولیکی پمپ و نیز راندمان سایر اجزای سامانه مورد نظر، به پمپی با توان ۲۲۰۰ و ظرفیت پمپ خورشیدی ۳۲۲۲ وات با مساحت حدود ۲۲ مترمربع نیاز خواهد بود.

واژه‌های کلیدی: فتوولتائیک، انرژی، سامانه آبیاری، تعیین اندازه

## مقدمه

<sup>۱</sup> PVWPS برای آبیاری نصب شد. مشکل اصلی تحقیق و توسعه برای اجرای PVWPSها تنها در فنآوری های PV و پمپ نیست بلکه مسائل مربوط به در نظر گرفتن ویژگی‌های مکانی، در دسترس بودن منابع آب، نیاز آبی، پیکره بندی‌های مختلف سامانه پمپاژ، پذیرش و مدیریت سامانه است. علاوه بر این، در شرایط فعلی هزینه سرمایه‌گذاری یک PVWPS هنوز هم بالاتر از سامانه‌های دیزلی است و به‌عنوان مانع اصلی در مقیاس بزرگ تجاری در نظر گرفته می‌شود، اگرچه هزینه‌های عملیاتی فتوولتائیک بسیار پایین‌تر است. بنابراین، امروزه بیشتر توجه و تلاش به بهینه‌سازی و به حداقل رساندن هزینه‌ها متمرکز شده است (Fedrizzi, 2009).

تبخیر و تعرق یکی از مهم‌ترین پارامترهایی است که دانستن آن جهت برآورد آب مصرفی گیاه و طراحی سامانه‌های آبیاری ضروری است. تعیین دقیق مقدار آبی که برای تبخیر و تعرق مصرف می‌شود، از عوامل اساسی در برنامه‌ریزی برای رسیدن به محصول بیشتر است. همچنین در طراحی و تعیین ظرفیت شبکه‌های آبیاری و زهکشی، برآورد تبخیر و تعرق نقش مهمی دارد. در اغلب روش‌هایی که برای تعیین میزان تبخیر و تعرق ارائه شده‌اند، ابتدا مقدار تبخیر و تعرق گیاه مرجع <sup>۲</sup> (ET<sub>o</sub>) تخمین زده می‌شود و سپس از روی آن تبخیر و تعرق گیاه مورد نظر محاسبه می‌شود (Alizadeh et al., 2002). بر اساس استاندارد فائو، تبخیر و تعرق گیاه مرجع عبارت است از میزان آبی که یک مزرعه پوشیده از گیاه مرجع (نظیر چمن) در یک دوره زمانی مشخص مصرف نماید به طوری که گیاهان این مزرعه در طول دوره رشد با کمبود آب مواجه نشوند (Sharifian et al., 2003). از بین روش‌های تجربی متعدد ارائه شده برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع، در سال ۱۹۹۰ از سوی کمیسیون بین‌المللی آبیاری و زهکشی و سازمان خواربار جهانی روش فائو پنمن - مانیتیت به‌عنوان تنها روش استاندارد برای محاسبه تبخیر و تعرق گیاه مرجع از روی داده‌های اقلیمی و همچنین برای ارزیابی سایر روش‌ها پیشنهاد شده است (Hargreaves, 1994). این روش نیازمند داده‌های تابش، دما، رطوبت و سرعت باد بوده و با درجه اعتماد بالایی در دامنه وسیعی از مناطق و اقلیم‌ها برآورد صحیحی از تبخیر و تعرق گیاه مرجع ارائه می‌کند (Allen, 1998).

Bahrami & Abaspour Sani (2010) در یک تحقیق اقدام به تعیین زاویه شیب بهینه آرایه‌های خورشیدی در شرایط

ایران کشوری آفتابی است و از نظر مقدار دریافت انرژی تابشی خورشید در شمار بهترین کشورها قرار می‌گیرد. در اکثر نقاط کشور به خاطر شرایط اقلیمی خشک و هوای صاف و بدون ابر، میزان دریافت تابش نسبتاً بالاست. با توجه به محدودیت منابع فسیلی و افزایش روزافزون تقاضای انرژی، به‌کارگیری تمهیداتی برای بهره‌برداری بهینه از منابع سرشار انرژی خورشیدی در کشورمان امری ضروری به نظر می‌رسد. برنامه‌ریزی برای بهره‌برداری بهینه از انرژی خورشیدی نیازمند برآورد پتانسیل آن در مناطق مختلف کشور می‌باشد. از جمله سامانه‌هایی که می‌توان برای این منظور استفاده کرد، پنل‌های فتوولتائیک و جمع‌کننده‌های خورشیدی می‌باشد (Jafarkazemi & Mardi, 2010). به دلیل هزینه عملیاتی کم و دوام زیاد، انرژی خورشیدی یکی از مناسب‌ترین منابع انرژی تجدید پذیر است. انرژی خورشیدی منبعی پاک است که اثرات زیست محیطی کمتری نسبت به منابع انرژی متعارف دارد. با وجود داشتن هزینه‌های اولیه نسبتاً بالا، تجهیزات انرژی خورشیدی هزینه‌های خود را در یک زمان معقول جبران می‌کنند. فنآوری انرژی خورشیدی به‌طور مداوم در حال پیشرفت است و بسیاری از محققان در حال مطالعه بر روی سامانه‌های خورشیدی هستند (Suzuki, 2015). پمپ کردن آب در طول روز و زمانی که تابش خورشید در دسترس است کاملاً امکان‌پذیر بوده و می‌توان آب را در مخازن برای شرایط آب و هوایی مختلف ذخیره کرد (Xu et al., 2013). در دسترس بودن برق در مناطق دور افتاده یکی از مسائل اصلی در خصوص طراحی و بهره‌برداری از سامانه‌های پیشرفته آبیاری است. با این حال، در کشورهای در حال توسعه، دسترسی به شبکه برق در تمام نقاط کاملاً امکان‌پذیر نیست. با توسعه فنآوری فتوولتائیک استفاده از سلول‌های PV به راه‌حلی جذاب‌تر برای تأمین مورد نیاز سامانه‌های پمپاژ آب، به‌ویژه در مناطقی که دارای منابع فراوان انرژی خورشیدی است تبدیل شده است (Bouzidi et al., 2009). قابلیت اطمینان بالای فنی سامانه‌های پمپاژ فتوولتائیک برای اهداف آبیاری، قابلیت اقتصادی بلند مدت و پیشرفت‌های اخیر و همچنین نقاط ضعف آن توسط برخی مطالعات و تجارب میدانی نشان داده شده است. دانش به دست آمده در این زمینه به‌عنوان نقطه شروع و توصیه‌هایی برای کار بیشتر و برنامه‌های آینده در سراسر جهان منجر شده است. به‌عنوان مثال، طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ در بنگلادش بیش از ده هزار

1- Photovoltaic Water Pumping

2- Reference Evapotranspiration

بسیار بیشتر است. همچنین بهترین راه برای بهینه‌سازی هزینه‌ها و طراحی سامانه PV، شناخت و برآورد دقیق نیازهای آبی محصول و انجام بررسی گسترده در مورد محل موردنظر برای تجزیه و تحلیل شرایط کار سامانه اعلام گردید.

میزان تابش و نیاز آبی علاوه بر عملکرد و کارایی اجزای یک سامانه آبیاری فتوولتائیک در تعیین اندازه بهینه پنل‌ها (کمترین اندازه ممکن آرایه فتوولتائیک) نقشی مهم و اساسی دارند. تعیین و برآورد دقیق نیاز آبی با استفاده از مدل‌های برآورد تبخیر و تعرق و سپس انتخاب پمپ مناسب می‌تواند گامی مهم و اساسی در جهت کاهش هزینه‌های اولیه یک سامانه آبیاری فتوولتائیک باشد. هدف این مقاله ارائه روشی برای طراحی سامانه‌های فتوولتائیک پمپ‌آب با ترکیب مدل‌های نیاز آب و توان خورشیدی است که در آن با برآورد دقیق نیاز آبی و پتانسیل انرژی خورشیدی ماه‌های مختلف سال، بیشترین نیاز آبی روزانه تعیین و بر اساس آن انرژی هیدرولیکی بیشینه محاسبه گردد. سپس بر مبنای آن و لحاظ نمودن راندمان اجزای مختلف سامانه، ظرفیت پنل مورد نیاز محاسبه گردد. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ایستگاه کرج شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد، تعداد ساعات آفتابی و تابش برای برآورد نیاز آبی و توان خورشیدی استفاده شده است.

