

مطالعه تجربی آبیاری قطره‌ای مقیاس کوچک با استفاده از پمپ خورشیدی جابجایی مثبت در شرایط کوپل مستقیم

محمود چهارطاقی^۱

دانشیار

مهدی هدایت پور^۲

دانشجوی دکترا

مطالعه تجربی عملکرد پمپ جابجایی مثبت خورشیدی متصل به آبیاری قطره‌ای کوپل مستقیم، انجام گردید. مدل ریاضی برای پیش‌بینی عملکرد ارائه شد. تابش خورشید، دبی آب، فشار قطره چکان، دمای پنل، دمای محیط، جریان و ولتاژ خروجی از پنل خورشیدی به صورت بلادرنگ تعیین شد. دبی پمپ در یک روز، سه رفتار متفاوت نشان می‌دهد. دبی خروجی از پمپ پس از یک تابش آستانه در میانه روز، تقریباً ثابت است. مقدار دبی و فشار در صبح و عصر که شرایط تابش خورشید کم بوده، به ترتیب صعودی و نزولی می‌باشد. حداکثر مقدار دمای سطح پنل، برابر ۶۰٫۷ درجه سلسیوس می‌باشد.

واژه‌های راهنما: پمپ فتوولتاییک خورشیدی، آبیاری قطره‌ای، کوپل مستقیم، ضریب راس، دمای سطح پنل

۱- مقدمه

استفاده از توان فتوولتاییک برای آبیاری در زمان نیاز آبی کم با دیگر روش‌های تامین انرژی، قابل رقابت می‌باشد. نمونه‌های اولیه پمپ‌های فتوولتاییک از نوع پمپ‌های گریز از مرکز بودند که توسط موتورهای جریان مستقیم یا جریان متناوب حرکت داده می‌شدند. چندل و همکاران [۱] به بررسی مقالات در زمینه پمپ خورشیدی با کاربرد تامین آب شرب و آبیاری به صورت کوپل مستقیم پرداختند [۲]. راندمان هیدرولیکی این پمپ‌ها بین ۲۵ تا ۳۵ درصد است [۳]. در نمونه‌های بعدی سیستم پمپاژ خورشیدی از پمپ‌های جابجایی مثبت استفاده می‌شد که مشخصه کلی آن توان پایین، هزینه‌های کمتر و راندمان هیدرولیک بالای ۷۰ درصد بود. مونزر و همکاران [۴] به روشی برای طراحی سیستم پمپ خورشیدی با استفاده از ذخیره ساز باتری به منظور انتقال آب از چاه‌های عمیق برای تامین آب شرب شهر پرداختند. آمر و یونس [۵] به روشی بر اساس میانگین تابش ماهانه به منظور تخمین میزان دبی پمپ خورشیدی پرداختند. موکدم و همکاران [۶] عملکرد سیستم پمپ خورشیدی را با اتصال مستقیم پمپ جریان مستقیم به پنل خورشیدی بررسی کردند.

^۱ نویسنده مسئول، دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود chahartaghi@shahroodut.ac.ir

^۲ دانشجوی دکترا، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود m.hedayatpour@gmail.com

این سیستم بدون باتری و سیستم کنترل شارژ عمل می‌کند. راندمان موتور-پمپ از ۳۰ درصد بیشتر نگردید که برای سیستم‌های کوپل مستقیم متداول است. این سیستم برای عملکرد برای آبیاری با هد کم در مناطق دور دست مناسب می‌باشد. قطعاً عملکرد این سیستم‌ها با انتخاب مناسب اندازه‌ی پنل‌های خورشیدی و جهت‌یابی آن و همچنین سیستم مناسب موتور پمپ افزایش خواهد یافت. کو و همکاران [۷] روشی برای پیش‌بینی عملکرد پمپ در شرایط اتصال مستقیم بر اساس عملکرد طولانی مدت پرداختند. روش آرایه شده از اطلاعات سازندگان پنل و موتور-پمپ استفاده می‌کند.

پند و همکارانش [۸] سیستم پمپ فتوولتاییکی را توسعه دادند که به صورت آبیاری قطره‌ای عمل می‌کرد و در مناطق کم‌آب کاربرد داشت. آنها تاثیر پارامترهای طراحی را مانند اندازه‌ی پمپ، آب مورد نیاز، تغییرات روزانه خورشید و به تبع آن فشار سیستم بر روی قطره چکان را مورد بررسی قرار دادند. آنها گزارش کردند که با توان ۹۰۰ وات پنل خورشیدی، پمپ ۸۰۰ وات جریان مستقیم و موتور مونوبلاک می‌توان فشار بین ۷۰ الی ۱۰۰ کیلوپاسکال را با دبی ۳/۴ الی ۳/۸ لیتر بر ساعت در هر قطره چکان می‌توان ایجاد کرد. میزان عدم یکنواختی در مساحت یک هکتار در حدود ۹۲ الی ۹۶ درصد می‌باشد. پیشنهاد شده تا تست‌های کامل‌تر این روش با مخزن برداشت با هد مکش کم‌تر برای رشد محصولات دور از دسترس صورت گیرد.

گلاسنویچ و مارگتا [۹] بیان کردند که روش‌های مرسوم برای طراحی سیستم پمپ خورشیدی بر اساس انرژی هیدرولیک مورد نیاز و توان قابل تامین توسط انرژی خورشید روش بهینه‌ای نمی‌باشد. آنها تست خود را برای اثبات روش خود با در نظر گرفتن اثر آب و هوا، خاک، روش آبیاری محصول در دو شهر انجام دادند. حمیدات و همکاران [۱۰] بهینه‌سازی پمپ فتوولتاییکی با در نظر گرفتن مینیمم کردن تابع احتمال از دست دادن بار انجام دادند. این تحقیق به منظور تامین آب شرب روستای کوچک در الجزیره صورت گرفته است. در زمان استفاده از سیستم پمپ فتوولتاییکی به منظور تامین آب شرب، یکی از مسایل مهم، احتمال از دست دادن آب شرب برای ساکنین روستا می‌باشد. عموماً مسایل تامین آب شرب با استفاده از پمپ فتوولتاییکی را با در نظر گرفتن تابع هزینه بهینه می‌کنند. یداو و همکاران [۱۱] ادعا می‌کنند که روش‌های مرسوم در طراحی سیستم SPVWP منجر به خطایی در محاسبه طراحی بهینه می‌شود. آنها نشان دادند که با در نظر گرفتن هد موردنیاز کاربردی خورشیدی^۱ می‌توان ۹٪ از آب خروجی را افزایش داد.

عبدالله زاده و همکاران [۱۲] تاثیر اسپری نمودن آب را بر عملکرد سیستم در شرایط کاری مختلف بررسی کردند. در واقع با توجه به کاهش عملکرد پنل خورشیدی با افزایش دما، از این نقطه ضعف پنل‌های خورشیدی با اسپری کردن آب بر روی آن استفاده نمودند و راندمان کل سیستم را افزایش دادند. پمپ آب با دو و سه ماژول از پنل با توان ۲۲۵ وات با اسپری موازی مورد بررسی قرار گرفت. بررسی‌ها نشان داد در دمای بالای سلول خورشیدی مقدار راندمان افت می‌کند. به آروندرا و همکاران [۱۳] بررسی اثر هدهای فشار مختلف در فشارهای ۴، ۶، ۸ و ۱۰ بار بر روی دبی و عملکرد سیستم مورد بررسی قرار داد. نتایج نشان داد در اواسط روز میزان دبی خروجی پمپ در فشارهای مختلف تفاوت چندانی ندارد، اما در ساعات دیگر روز در فشار بالاتر میزان دبی آب کمتر بوده و در فشارهای کاری پایین‌تر میزان دبی افزایش می‌یابد. مقدار راندمان کل سیستم در فشار ماکسیمم بیشترین مقدار می‌باشد.

¹ Solar Operational Duty Head

ریکا و همکاران [۱۴] پیشنهادی برای سیستم پمپ خورشیدی با آبیاری قطره‌ای برای آبیاری زیتون در شرایط کمبود آبیاری پیشنهاد دادند. آنها مدل جدیدی برای پیش‌بینی نقطه آستانه شروع به کار پمپ ارایه نمودند [۱۵]. نیاجلیلی و همکاران [۱۶] مدل فنی-اقتصادی به منظور امکان‌سنجی استفاده از پمپ خورشیدی برای آبیاری برنج در استان گیلان انجام دادند.