### مواد و روش‌ها

استان البرز از نظر موقعیت جغرافیایی از شمال به استان مازندران از غرب به استان قزوین و از شرق به استان تهران و از جنوب به استان مرکزی محدود می‌شود. جمعیت این استان بیش از ۲/۵ میلیون نفر است که حدود ۵٪ از جمعیت کل کشور را شامل می‌شود. سایت انتخاب شده برای این مطالعه در شهرستان کرج در استان البرز، واقع در طول جغرافیایی ۵۰ درجه و ۵۷ دقیقه شرقی و عرض جغرافیایی ۳۵ درجه و ۴۸ دقیقه شمالی و ارتفاع ۱۲۹۲ متر از سطح دریا است. میانگین بارندگی سالیانه کرج حدود ۲۵۱ میلی‌متر با ضریب تغییرات ۲۴/۱ درصد و حداقل ۱۸۹/۳mm و حداکثر ۳۷۴/۴mm می‌باشد. فصل زمستان با ۴۲/۳ درصد و فصل تابستان با ۱/۵ درصد بیشترین و کمترین سهم را در بارش سالیانه بر عهده دارند. حداقل و حداکثر مطلق دما به ترتیب ۲۰- و ۴۲ درجه و میانگین سالیانه نیز ۱۴/۱ درجه سلسیوس می‌باشد. ماه تیر با میانگین ۲۶/۰ درجه سلسیوس و دی با ۱/۲ درجه سلسیوس به ترتیب گرم‌ترین و سردترین ماه سال محسوب می‌شوند. میانگین ساعات آفتابی سالیانه برابر با ۲۸۹۹ ساعت است. تابش خورشیدی متوسط روزانه بر روی سطوح افقی بالغ بر ۴/۳۶

اقلیمی کرج نمودند. آن‌ها بیان نمودند که بهترین جهت برای آرایه‌های خورشیدی در کرج، به سمت جنوب و تغییرات زاویه شیب بهینه بین صفر درجه (می، ژوئن، جولای و آگوست) تا ۶۹ درجه (ژانویه) است. در زمستان این زاویه (دسامبر، ژانویه، فوریه) ۶۵/۳۳ درجه، در بهار (مارس، آوریل می) ۲۲ درجه، در تابستان (ژوئن، جولای، آگوست) صفر درجه و در پائیز (سپتامبر، اکتبر، نوامبر) ۳۷/۳۳ درجه می‌باشد. زاویه شیب بهینه سالانه وابسته به عوامل متعددی از جمله عرض جغرافیایی و شرایط آب و هوایی است. به‌طور متوسط، این مقدار در سال ۳۱/۶۶ درجه می‌باشد که زاویه ثابت و مطلوب در سال طراحی و توسعه یک سامانه آبیاری قطره‌ای خورشیدی کم‌هزینه در ترکیه انجام شد. مساحت سایت مورد مطالعه آن‌ها هزار مترمربع و دارای بیش از ۱۰۰ اصله درخت بود. آن‌ها بیان داشتند که استفاده از یک سامانه پمپ‌آب خورشیدی با باتری، به‌جای یک سامانه معمولی بدون باتری، دارای عملکرد بهتری است، زیرا جریان خروجی وابسته به شرایط جوی نیست (Deveci et al., 2015).

Chandel et al. (2017) مطالعات سامانه‌های پمپ‌آب فتوولتائیک را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها بیان داشتند که PVWPSها برای تأمین آب مورد نیاز در مناطق دور از شبکه دارای توجیه اقتصادی بوده و هزینه نگهداری کمی دارند. همچنین بیان داشتند که در یک مطالعه موردی در مورد ارزیابی عملکرد یک پمپ خورشیدی DC پس از گذشت ۲۸ سال میزان افت عملکرد پنل PV تنها ۱/۴ درصد در سال بود که با نرخ ۱/۴۵ درصدی گزارش شده برای پنل‌های مونو کریستال در هند همخوانی داشته است. همچنین هنوز سامانه قادر به تولید توان کافی برای پمپ‌آب با دبی متوسط ۸۲۹ لیتر در ساعت بوده است و نتایج عملکرد تجربی با نتایج شبیه‌سازی شده مطابقت داشته است. Bora et al. (2017) عملکرد مدل‌های پمپ آب خورشیدی فتوولتائیک (SPV) را برای شرایط مختلف آب و هوایی مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها اثر تغییرات تابش و تغییرات دما بر پمپ‌های فتوولتائیک (SPV) مختلف مورد تجزیه و تحلیل قرار دادند و بیان داشتند که پمپ‌ها عموماً در محدوده بهره‌وری ۴۰-۵۰٪ عمل می‌کنند.

Wazed et al. (2018) به بررسی سامانه‌های آبیاری خورشیدی برای کشورهای جنوب صحرای آفریقا پرداختند و بیان کردند که هزینه سامانه PV در طول عمر آن بسیار پایین‌تر از سامانه‌های دیزلی است، ولی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه

حال با در نظر گرفتن میزان تابش خورشیدی برای طراحی سامانه آبیاری خورشیدی بر اساس معادله (۳)، می‌توان ظرفیت اسمی یک مولد PV را در ماه بحرانی تعیین نمود. این ظرفیت اسمی را می‌توان بر مبنای مقادیر میانگین انرژی مورد نیاز روزانه (متوسط مصرف روزانه آب طی هر ماه) و متوسط تابش خورشیدی روزانه (متوسط در طول ماه) در سطح تعیین نمود. به دلیل اینکه زمان دقیق آبیاری را می‌توان بنا به شرایط مزرعه در ساعات مختلفی از شبانه روز انجام داد لذا می‌توان بیان کرد که تأمین توان موردنیاز برای پمپاژ قابل تعویق است، زیرا در طول هر زمان از روز و نه در ساعات خاص قابل تأمین هستند. بنابراین، شبیه‌سازی روزانه به‌جای شبیه‌سازی ساعتی برای اجرای یک سامانه آبیاری خورشیدی کافی است (Kamel & Dahl., 2005). انرژی هیدرولیک مورد نیاز در معادله (۳) را با توجه به نیاز آبی گیاه، روش آبیاری، و ارتفاع کل پمپاژ می‌توان به‌صورت زیر تعیین نمود (Campana et al., 2013):

$$E_H = \frac{\rho g Q_{dc} H_{TE}}{(36 \times 10^5 \eta_F \eta_N)} \quad (\text{رابطه ۴})$$

آب موردنیاز تابعی از عوامل متعدد، از قبیل نوع محصول، سطح رشد گیاه، خاک، و شرایط آب و هوایی است. روش‌های آبیاری مختلفی، از جمله کانال باز، غرقایی، قطره‌ای، و بارانی وجود دارد. با توجه به روش آبیاری مورد استفاده، در تعیین نیاز انرژی هیدرولیک دو عامل بهره‌وری باید گنجانده شود. عامل اول راندمان آبیاری  $\eta_N$  است که نشان می‌دهد چه مقدار از آب وارد شده به سامانه آبیاری هدر می‌رود. آبیاری قطره‌ای با ۸۵-۹۰ درصد بالاترین و روش غرقایی با ۴۰-۵۰ درصد کمترین راندمان را دارا می‌باشد. عامل دوم بهره‌وری سامانه آبیاری ( $\eta_F$ ) است که بیانگر تلفات انرژی به‌صورت اصطکاکی در سامانه آبیاری است. برآورد دست بالا از این تلفات انرژی اصطکاکی ۱۰٪ است (Glasnovic & Margeta., 2007; Campana et al., 2013). مولد PV مستقل با اندازه بهینه، قادر به تأمین انرژی هیدرولیکی مورد نیاز برای تمام ماه‌های سال خواهد بود. لذا ظرفیت بهینه یک مولد PV از رابطه (۵) تعیین می‌شود.

$$P_{el}^* = \max(P_{el}(i)), \quad i = 1, \dots, 12 \quad (\text{رابطه ۵})$$

که در آن  $i$  عدد مربوط به ماه است که برای ژانویه  $i=1$  و برای دسامبر  $i=12$  خواهد بود. محدودیت‌های حاکم که در صورت تحقق دلالت بر اندازه بهینه آرایه فتوولتائیک دارند عبارت‌اند از (El-Shimy, 2013):

$$E_A(i) - E_H(i) \geq 0, \quad i = 1, \dots, 12 \quad (\text{رابطه ۶})$$

$$\max(E_A(i)) - \max(E_H(i)) \cong 0, \quad i = 1, \dots, 12$$

که در آن  $E_A$  میانگین انرژی تولیدی روزانه (kWh/day) توسط سامانه می‌باشد. این محدودیت‌ها می‌توانند برای ارزیابی

کیلوات ساعت بر مترمربع است. طول ساعات آفتابی در آن از ۴/۷ ساعت در ماه‌های آذر و دی به ۱۲ ساعت در ماه‌های مرداد و شهریور می‌رسد (Bahrami and Abaspour sani., 2010).