بن قانم و همکاران [۱۷] مطالعه چیدمان پنل خورشیدی را بر عملکرد پمپ هلیکال درون چاهی رو بررسی نمود. در این بررسی از ۲۴ پنل خورشیدی با چیدمان مختلف استفاده و تاثیر آن را بر عملکرد پمپ هلیکال در آب و هوای مدینه بررسی نمود. بر اساس این مطالعه در شرایط استفاده از ۶ پنل سری به صورت ۴ خط موازی بهترین حالت بوده و قابلیت تولید ۲۲ مترمکعب آب در روز را دارد. منحنی توان و جریان-ولتاژ پنل‌ها در شرایط مختلف بدست آمده است. در این بررسی از پمپ خورشیدی صنعتی استفاده شده و بیان شده که در تابش‌های مختلف پمپ در بهینه‌ترین حالت آن است.

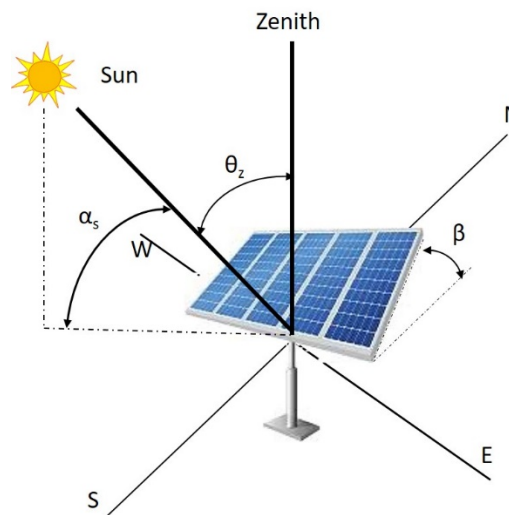
حمرونی و همکاران [۱۸] مدل‌سازی سیستم پمپ خورشیدی را با استفاده از پنل خورشیدی، مبدل ولتاژ جریان مستقیم و پمپ مغروق به صورت کوپل مستقیم و استفاده از مخزن ذخیره انجام دادند. نتایج بررسی آنها بر اساس داده‌های میدانی نشان داد زمانی که تابش در مقدار ماکسیمم قرار دارد، علاوه بر مقدار ماکسیمم دبی خروجی پمپ، سیستم دارای مقدار ماکسیمم راندمان می‌باشد. این مقدار ماکسیمم در میانه روز اتفاق می‌افتد، اما مقادیر دبی خروجی کم می‌گردد زمانی که پارامترهای هواشناسی دچار نوسان می‌گردند. چهارطاقی و هدایت پور [۱۹] به ارایه مدلی ریاضی برای شبیه‌سازی رفتار پمپ گریز از مرکز در زمان اتصال به شبکه آبیاری قطره‌ای به صورت کوپل مستقیم پرداختند. نیکزاد و همکاران [۲۰] در مطالعه دیگر توان و تعداد پنل مورد نیاز برای آبیاری برنج در شمال کشور بررسی کردند. ایده فروش برق در قالب قرارداد خرید برق تضمینی از لحاظ فنی-اقتصادی در زمانی که نیاز به آبیاری وجود ندارد ارایه نمودند.

در این تحقیق، ایده استفاده از پمپ‌های خورشیدی به عنوان روشی برای آبیاری مقیاس کوچک در مناطق جلگه‌ای شمال ایران به عنوان یک پتانسیل خوب مطرح بود. بنابراین روش‌هایی برای آشنایی با چگونگی و چرایی این روش آبیاری در محل مورد تست مورد ارزیابی قرار گرفته است. سنجش رفتار پمپ جابجایی مثبت در شرایط کوپل مستقیم به پنل خورشیدی و سیستم آبیاری قطره‌ای برای اولین بار در این تحقیق مورد ارزیابی قرار گرفت. از یک سو با توجه به مشخصه رفتاری پمپ جابجایی مثبت و استقلال هد پمپ از دبی آن، و از سوی دیگر تغییر میزان تابش خورشید در روز، تست‌هایی به منظور شناسایی سیستم و صحت‌سنجی مدل انجام شده است. بررسی تحقیقات گذشته در این زمینه نشان می‌دهد که کاربرد همزمان موضوع مدیریت منابع آب (سیستم آبیاری قطره‌ای) و استفاده از پمپ خورشیدی بسیار اندک می‌باشد. بیشتر مقالات گذشته در زمینه استفاده از پمپ خورشیدی، به تامین آب شرب پرداخته و در مقالات موجود در زمینه آبیاری تحت فشار، مقادیر پارامترها به صورت تجمعی و به صورت روزانه، ماهانه و سالانه می‌باشد. در این مقاله عملکرد پمپ فتوولتاییک به صورت اتصال مستقیم به پنل خورشیدی به صورت تجربی مورد بررسی قرار گرفته و عملکرد پمپ خورشیدی به صورت ساعتی در زمان اتصال به شبکه قطره‌ای مد نظر قرار گرفته است.

در اینجا، پمپ خورشیدی به شبکه آبیاری قطره‌ای مقیاس کوچک متصل شده است. برای اولین بار تاثیر عملکرد همزمان سیستم تامین توان پنل خورشیدی و شبکه آبیاری قطره‌ای بر عملکرد پمپ به صورت بلادرنگ^۱ بررسی گردید.

۲- مدل تابش

مدلی برای پیش بینی میزان تابش خورشید به صورت لحظه‌ای در محل تست ارائه شده است. مدل حاضر بر اساس مدل آسمان صاف و معادله رگراسیون خطی آنگستروم می‌باشد. پس از بدست آوردن مقدار تابش روزانه با تعریف پارامتر I_t این مقدار به تابش ساعتی تعمیم داده شد. در نهایت با بدست آوردن میزان تابش لحظه‌ای مقدار توان تولیدی جهت پمپاژ مدل گردید. موقعیت خورشید در آسمان با زاویه خط الراس ($Z\theta$) نشان داده می‌شود. موقعیت زاویه‌ای خورشید در ظهر خورشیدی را زاویه انحراف گویند (δ). زاویه بین صفحه سطح پنل و سطح افق زاویه شیب می‌گویند (β). مقدار انحراف از سطح تصویر شده‌ی افقی نسبت به خط نصف‌النهار را زاویه آزیموت گویند (γ) و این زاویه آزیموت بین -180° تا 180° قابل تغییر است. زاویه ساعت (ω) مقدار جابجایی زاویه‌ای به خاطر چرخش زاویه‌ای زمین به دور محور خود است و به ازای هر 15° درجه برابر با یک ساعت است. در شکل (۱) زوایای قرارگیری پنل و زاویه خورشید نسبت به آن نشان داده شده است. میزان تابش خورشید بر سطح افقی را می‌توان از مجموع مولفه‌های مختلف تابش محاسبه نمود. میزان تابش متوسط روزانه کل شامل میزان تابش مستقیم، میزان تابش پخش و تابش برگشتی می‌باشد.



شکل ۱- زاویه خط‌الرأس، شیب، زاویه آزیموت صفحه و زاویه آزیموت خورشید برای سطوح شیب‌دار

¹ Real time

$$\bar{H}_T = \bar{H}_b + \bar{H}_d + \bar{H}_r \quad (1)$$

در این مدل از معادله رگراسیون خطی آنگستروم اصلاح شده توسط Page بر پایه تابش خارج از جو استفاده شده است [۲۱].

$$\bar{H}_T = \bar{H}_o \left(a + b \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) \quad (2)$$

در این رابطه \bar{H}_T میانگین ماهانه تابش در روز بر روی صفحه افق، \bar{H}_o مقدار تابش میانگین ماهانه تابش در روز خارج از جو می باشد که ضرایب a ، b پارامترهای ثابت هستند که برای آب و هوای مازندران برابر با 0.36 و 0.23 به ترتیب در نظر گرفته شده است. \bar{n} مقدار میانگین ماهانه ساعت آفتاب در روز، \bar{N} مقدار حداکثر ساعت آفتاب در روز می باشد که با استفاده از معادله زیر قابل محاسبه است.

$$\bar{N} = \frac{2}{15} \omega_s \quad (3)$$

در این مقاله مقدار تابش کلی روزانه بر روی سطح از تابش متوسط ماهانه در روز تعمیم داده شد. تابش کلی خورشید بر روی سطح به سه دوره (دوره گرم: ژانویه، فوریه، نوامبر و دسامبر، دره سرد: ژوئن، جولای و اگوست و دوره گذار: مارس، آوریل، می، سپتامبر و اکتبر) تقسیم شده است. بر اساس داده‌های تجربی در اختیار، ضرایب تجربی انگستروم در دوره‌های ذکر شده به صورت زیر خواهد بود.