### محاسبه نیاز آبی

تبخیر و تعرق مرجع  $ET_0$  را به روش فائو-پنمن-مانتیث و با در نظر گرفتن متوسط داده‌های اقلیمی روزانه از جمله تابش خورشیدی، دما، رطوبت، و سرعت باد از طریق رابطه زیر محاسبه می‌توان محاسبه کرد (Allen et al., 1998):

$$ET_0 = \frac{0.48\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1+0.34u_2)} \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن  $\Delta$  شیب منحنی فشار بخار،  $R_n$  تابش خالص روزانه در سطح محصول،  $G$  چگالی شار گرمایی خاک،  $\gamma$  ثابت سایکرومتری،  $e_s$  فشار بخار اشباع،  $e_a$  فشار بخار واقعی متوسط روزانه و  $U_2$  متوسط سرعت باد در روز است. بر اساس داده‌های ساعتی از پارامترهای مربوطه، می‌توان نیاز آب ساعتی را برای بازه‌های یک ساعته با استفاده از معادله (۱) محاسبه کرد. تبخیر و تعرق در شرایط استاندارد کشت و کار، از مقدار مرجع بر اساس محصول در حال رشد، شرایط آب و هوایی، و پارامترهای مشخصه خاک و مرحله رویشی برآورد می‌شود. با در نظر گرفتن ضریب محصول، تبخیر و تعرق از رابطه زیر بدست می‌آید (Alizadeh., 2003):

$$ET_C = K_C ET_0 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن  $K_C$  ضریب محصول است و بسته به فاز رشد محصول از ۰/۴ تا ۰/۹ متغیر است. در این تحقیق ضریب محصول مقدار حداکثر (۰/۹) در نظر گرفته شد. آب روزانه مورد نیاز محصول به میلی‌متر در روز را می‌توان با در نظر گرفتن تبخیر و تعرق و بارش مؤثر و تفاضل آن‌ها از هم برآورد کرد (Alizadeh et al., 2002).

### تعیین اندازه پنل خورشیدی

در یک سامانه پمپاژ خورشیدی ظرفیت اسمی یا توان بیشینه مولد PV مورد نیاز تحت شرایط استاندارد به‌صورت زیر قابل محاسبه است (Glasnovic & Margeta., 2007):

$$(\text{رابطه ۳})$$

$$P_{el} = 1000 \left[ \eta_U \eta_W \eta_{MP} \left( 1 - \beta_p (T_c - T_r) \right) \right]^{-1} \left( \frac{E_H}{H_t} \right)$$

که در آن  $\eta_U, \eta_W, \eta_{MP}, \beta_p, T_c, T_r, \bar{H}_t, E_H$  به ترتیب متوسط توان مصرفی روزانه، تابش روزانه بر سطح پنل، دمای مرجع، دمای پنل، ضریب دمایی پنل، راندمان موتور پمپ، راندمان سیم و اتصالات و راندمان اینورتور است. در طول سال، ماهی که در آن تبخیر و تعرق بیشینه، بارش کمینه و به نحوی که بیشترین نیاز آبی وجود داشته باشد ماه بحرانی خواهد بود.

ترتیب از روابط ۱۷ و ۱۸ به دست می‌آید (Yesilata & Firatoglu., 2008):

$$H = r_t \bar{H} \quad (\text{رابطه ۱۳})$$

$$r_t = (a + b \cos \omega) \left\{ \frac{(\pi/24)(\cos \omega - \cos \omega_s)}{\sin \omega_s - (\pi \omega_s / 180) \cos \omega_s} \right\} \quad (\text{رابطه ۱۴})$$

$$a = 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (\text{رابطه ۱۵})$$

$$b = 0.6609 - 0.47676 \sin(\omega_s - 60^\circ) \quad (\text{رابطه ۱۶})$$

$$\omega = (t - t_0) * 15^\circ \quad (\text{رابطه ۱۷})$$

$$\cos \omega_s = -\tan \phi \tan \delta \quad (\text{رابطه ۱۸})$$

$$(\text{رابطه ۱۹})$$

$$H_d = R_d \bar{H} (1.391 - 3.560 \bar{K}_t + 4.189 \bar{K}_t^2 - 2.137 \bar{K}_t^3), \quad \omega_s \leq 81.4$$

$$H_d = R_d \bar{H} (1.311 - 3.022 \bar{K}_t + 3.427 \bar{K}_t^2 - 1.821 \bar{K}_t^3), \quad \omega_s > 81.4$$

عوامل مؤثر بر شیب برای پرتو  $R_b$  و منتشر  $R_d$  تابش

توسط تعریف شده است.

$$R_b = \frac{\cos(\phi - \beta) \cos \delta \cos \omega + \sin(\phi - \beta) \sin \delta}{\cos \phi \cos \delta \cos \omega + \sin \phi \sin \delta} \quad (\text{رابطه ۲۰})$$

$$R_d = \frac{1 + \cos \beta}{2} \quad (\text{رابطه ۲۱})$$

برای تعیین اندازه سامانه فتوولتاییک داده‌های دما، رطوبت نسبی، تابش و سرعت باد از سازمان هواشناسی تهیه گردید و تبخیر و تعرق با استفاده از مدل پنمن-مانتیت برای کل دوره آماری مورد بحث (روزانه، ماهانه و سالانه) و با استفاده از نرم‌افزار اکسل محاسبه شد. همچنین با استفاده از داده میانگین دما، تابش، حجم آب موردنیاز روزانه، زاویه پنل، لحاظ نمودن راندمان اجزای سامانه (راندمان پنل، الکتروپمپ، اینورتر، کنترل شارژ، سیم و اتصالات و ...) و با کمک نرم‌افزار PVsyst (نسخه ۶٫۶٫۷) کمینه ظرفیت پنل موردنیاز، توان در دسترس روزانه در ماه بحرانی (و در نتیجه توان و دبی پمپ موردنیاز) و میزان کل توان تولیدی طی ماه‌های مختلف محاسبه گردید. لازم به ذکر است که نیاز آبی در این تحقیق برای باغ یک هکتاری هلو و با آبیاری قطره‌ای با تامین انرژی مورد نیاز یک پمپ AC مد نظر قرار گرفت. همچنین نیاز آبی محصول مذکور در منطقه کرج بصورت کلی حدود ۹۰۰۰ متر مکعب در سال می باشد (Anonymous, 2016).

## نتایج و بحث

### تبخیر و تعرق مرجع

یکی از راه‌های تعیین نیز آبی گیاهان اندازه گیری تبخیر و تعرق مرجع با استفاده از روابط و مدل های محاسبه تبخیر و تعرق می باشد. مدل فائو پنمن مانیتیت معتبرترین مدل در این زمینه محسوب می گردد. لذا با استفاده از مدل مذکور محاسبه تبخیر و

اندازه مطلوب مولد PV با استفاده از معادله (۵) مورد استفاده قرار گیرند. در معادله (۶) اولین محدودیت موجود اطمینان از کفایت مولد PV برای تامین انرژی هیدرولیکی متوسط ماهانه موردنیاز برای هر ماه می‌باشد. محدودیت دوم اجتناب از برآورد بیش از اندازه مولد PV می‌باشد. متوسط انرژی ماهانه تولید شده در دسترس برای پمپاژ آب  $E_A(i)$  توسط معادله (۷) محاسبه می‌شود (El-Shimy, 2013).