$$H = \begin{cases} H_0 \left(0.14 + 0.47 \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) & (1 \leq n \leq 59 \quad 305 \leq n \leq 365) \\ H_0 \left(0.24 + 0.4 \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) & 152 \leq n \leq 243 \\ H_0 \left(0.36 + 0.23 \frac{\bar{n}}{\bar{N}} \right) & (60 \leq n \leq 151 \quad 244 \leq n \leq 304) \end{cases} \quad (4)$$

مقدار تابش خارج از جو در عرض جغرافیایی 60° الی $60^\circ -$ برابر خواهد بود با:

$$H_0 = \frac{24 \times 3600}{\pi} G_{sc} \left[1 + 0.033 \cos \left(\frac{360(n)}{365} \right) \right] \times \left[\cos \phi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{360} \sin \delta \sin \phi \right] \quad (5)$$

که G_{sc} مقدار ثابت خورشید و n نماینده روز سال است. نسبت تابش ساعتی به تابش روزانه به طول روز و ساعت مورد نظر با تعریف پارامتر r_t انجام می شود:

$$r_t = \frac{I}{H} \quad (6)$$

مقدار تابش کلی ساعتی بر روی سطح افق به صورت زیر محاسبه می شود:

$$r_t = \frac{\pi}{24} (a + b \cos \omega) \frac{\cos \omega - \cos \omega_s}{\sin \omega_s - \frac{\pi \omega_s}{180} \cos \omega_s} \quad (7)$$

ضرایب a ، b به صورت زیر بیان می شود:

$$\begin{aligned} a &= 0.409 + 0.5016 \sin(\omega_s - 60) \\ b &= 0.6609 + 0.4767 \sin(\omega_s - 60) \end{aligned} \quad (8)$$

تا اینجا مدلی برای پیش بینی مقدار تابش خورشید در هر ساعت از روز ارائه شد. با در اختیار داشتن مقدار تابش خورشید و سطح پنل خورشیدی، مقدار انرژی الکتریکی در اختیار قابل تخمین می باشد.

$$P_{pv} = \eta_{pv} A_{pv} I_T \quad (9)$$

در این رابطه A_{pv} و η_{pv} به ترتیب مقدار تابش ساعتی خورشید، سطح پنل و راندمان پنل می‌باشد.

۳- مدل پمپ و قطره‌چکان

پمپ‌های جابجایی مثبت شامل انواع مختلفی مانند پمپ‌های رفت و برگشتی، پمپ‌های چرخشی، پمپ‌های دیافراگم، پمپ‌های چرخش لوب، پمپ‌های تک ماریچ (مونو پمپ)، پمپ‌های پیچی می‌باشند. تمام این پمپ‌ها متفاوت از پمپ‌های گریز از مرکز هستند زیرا:

- پمپ‌های جابجایی مثبت دارای بهترین نقطه بهره‌وری واحد نیستند.
- هیچ شکل پروانه‌ای (سرعت مخصوص) برای در نظر گرفتن وجود ندارد.
- هیچ منحنی سیستم برای انطباق وجود ندارد.
- دبی پمپ‌های جابجایی مثبت با تغییر هد پمپ ثابت است.

پمپ‌های جابجایی مثبت به سادگی از جریان در هر دور برای مقایسه استفاده می‌کنند. قوانین وابستگی پمپ‌های جابجایی مثبت برای تغییر سرعت بدین صورت است که دبی جریان به طور مستقیم متناسب با تغییر سرعت پمپ است. سرعت پمپ تأثیری مستقیم بر اختلاف فشار آن ندارد. توان ترمزی به طور مستقیم متناسب با تغییر سرعت پمپ تغییر می‌یابد. در سیستم پمپ خورشیدی مقیاس کوچک چنانچه بتوان از پمپ جابجایی مثبت با هد ماکسیمم نزدیک به هد مورد نیاز در سیستم قطره چکان استفاده نمود، می‌توان به راندمان بالاتری نسبت به پمپ گریز از مرکز دست یافت.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \quad \frac{P_1}{P_2} = \frac{N_1}{N_2} \rightarrow Qi = \frac{P_i}{P_M} Q_M \quad (10)$$

در این رابطه Q_M دبی ماکسیمم پمپ، P_M توان ماکسیمم پمپ و پارامترهای Q_i و P_i به ترتیب دبی و توان دیگر نقاط کاری پمپ است.

رابطه‌ی دبی و فشار پشت قطره‌چکان برای قطره‌چکان‌های با سیستم تقلیل فشار پایین (LPC) و قطره چکان‌های با سیستم تقلیل فشار قابل باز کردن (OLPC) به صورت نمایی قابل بیان است [۸]، [۱۵].

$$Q_d = K_d h^x \quad (11)$$

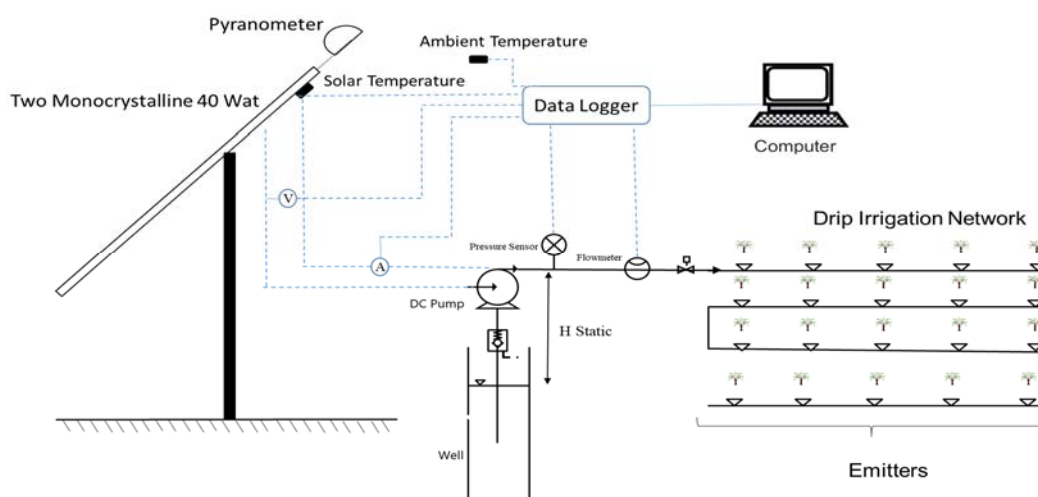
در این رابطه Q_d مقدار دبی آب خروجی از قطره‌چکان، K_d مقدار ضریب قطره‌چکان، x مقدار ضریب نمایی رژیم جریان که تقریباً برابر ۰٫۵ در نظر گرفته و h فشار کاری قطره چکان بر حسب متر می‌باشد. مقدار متوسط h در این کار در نظر گرفته و از تغییرات هیدرولیک صرف نظر می‌گردد. مقدار دبی تخلیه کل از جمع دبی هر یک از قطره چکان‌ها بدست می‌آید.

$$Q = q.n_e = n_e . k_d . h^x \quad (12)$$

۴- توصیف آزمایش

در این آزمایش از نصب سیستم پمپ خورشیدی بر روی یک استند دو محوره دستی در محیط بیرون استفاده شده است. محل نصب این سیستم در استان مازندران شهرستان بابل (طول جغرافیایی 36.4316، عرض جغرافیایی 52.6560)، ارتفاع از سطح دریا ۲۰ متر می‌باشد.

محل تست از آب و هوای معتدل جلگه‌ای برخوردار است. متوسط شدت تابش سالانه محل تست برابر با $3/5 \text{ kWh/m}^2/\text{day}$ در سطح زمین می‌باشد. تغییرات سطح تابش خورشید در ساعت، روز و ماه‌های سال و دمای هوا بر عملکرد پمپ خورشیدی و پنل آن تاثیر خواهد گذاشت. این تجهیزات تست به منظور بررسی عملکرد پمپ خورشیدی کوپل مستقیم در آبیاری قطره‌ای مقیاس کوچک استفاده شده است. بدین منظور از آرایه پنل خورشیدی 80 وات (پنل ایسولا مدل 40-18-M) شامل دو پنل خورشیدی با توان 40 وات می‌باشد. به منظور انطباق ولتاژ کاری پمپ با ولتاژ ورودی از پنل خورشیدی، پنل‌ها به صورت سری به یکدیگر متصل شده‌اند. مشخصات پنل خورشیدی استفاده در این آزمون‌ها در جدول (۱) آورده شده است. پمپ انتخابی از نوع جابجایی مثبت دیافراگمی می‌باشد. مشخصات پمپ و شبکه آبیاری قطره‌ای در جدول (۲) آورده شده است. در شکل (۲) شماتیکی از سیستم داده برداری و تجهیزات تست و در شکل (۳) تصویری از تجهیزات در روزهای تست نشان داده شده است.