(رابطه ۷)

$$E_A(i) = S n_U n_W n_{MP} n_r (1 - \beta_p (T_c(i) - T_r)) \bar{H}_t(i)$$

که در آن S مساحت کل پنل خورشیدی است که بصورت  $S = mA$  بیان می‌شود. تعداد ماژول‌ها به صورت  $m = P_{el} / P_{Module}$  تعریف شده است، که باید به بزرگ‌ترین عدد صحیح تقریب شود (Glasnovic & Margeta., 2007).

### مدل سازی انرژی خورشیدی

برآورد توان خورشیدی روزانه از یک سامانه PV به مدل سازی و تعیین برخی پارامترها از جمله دمای پنل، ضریب تصحیح زاویه پنل، تابش روزانه و غیره نیاز دارد که در ادامه مورد بحث قرار می‌گیرد.

تابش کلی روزانه  $\bar{H}_t$  بر صفحه PV برابر است با مجموع تابش ساعتی روزانه  $H_t$  که بصورت  $\bar{H}_t = \sum H_t$  قابل محاسبه است. تخمین  $H_t$  در گرو تعیین  $H_d$  و  $H_b$  در سطح افقی برای همه ساعات یک روز است. تابش ساعتی  $H_b$ ، در سطح افقی، توسط رابطه (۸) نشان داده شده است. در رابطه (۱۰) معادله (۹) تعریف می‌شود (Collares-Pereira & Rabl., 1979):

$$H_b = H - H_d \quad (\text{رابطه ۸})$$

$$H_t = H_b R_b + H_d R_d + H \alpha \left( \frac{1 - \cos \beta}{2} \right) \quad (\text{رابطه ۹})$$

که در آن  $R_b$  و  $R_d$  به ترتیب عوامل شیب مؤثر بر برای تابش و انتشار می‌باشند. دمای متوسط ماژول فتوولتاییک از رابطه زیر قابل محاسبه است (Yesilata & Firatoglu., 2008):

$$T_c = \frac{T_a + (219 + 832 \bar{K}_t) C_f (NOCT - 20)}{800} \quad (\text{رابطه ۱۰})$$

که در آن  $C_f$  فاکتور تصحیح برای برشمردن تأثیر زاویه خارج از حد بهینه مولد PV در درجه حرارت ماژول‌های PV است. زاویه مطلوب یک مولد PV و زاویه تمایل به ترتیب توسط معادلات (۱۲) و (۱۳) تعریف می‌شود (Castaner & Silvestre., 2002):

$$\beta^* = \phi - \delta \quad (\text{رابطه ۱۱})$$

$$\delta = 23.45 \sin \left( 2\pi \left( \frac{184 + n}{365} \right) \right) \quad (\text{رابطه ۱۲})$$

زاویه ساعت خورشیدی  $\omega$  و زاویه غروب خورشید  $\omega_s$  به



میزان ۷/۰۲ میلی‌متر بوده است. بیشترین و کمترین مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده به ترتیب ۷/۹۷ و ۰/۵۹ در جولای ۲۰۱۴ و ژانویه ۲۰۰۹ رخ داده است. البته لازم به یادآوری است که در ماه‌های سرد سال و از نوامبر تا آوریل به دلیل سردی هوا و نیز وقوع بارندگی برای محصولات زراعی و به‌ویژه باغی نیاز آبی وجود ندارد.

تعرق و نیاز آبی و در ادامه انرژی هیدرولیکی مورد نیاز ماهانه به عنوان مبنای تعیین اندازه پنل خورشیدی مد نظر قرار گرفت. تبخیر و تعرق مرجع در یک دوره ده‌ساله و طی ماه‌های مختلف محاسبه گردید که در جدول (۱) نشان داده شده است. همان‌طوری که در جدول مشخص است بیشینه تبخیر و تعرق مرجع با اختلافی اندک در ماه‌های ژوئن و جولای رخ داده است. بیشینه میانگین روزانه طی دوره ده ساله در ماه جولای و به

جدول ۱. برآورد تبخیر و تعرق مرجع میانگین (mm) روزانه ماه‌های مختلف سال طی یک دوره ده ساله (مدل فائو پنمن مانیتث) - کرج

| ماه/سال | ۲۰۰۵ | ۲۰۰۶ | ۲۰۰۷ | ۲۰۰۸ | ۲۰۰۹ | ۲۰۱۰ | ۲۰۱۱ | ۲۰۱۲ | ۲۰۱۳ | ۲۰۱۴ | میانگین |
|---------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|---------|
| ژانویه  | ۱    | ۰/۹۲ | ۰/۸۹ | ۰/۷۶ | ۰/۵۹ | ۱/۴۱ | ۰/۸۸ | ۱/۲۵ | ۱/۴  | ۱/۴۳ | ۱/۰۵    |
| فوریه   | ۱/۵۴ | ۲/۱۷ | ۱/۲۹ | ۲/۲  | ۱/۹  | ۱/۸  | ۱/۷  | ۱/۵۲ | ۲    | ۱/۶۵ | ۱/۷۷    |
| مارس    | ۲/۵  | ۲/۳۱ | ۳/۶۴ | ۳/۴۷ | ۳/۰۶ | ۲/۷  | ۲/۴۸ | ۲/۸۹ | ۲/۹۵ | ۳/۱  | ۱/۹۱    |
| آوریل   | ۳/۸۷ | ۴/۰۲ | ۵/۴۹ | ۵/۰۱ | ۴/۵۵ | ۴/۸۷ | ۵/۴۴ | ۵/۰۶ | ۴/۶  | ۴/۶۴ | ۴/۷۵    |
| می      | ۴/۶۶ | ۴/۲۷ | ۶/۱۸ | ۵/۶۸ | ۵/۷  | ۵/۳  | ۵/۸  | ۶/۰۳ | ۵/۱۴ | ۵/۹۹ | ۵/۴۷    |
| ژوئن    | ۶/۰۷ | ۶/۱۱ | ۷/۱۴ | ۶/۷۳ | ۶/۰۱ | ۶/۸  | ۷/۶۴ | ۷/۶۹ | ۷/۳۸ | ۷/۵۲ | ۶/۹۱    |
| جولای   | ۳/۸۵ | ۵/۷۴ | ۷/۲۶ | ۷/۶۶ | ۷/۱۱ | ۷/۶۸ | ۷/۸۵ | ۷/۵۳ | ۷/۶۳ | ۷/۹۷ | ۷/۰۲    |
| آگوست   | ۶/۰۷ | ۵/۲۹ | ۶/۲۹ | ۶/۲۱ | ۶/۳۲ | ۶/۵۴ | ۶/۴۵ | ۶/۱۳ | ۵/۸۸ | ۷/۰۸ | ۶/۲۲    |
| سپتامبر | ۴/۶۷ | ۳/۶۱ | ۴/۶۸ | ۴/۸  | ۴/۷۷ | ۴/۶۷ | ۵/۰۸ | ۴/۷۱ | ۵/۴۹ | ۵/۴۲ | ۴/۷۹    |
| اکتبر   | ۲/۸۹ | ۲/۸۴ | ۲/۹۲ | ۳/۲۱ | ۲/۸۷ | ۳/۲  | ۳/۱۸ | ۲/۴۵ | ۲/۵۶ | ۲/۹۶ | ۲/۹     |
| نوامبر  | ۱/۴۱ | ۱/۶۱ | ۱/۳۵ | ۱/۴۳ | ۱/۳۱ | ۱/۲۱ | ۱/۰۸ | ۱/۴۳ | ۱/۲۸ | ۱/۵  | ۱/۳۶    |
| دسامبر  | ۰/۶۷ | ۰/۷۸ | ۱/۰۴ | ۰/۷۲ | ۰/۹۶ | ۱/۰۳ | ۱/۰۹ | ۰/۸۴ | ۱/۰۹ | ۱/۱۶ | ۰/۹۳    |
| میانگین | ۳/۸۴ | ۳/۲۶ | ۳/۳  | ۴/۰۱ | ۳/۹۹ | ۳/۷۶ | ۳/۹۳ | ۳/۹۶ | ۳/۹۵ | ۴/۲  | ۳/۸۴    |

اندازه مولد PV مورد نیاز سامانه آبیاری خواهد داشت و ماه‌های بحرانی در طراحی و انتخاب ظرفیت پنل و پمپ محسوب می‌گردند.