شکل ۲- شماتیکی از سیستم داده برداری و تجهیزات تست



شکل ۳- تجهیزات و سیستم داده برداری استفاده شده در تست

جدول ۱- مشخصات پمپ خورشیدی استفاده شده در تست

YH40W-18M	مدل پمپ
40.00	حداکثر توان (Watt)
18.39	حداکثر ولتاژ (V)
2.18	حداکثر جریان (A)
22.07	ولتاژ مدار باز (V)
2.32	جریان مدار باز (A)
12.52	راندمان پمپ
-0.47%	ضریب تصحیح دمایی توان (%/°C)
-0.380%	ضریب تصحیح دمایی ولتاژ (%/°C)
+0.040%	ضریب تصحیح دمایی جریان (%/°C)
47±2	دمای عملکرد نامی سل (°C)
1000 W/M ² ; AM 1.5; 25±2°C	شرایط تست استاندارد

پمپ بر روی چاه نصب شده و سیستم آبیاری قطره‌ای به آن متصل شده است. در این مدل آزمایشی، پمپ خورشیدی، پمپ و شبکه آبیاری قطره‌ای به صورت مستقیم به یکدیگر اتصال دارند. حسگر اندازه‌گیری دبی و حسگر فشار برای اندازه‌گیری جریان عبوری و فشار خط استفاده شده است. دو دماسنج به منظور اندازه‌گیری دمای سطح پمپ و دمای محیط استفاده شده است. حسگر اندازه‌گیری جریان توربینی مدل (YF-S201) و حسگر فشار مدل (BD) در این تست استفاده شده است. شدت تابش خورشید با استفاده از تابش‌سنج خورشیدی مدل SL-100 اندازه‌گیری می‌شود. انتخاب قطره چکان مهمترین کاری است که در یک شبکه آبیاری قطره‌ای باید انجام گیرد. مقدار دبی قطره‌چکان تابع نوع قطره‌چکان و فشار پشت آن می‌باشد. قطره چکان‌ها از لحاظ مقاومت در برابر فشار به دو دسته تقسیم می‌شوند.

- قطره چکان های بدون سیستم تنظیم فشار
- قطره چکان های با سیستم تنظیم فشار

جدول ۲- مشخصات الکتروپمپ و شبکه توزیع قطره ای

جایجایی مثبت (دیافراگمی) TYP-2000	نوع و مدل پمپ
64	ماکسیمم توان پمپ (Watt)
32	ولتاژ نامی پمپ (V)
2	جریان نامی (A)
4	دبی (L/Hr)
16	قطر لوله (mm)
OLP	نوع قطره چکان
30	تعداد قطره چکان
30	طول شبکه قطره ای
8	دبی نامی قطره چکان (L/Hr)

گروه اول با تغییر فشار میزان آبدهی آن تغییر می‌کند، اما قطره چکان‌های گروه دوم که به قطره چکان‌های تنظیم کننده فشار معروف هستند، در محدوده وسیعی از تغییرات فشار و معمولا بین ۰,۵ تا ۴ اتمسفر دارای آبدهی ثابتی هستند. البته این میزان تغییرات فشار کاملا تقریبی بوده و برای هر قطره چکان مقدار مشخصی است که توسط شرکت سازنده اعلام می‌شود. قطره چکان‌های با سیستم تنظیم فشار معمولا برای زمین‌های ناهموار که رعایت حد مجاز افت در طراحی ممکن نباشد و یا در جاهایی که طول لوله‌های آبدهی یا همان لترال‌ها زیاد باشد مورد استفاده قرار می‌گیرد. در این مقاله با توجه به صاف بودن زمین و طول کم مسیر آبیاری قطره‌ای از قطره چکان‌های بدون سیستم تنظیم فشار به منظور تست و ارزیابی استفاده شد. در شکل (۴) قطره چکان‌های موجود در بازار نشان داده شده است.