#### ارزیابی نیاز آبی

به‌طور کلی نیاز آبی تفاضل تبخیر و تعرق و بارش می‌باشد. بیشترین و کمترین میزان بارش منطقه مورد مطالعه به ترتیب در ماه‌های مارس و ژوئن به میزان ۴۸/۹ و ۱ میلی‌متر می‌باشد. با توجه به مقدار ناچیز بارش ماه‌های گرم سال بیشینه‌ی نیاز آبی در فصل تابستان رخ داد. لذا پارامترهای جوی و به‌تبع آن نیاز آبی ماه‌های گرم سال در تعیین اندازه پمپ و آرایه فتوولتائیک نقش مهم و کلیدی دارد.

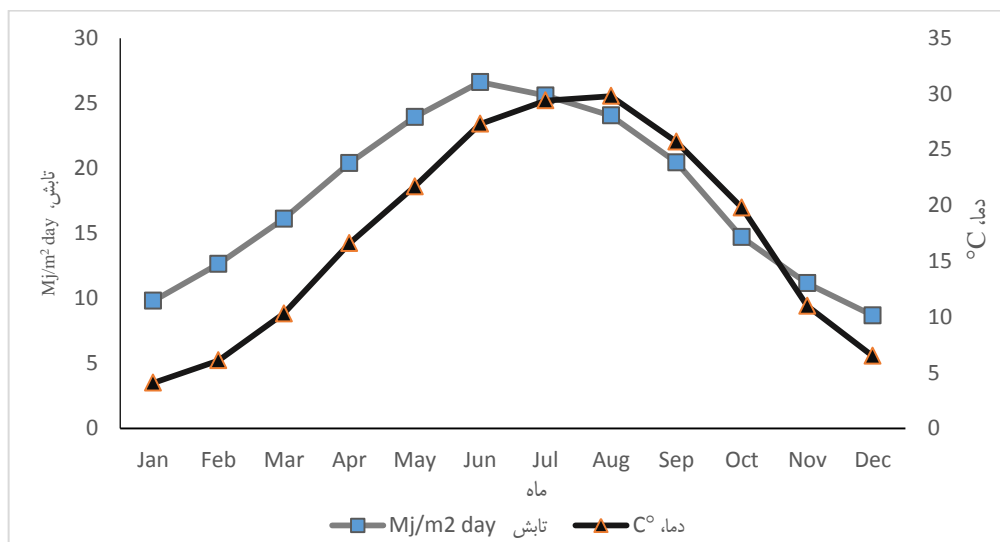
متوسط نیاز آبی روزانه طی ماه‌های مختلف سال در شکل (۴) ارائه شده است. با توجه به مطالب ذکر شده، بالاترین مقدار تبخیر و تعرق در طول پر آفتاب‌ترین و گرم‌ترین ماه از سال (جولای) به اوج خود می‌رسد در حالی که بالاترین مقدار بارش در فصل سرد سال و ماه مارس رخ می‌دهد. فصل آبیاری برای این مطالعه حدود شش ماه و از اواسط آوریل تا اواسط اکتبر

#### ارزیابی تابش خورشیدی

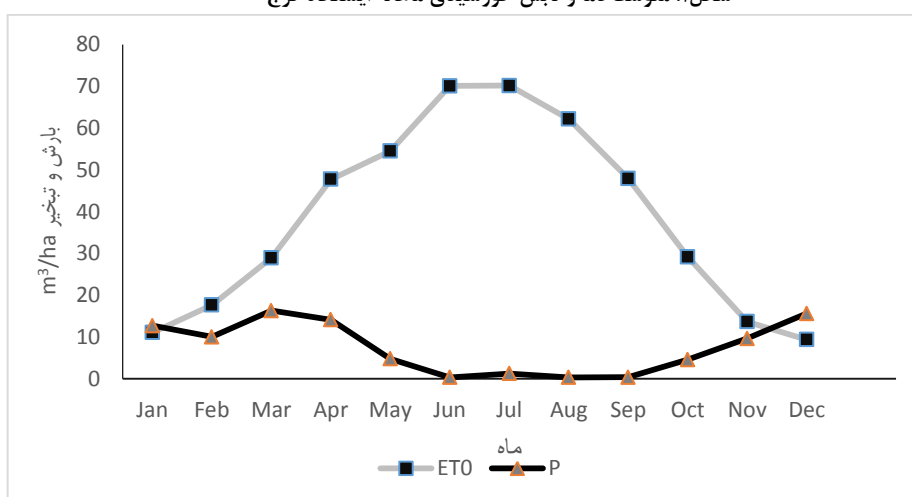
در شکل (۱) میانگین تابش خورشیدی و دمای هوا در ماه‌های مختلف سال نشان داده شده است. بیشترین و کمترین تابش خورشیدی به ترتیب در ماه‌های ژوئن و دسامبر رخ داده است. با توجه به شکل (۱) بیشترین و کمترین میانگین دما به ترتیب مربوط به ماه‌های جولای و دسامبر است. در شکل (۲) میانگین تبخیر و تعرق مرجع و دمای ماه‌های مختلف سال نشان داده شده است. با توجه به شکل (۱) و شکل (۲) بیشینه تابش و دما و نیز کمینه بارش و به تبع آن رطوبت نسبی هوا در ماه‌های گرم سال رخ می‌دهد که عوامل مهم تأثیرگذار بر تبخیر و تعرق محسوب می‌شوند. تابش بالاتر منجر به تولید بیشتر توان در پنل‌های خورشیدی نیز می‌گردد. در شکل (۳) متوسط ساعات آفتابی و غیر آفتابی روزانه نشان داده شده است. با توجه به این شکل کمترین ساعات غیر آفتابی و به عبارتی بیشترین ساعات آفتابی در ماه‌های ژوئن تا سپتامبر رخ داده است. با توجه موارد ذکر شده می‌توان گفت میزان تابش، ساعات آفتابی و تبخیر و تعرق ماه‌های ژوئن و جولای نقش مهم و کلیدی در تعیین

طول ماه‌های باقی‌مانده کاهش می‌یابد. حداقل نیاز آب روزانه برآورد شده برای این دوره در ماه اکتبر و با مقدار موردنیاز ۲۴/۵ مترمکعب در هکتار بوده است.

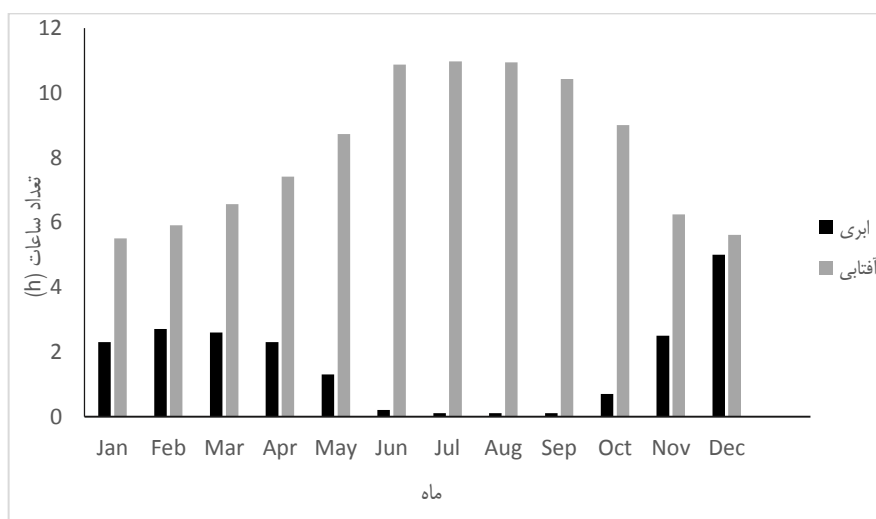
می‌باشد. در این مطالعه مساحت موردنظر برای آبیاری ۱ هکتار در نظر گرفته شد. روند نیاز آبی نشان می‌دهد که اوج نیاز روزانه آن در ماه جولای با حدود ۷۰ مترمکعب در هکتار بوده و در



شکل ۱. متوسط دما و تابش خورشیدی ماهانه ایستگاه کرج

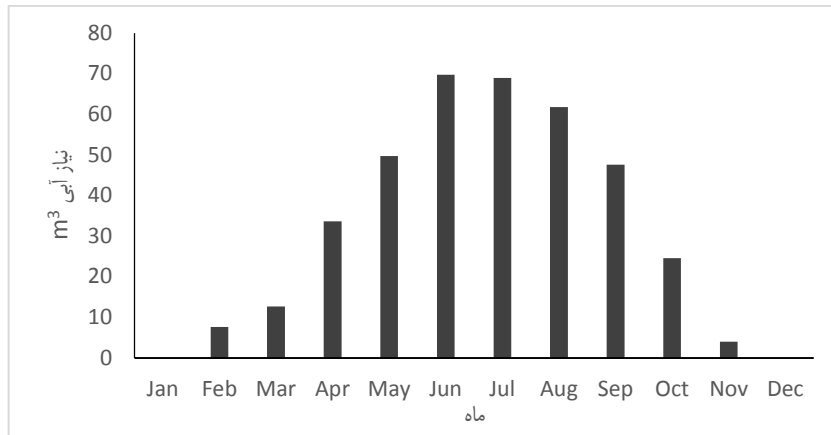


شکل ۲. میانگین بارش روزانه و تبخیر و تعرق مرجع ماه‌های مختلف (m³/ha) - ایستگاه کرج



شکل ۳. متوسط ساعات آفتابی و غیر آفتابی روزانه (در طول روز) - ایستگاه کرج





شکل ۴. نمودار میانگین نیاز آبی روزانه - ایستگاه کرج

است، لذا این ماه به عنوان ماه طراحی انتخاب شد. با توجه به برآورد نیاز آبی، در ماه بحرانی روزانه نزدیک به ۷۰ مترمکعب آب مورد نیاز است. اوج توان آرایه PV بر اساس انرژی هیدرولیکی روزانه مورد نیاز برای رسیدن به ارتفاع پمپاژ ۳۰ متر و تابش خورشیدی متوسط روزانه طی ماه بحرانی برآورد شد. در نتیجه انرژی هیدرولیکی مورد نیاز ۵/۹۱ کیلووات ساعت در روز و تابش نور خورشید روزانه در طی ماه جولای به طور متوسط ۷ کیلووات ساعت بر مترمربع است. تعیین اندازه اوج توان آرایه PV تحت تأثیر راندمان کنترل شارژ، اینورتر، الکترو پمپ، سیم کشی و نیز تلفات توان ماژول PV ناشی از تغییرات دما نیز می باشد. با در نظر گرفتن راندمان ۴۰ درصدی الکترو پمپ و ۹ ساعت کار روزانه در ماه بحرانی (جولای) به ۲۰/۵ کیلووات ساعت توان الکتریکی در روز نیاز خواهد بود. در این تحقیق به دلیل ماهیت سامانه های آبیاری و عملیات پمپاژ (قابل تعویق بودن آبیاری و یا امکان ذخیره آب در مخزن) ولتاژ مدار ۲۴ ولت با دو عدد باتری ۱۲ ولت با ظرفیت ۱۰۰ Ah و اینورتر با توان نامی چهار کیلووات و راندمان مناسب (موج سینوسی کامل با حداقل راندمان ۹۰٪) و نیز شارژ کنترلر چهار کیلووات مد نظر قرار گرفت. نتایج برآورد سامانه در جدول های (۴) و (۵) نشان داده شده است. همانطوری که در جدول ۴ مشخص است تعیین اندازه پنل بنحوی صورت گرفت که تامین انرژی سامانه در ماه جولای به عنوان ماه بحرانی صورت گیرد. بدیهی است که تامین انرژی در ماه بحرانی تضمین کننده تامین انرژی در سایر ماهها خواهد بود. این امر منطبق بر تحقیقات پیشین در این زمینه می باشد که توسط (El-Shimy, 2013) انجام شد.

جدول ۳. مشخصات و پارامترهای سامانه آبیاری خورشیدی برآورد شده

| پارامتر                           | اندازه                                     |
|-----------------------------------|--|
| نیاز آبی بیشینه                   | ۶۹/۹۵ متر مکعب در روز                      |
| سطح مورد نظر                      | ۱ هکتار                                    |
| ساعات کاری روزانه                 | ۹ (حداکثر ساعت کارکرد در ماه های اوج مصرف) |
| مجموع ارتفاع دینامیکی             | ۳۰ متر                                     |
| توان پمپ                          | ۲۲۰۰ وات                                   |
| میانگین تابش روزانه در ماه بحرانی | ۷ کیلووات ساعت در روز                      |
| اوج توان سامانه                   | ۳۲۲۲ وات                                   |
| سطح پنل ها                        | ۲۲ مترمربع                                 |
| مدل پنل مورد نظر                  | YL300P-35b                                 |
| شرکت سازنده                       | Yingly solar                               |
| توان بیشینه هر پنل                | ۳۰۰ وات                                    |
| تعداد پنل                         | ۱۱   |

تعیین اندازه سامانه

برای مشخص شدن و بیان بهتر اهمیت تابش خورشیدی و نیاز آبی روزانه، نسبت بین تابش خورشیدی و نیاز آبی در جدول (۲) برای ماه های مختلف از آوریل تا اکتبر نشان داده شده است. با توجه به اینکه تابش بالاتر منجر به تولید بیشتر انرژی توسط پنل های خورشیدی می شود و از طرفی میزان تبخیر و تعرق و به تبع آن نیاز آبی را افزایش می دهد، نسبت بین تابش خورشیدی و نیاز آبی می تواند در تعیین اندازه بهینه سامانه PV نقش تعیین کننده ای داشته باشد. لذا اندازه سامانه بر اساس سناریوی بدترین ماه و با کمترین مقدار نسبت بین میانگین ماهانه تابش خورشیدی روزانه به میانگین روزانه نیاز آبی مشخص گردید، همان طور که در جدول (۲) نشان داده شده ماه جولای دارای کمترین نسبت بین تابش خورشیدی به نیاز آبی

جدول ۴. نسبت بین تابش خورشیدی و نیاز آبی

| پارامترها                                  | آوریل | می    | ژوئن  | جولای | اگوست | سپتامبر | اکتبر |
|--|-------|-------|-------|-------|-------|---------|-------|
| تابش خورشیدی روزانه kWh/m <sup>2</sup> day | ۵/۶۶  | ۶/۶۵  | ۷/۳۹  | ۷/۱۱  | ۶/۶۸  | ۵/۶۸    | ۴/۰۸  |
| نیاز آبی روزانه m <sup>3</sup> /ha day     | ۳۳/۶۷ | ۴۹/۷۳ | ۶۹/۷۵ | ۶۸/۹۵ | ۶۱/۸۲ | ۴۷/۵۵   | ۲۴/۵۵ |
| نسبت تابش به نیاز آبی                      | ۰/۱۶۸ | ۰/۱۳۳ | ۰/۱۰۵ | ۰/۱۰۳ | ۰/۱۰۸ | ۰/۱۱۹   | ۰/۱۶۶ |

پنل ۳۲۲۲ وات، با سطح ۲۲ مترمربع و توان پمپ سانتریفیوژ ۲۲۰۰ وات برآورد گردید. در ماه جولای انرژی تولیدی پنل‌ها با انرژی موردنیاز پمپ برابر خواهد بود لذا تمامی انرژی موردنیاز در ماه بحرانی توسط پنل‌ها تولید خواهد شد. بنابراین در سایر ماه‌ها انرژی مازاد وجود داشت. مقدار انرژی مازاد در ماه‌های تابستان ناچیز، و در ایام سرد سال به دلیل عدم وجود نیاز آبی تمامی انرژی تولیدی مازاد خواهد بود و می‌توان برای سایر مصارف استفاده نمود. با توجه به جدول (۵) کمترین و بیشترین انرژی مازاد به ترتیب مربوط به ماه‌های جولای و مارس با ۰ و ۱۶/۳ کیلووات ساعت در روز خواهد بود. همچنین کل انرژی موردنیاز پمپ، کل انرژی تولیدی پنل و کل انرژی مازاد در سال به ترتیب ۳۱۲۹، ۶۰۹۷ و ۲۹۶۷ کیلووات ساعت خواهد بود.

اندازه بهینه پنل موردنیاز سامانه آبیاری موردنظر بر اساس اطلاعات طول و عرض جغرافیایی، ارتفاع نهایی پمپاژ، طول خط لوله از محل پمپاژ تا مخزن، قطر لوله، میانگین تابش ماهانه، نیاز آبی، راندمان اجزای سامانه، میانگین دمای ماهانه محاسبه گردید. در واقع در برآورد و تعیین اندازه سامانه، با در نظر گرفتن میزان تابش خورشیدی، میانگین دما و سرعت متوسط باد در ماه‌های مختلف به عنوان داده‌های اقلیمی، انرژی هیدرولیکی مورد نیاز ماهانه به عنوان بار سامانه، نوع و راندمان کلی و گرمایی پنل، حداقل راندمان اینوتر و شارژ کنترلر به عنوان مشخصات اجزای سامانه مورد نظر و با استفاده از نرم افزار PVsyst حداقل ظرفیت پنل مورد نیاز برآورد گردید. در این برآورد عمر سامانه ۲۰ سال در نظر گرفته شد. علاوه بر مطالب ذکر شده در نهایت با توجه به نتایج بدست آمده و همان‌گونه که در جدول (۳) نشان داده شده است کمینه توان نامی موردنیاز

جدول ۵. میزان پتانسیل تولید انرژی، انرژی مورد نیاز و مازاد در سال

| ماه     | تابش kWh/m <sup>2</sup> day | در دسترس kWh/m <sup>2</sup> day | موردنیاز kWh/m <sup>2</sup> day | مازاد kWh/m <sup>2</sup> day | پمپ کردن m <sup>3</sup> /day | مازاد در ماه kWh | دسترس در ماه kWh | استفاده پمپ kWh |
|---------|-----------------------------|---------------------------------|---------------------------------|------------------------------|------------------------------|------------------|------------------|-----------------|
| ژانویه  | ۴/۲                         | ۱۲/۱                            | ۰                               | ۱۲/۱                         | ۰                            | ۳۷۳              | ۳۶۳              | ۰               |
| فوریه   | ۵                           | ۱۴/۴                            | ۰                               | ۱۴/۴                         | ۰                            | ۴۳۲              | ۴۳۲              | ۰               |
| مارس    | ۵/۶                         | ۱۶/۳                            | ۰                               | ۱۶/۳                         | ۰                            | ۴۸۹              | ۴۸۹              | ۰               |
| آوریل   | ۶/۳                         | ۱۸/۱                            | ۹/۸                             | ۸/۳                          | ۳۳/۷                         | ۲۴۹              | ۵۴۳              | ۲۹۴             |
| می      | ۶/۵                         | ۱۸/۹                            | ۱۴/۵                            | ۴/۵                          | ۴۹/۴                         | ۱۳۵              | ۵۶۷              | ۴۳۲             |
| ژوئن    | ۶/۸                         | ۲۰/۵                            | ۲۰/۴                            | ۰/۱                          | ۶۹/۳                         | ۳                | ۶۱۵              | ۶۱۲             |
| جولای   | ۶/۷                         | ۲۰/۵                            | ۲۰/۵                            | ۰                            | ۷۰                           | ۰                | ۶۱۵              | ۶۱۵             |
| آگوست   | ۶/۹                         | ۲۰                              | ۱۸/۱                            | ۱/۹                          | ۶۲/۵                         | ۵۷               | ۶۰۰              | ۵۴۳             |
| سپتامبر | ۶/۸                         | ۱۹/۸                            | ۱۳/۹                            | ۵/۹                          | ۴۷/۵                         | ۱۷۷              | ۵۹۴              | ۴۱۷             |
| اکتبر   | ۵/۸                         | ۱۶/۸                            | ۷/۲                             | ۹/۶                          | ۲۴/۵                         | ۲۸۸              | ۵۰۴              | ۲۱۶             |
| نوامبر  | ۴/۹                         | ۱۴/۱                            | ۰                               | ۱۴/۱                         | ۰                            | ۴۲۳              | ۴۲۳              | ۰               |
| دسامبر  | ۴/۱                         | ۱۱/۷                            | ۰                               | ۱۱/۷                         | ۰                            | ۳۵۱              | ۳۵۱              | ۰               |
| جمع     |                             |                                 |                                 |                              |                              | ۲۹۶۷             | ۶۰۹۶             | ۳۱۲۹            |

## نتیجه‌گیری

هدف این تحقیق ارائه روشی برای طراحی سامانه‌های فتوولتائیک پمپاژ آب با ترکیب مدل‌های نیاز آب و انرژی خورشیدی است. در این مطالعه از داده‌های هواشناسی ایستگاه کرج شامل دما، رطوبت نسبی، سرعت باد و تابش برای برآورد نیاز آبی و توان خورشیدی استفاده شده است. به صورت خلاصه نتایج به دست آمده به صورت زیر می‌باشد:

بیشینه تبخیر و تعرق مرجع با اختلافی اندک در ماه‌های ژوئن و جولای رخ داده است. بیشینه میانگین روزانه طی دوره ده ساله در ماه جولای و به میزان ۷/۰۲ میلی‌متر بوده است. بیشترین و کمترین مقدار تبخیر و تعرق محاسبه شده به ترتیب ۷/۹۷ و ۰/۵۹ در جولای ۲۰۱۴ و ژانویه ۲۰۰۹ رخ داده است.

۲- میانگین تابش خورشیدی و دمای هوا در ماه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. بیشترین و کمترین تابش خورشیدی به ترتیب در ماه‌های ژوئن و دسامبر و بیشترین و کمترین میانگین دما به ترتیب مربوط به ماه‌های جولای و

۱- تبخیر و تعرق مرجع در یک دوره ده ساله و طی

ماه‌های مختلف محاسبه گردید. با توجه به نتایج به دست آمده

(۳) نشان داده شده است کمینه توان نامی موردنیاز پنل ۳۲۲۲ وات، با سطح ۲۲ مترمربع و توان پمپ سانتریفیوژ ۲۲۰۰ وات برآورد گردید.

۶- با توجه به نتایج بدست آمده کمترین و بیشترین انرژی برق مزاد به ترتیب مربوط به ماههای جولای و مارس با ۰ و ۱۶/۳ کیلووات ساعت در روز، و کل انرژی موردنیاز پمپ، انرژی تولیدی پنل و انرژی مزاد در سال به ترتیب ۳۱۲۹، ۶۰۹۷ و ۲۹۶۷ کیلووات ساعت خواهد بود.

### سپاسگزاری

نویسندگان بر خود لازم می‌دانند مراتب سپاسگزاری خود را از سازمان هواشناسی کشور که در تهیه آمار و داده‌های مورد نیاز این پژوهش همکاری نمودند اعلام نمایند.

دسامبر بود.

۳- بیشترین و کمترین میزان بارش منطقه مورد مطالعه به ترتیب در ماه‌های مارس و ژوئن به میزان ۴۸/۹ و ۱ میلی‌متر بود. با توجه به مقدار ناچیز بارش ماه‌های گرم سال بیشینه‌ی نیاز آبی در فصل تابستان رخ داد. لذا پارامترهای جوی و به تبع آن نیاز آبی ماه‌های گرم سال در تعیین اندازه پمپ و آرایه فتوولتائیک نقش مهم و کلیدی خواهد داشت.

۴- در این تحقیق مساحت مورد نظر برای آبیاری ۱ هکتار در نظر گرفته شد. روند نیاز آبی نشان می‌دهد که اوج نیاز روزانه آن در ماه جولای با حدود ۷۰ مترمکعب در هکتار بوده و در طول ماه‌های باقی‌مانده کاهش می‌یابد. حداقل نیاز آب روزانه برآورد شده برای این دوره در ماه اکتبر و با مقدار موردنیاز ۲۴/۵ مترمکعب در هکتار بوده است.

۵- علاوه بر مطالب ذکر شده و همان‌گونه که در جدول

### علائم و اختصارات

| نماد        | تعریف   | نماد        | تعریف  |
|-------------|---|-------------|--|
| $e_s$       | فشار بخار اشباع (kpa)                             | $R_d$       | فاکتور شیب مؤثر بر بازتاب                              |
| $e_a$       | فشار بخار واقعی متوسط روزانه (kpa)                | $R_b$       | فاکتور شیب مؤثر بر تابش                                |
| $E_A$       | میانگین توان تولیدی روزانه (kWh/day)              | $R_n$       | تابش خالص روزانه در سطح محصول ( $Mj/m^2 \text{ day}$ ) |
| $G$         | چگالی شار گرمایی خاک ( $Mj/m^2 \text{ day}$ )     | $S$         | مساحت پنل ها ( $m^2$ )                                 |
| $g$         | شتاب ثقل ( $m/s^2$ )                              | $T_a$       | میانگین ماهانه دمای هوا ( $^{\circ}C$ )                |
| $ET_0$      | تبخیر و تعرق مرجع (mm)                            | $T_r$       | دمای مرجع ( $^{\circ}C$ )                              |
| $ET_c$      | تبخیر و تعرق محصول (mm)                           | $T_c$       | دمای پنل ( $^{\circ}C$ )                               |
| $E_H$       | متوسط انرژی مصرفی روزانه (kWh/day)                | $U_2$       | متوسط سرعت باد در روز (m/s)                            |
| $H_d$       | بخش بازتاب شده ی H                                | $\rho$      | چگالی آب ( $kg/m^3$ )                                  |
| $H_{TE}$    | ارتفاع پمپاژ (m)                                  | $\beta$     | زاویه پنل (درجه)                                       |
| $H_b$       | پرتو یا بخش مستقیم H                              | $\beta^*$   | زاویه بهینه پنل (درجه)                                 |
| $H$         | تابش ساعتی میانگین ماهانه بر سطح افق ( $kW/m^2$ ) | $\beta_p$   | ضریب دمایی پنل ( $^{\circ}C^{-1}$ )                    |
| $\bar{H}_t$ | تابش روزانه بر سطح پنل ( $kWh/m^2 \text{ day}$ )  | $\eta_i$    | راندمان اینورتر و کنترل شارژ                           |
| $H_t$       | تابش ساعتی بر روی صفحات خورشیدی ( $kW/m^2$ )      | $\eta_w$    | راندمان سیم و اتصالات                                  |
| $i$         | ترتیب ماه سال (۱=ژانویه)                          | $\eta_f$    | راندمان سامانه آبیاری (تلفات انرژی)                    |
| $\bar{K}_t$ | شاخص صاف بودن (بدون بعد)                          | $\eta_{MP}$ | راندمان موتور پمپ                                      |
| $K_c$       | ضریب محصول (بدون بعد)                             | $\eta_N$    | راندمان آبیاری (تلفات آب)                              |
| NOCT        | دمای کاری نامی سلول ( $^{\circ}C$ )               | $\eta_{eq}$ | راندمان سامانه پمپاژ PV                                |
| $P_{el}$    | ظرفیت اسمی یا توان بیشینه مولد (W)                | $\gamma$    | ثابت سایکرومتری ( $kpa/^{\circ}C$ )                    |
| $P_{Modul}$ | توان نامی مدول PV (W)                             | $T$         | دما ( $^{\circ}C$ )                                    |
| $Q_{dc}$    | نیاز آبی روزانه ( $m^3/day$ )                     | $\Delta$    | شیب منحنی فشار بخار ( $kpa/^{\circ}C$ )                |

## REFERENCES

- Alizadeh, A. (2003). *Water, Soil and Plant Relationship* (4th ed.). Mashhad. Imam Reza University Press. (In Farsi)
- Alizadeh, A. Kamali, GH. Khanjani, MJ. & Rahnavard MR. (2002). Evaluation of methods for estimation of evapotranspiration in arid regions of Iran. *Journal of Geography Research*. 73(1), 97-105. (In Farsi)
- Allen, R.G. Pereira, L.S. Raes, D. & Smith, M. (1998). *Crop Evapotranspiration: Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and Drainage Paper 56, Rome, Italy, 300 p.
- Anonymous. 2016. Agriculture Jihad Ministry of Iran. National Water document (NETWAT Software).
- Bouzi, B. Haddadi, M. & Belmokhtar, O. (2009). Assessment of a photovoltaic pumping system in the areas of the Algerian Sahara. *Renewable and sustainable energy reviews*, 13(4), 879-886.
- Bahrami, E. & Abaspour-Sani, K. (2010). Determination of the optimum tilt angle of solar array in Karaj climate conditions. *Iranian Journal of Energy*. 15(2), 37-44. (In Farsi)
- Bora, B. Prasad, B. Sastry, O. S. Kumar, A. & Bangar, M. (2017). Optimum sizing and performance modeling of Solar Photovoltaic (SPV) water pumps for different climatic conditions. *Solar Energy*. 155(1), 1326-1338.
- Campana, P. E. Li, H. & Yan, J. (2013). Dynamic modelling of a PV pumping system with special consideration on water demand. *Applied energy*. 112(1), 635-645.
- Castaner L, Silvestre S. (2002). *Modelling photovoltaic systems using PSpice*. (1st ed.). UK: Wiley.
- Chandel, S. S. Naik, M. N. & Chandel, R. (2017). Review of performance studies of direct coupled photovoltaic water pumping systems and case study. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 76(1), 163-175.
- Collares-Pereira, M. and Rabl, A. (1979). The average distribution of solar radiation correlation between diffuse and hemispherical and between daily and hourly insolation values. *Solar Energy*. 22 (2), 155-164.
- Deveci, O. Onkol, M. Unver, H. O. & Ozturk, Z. (2015). Design and development of a low-cost solar powered drip irrigation system using Systems Modeling Language. *Journal of Cleaner Production*. 102(2), 529-544.
- El-Shimy, M. (2013). Sizing optimisation of stand-alone photovoltaic generators for irrigation water pumping systems. *International Journal of Sustainable Energy*. 32(5), 333-350.
- Fedrizzi, M. C. Ribeiro, F. S. Zilles, R. (2009). Lessons from field experiences with photovoltaic pumping systems in traditional communities. *Energy Sust Dev*. 13(1), 64-70.
- Glasnovic, Z. & Margeta, J. (2007). A model for optimal sizing of photovoltaic irrigation water pumping systems. *Solar Energy*. 81 (7), 904-916.
- Hargreaves, G. H. (1994). Defining and using reference evapotranspiration. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*. 120(6), 1132-1139.
- Jafarkazemi, F. & Mardi, H. (2010). Study of solar Radiation Data at Synoptic Station of Islamic Azad University, South Tehran Branch. *Mechanical Engineering Journal*, 20(1), 68-75. (In Farsi)
- Kamel, S. & Dahl, C. (2005). The economics of hybrid power systems for sustainable desert agriculture in Egypt. *Energy*. 30 (8), 1271-1281.
- Sharifian, H. Ghahraman, B. Alizadeh, A & Mirlotfi, M. (2003). Evaluation of Different Radiation and Humidity Methods for Estimating of ET<sub>0</sub> and Analysis of Aridity Effects in Golestan Province. *Journal of Water and soil Science*. 19(2), 280-290. (In Farsi)
- Suzuki, M. (2015). Identifying roles of international institutions in clean energy technology innovation and diffusion in the developing countries: matching barriers with roles of the institutions. *Journal of Cleaner Production*. 98(1), 229-240.
- Wazed, S. M. Hughes, B. R. O'Connor, D. & Calautit, J. K. (2018). A review of sustainable solar irrigation systems for Sub-Saharan Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 81(1), 1206-1225.
- Xu, H. Liu, J. Qin, D. Gao, X. & Yan, J. (2013). Feasibility analysis of solar irrigation system for pastures conservation in a demonstration area in Inner Mongolia. *Applied energy*. 112(2), 697-702.
- Yesilata, B. & Firatoglu, Z.A. (2008). Effect of solar radiation correlations on system sizing: PV pumping case. *Renewable Energy*. 33 (1), 155-161.