شکل ۴- قطره چکان‌های موجود در بازار

جدول ۳- مشخصات تجهیزات اندازه گیری و دقت تقریبی آنها

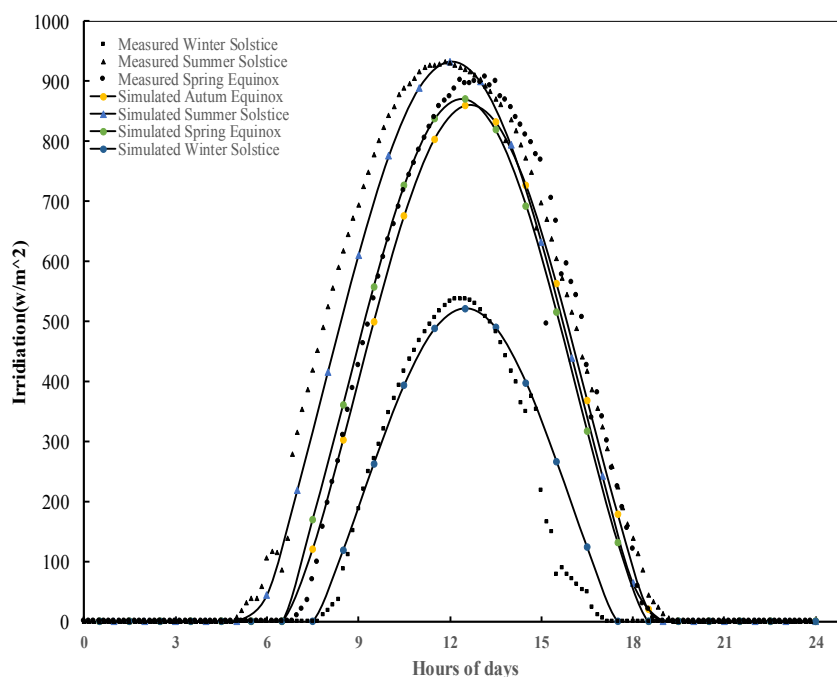
پارامتر اندازه گیری	تجهیز	دقت
دبی جریان	حسگر دبی سنج توربینی مدل YF-S201	5%
فشار	فشار سنج دیجیتال مدل BD	0.5 FSO %
شدت تابش	تابش سنج فتوسل برند SL100-Kimo	5 % of Measurement
دما	سنسور RTD مدل PT100	0.3 Degree
ولتاژ	ولت متر دیجیتال	±0.5
جریان	آمپر متر دیجیتال	±0.5

حسگر تابش سنج و فشارسنج براساس لاگ تست و ارزیابی کارخانه سازنده و بر اساس آخرین کالیبره صورت گرفته توسط شرکت به عنوان معیار کالیبره بودن حسگر آن ارزیابی می شود. دبی سنج با استفاده از ظرف مدرج و زمان سنج و اندازه گیری دبی متوسط با مقدار خروجی آن مقایسه شده است. حسگرهای آنالوگ هم در آزمایشگاه تست و دقت آنها تایید گردید. در جدول (۳) مشخصات تجهیزات اندازه گیری و دقت تقریبی آنها آورده شده است.

۵- بررسی نتایج

به منظور اعتباربخشی مدل تابش ارایه شده همچنین اندازه‌گیری میزان تابش خورشید، ابتدا داده‌های مدل تابش با داده‌های هواشناسی در روزهای شاخص مقایسه شده است. پس از آن داده‌های اندازه‌گیری شده در روزهای تست با داده‌های نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی دارای حسگر تابش سنج مقایسه شده است. میزان انرژی دریافتی در طول روز برای روز اعتدال بهاری (۲۰ مارس)، انقلاب تابستانی (۲۱ ژوئن)، اعتدال پاییزی (۲۳ سپتامبر) و انقلاب زمستانی (۲۱-دسامبر) محاسبه می‌شود.

در شکل (۵) داده‌های مدل ارایه شده با داده‌های هواشناسی مقایسه شده است. این داده‌ها از حسگرهای هواشناسی در نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل تست گرفته شده است. همانطور که در نمودار شکل (۵) مشخص است داده‌های مدل به داده‌های ایستگاه هواشناسی نزدیک است و در روزهای شاخص به خوبی مقدار تابش را تقریب می‌زند. به منظور اعتبارسنجی داده‌های تابش اندازه‌گیری شده در روزهای تست با داده‌های ایستگاه هواشناسی مقایسه شد.

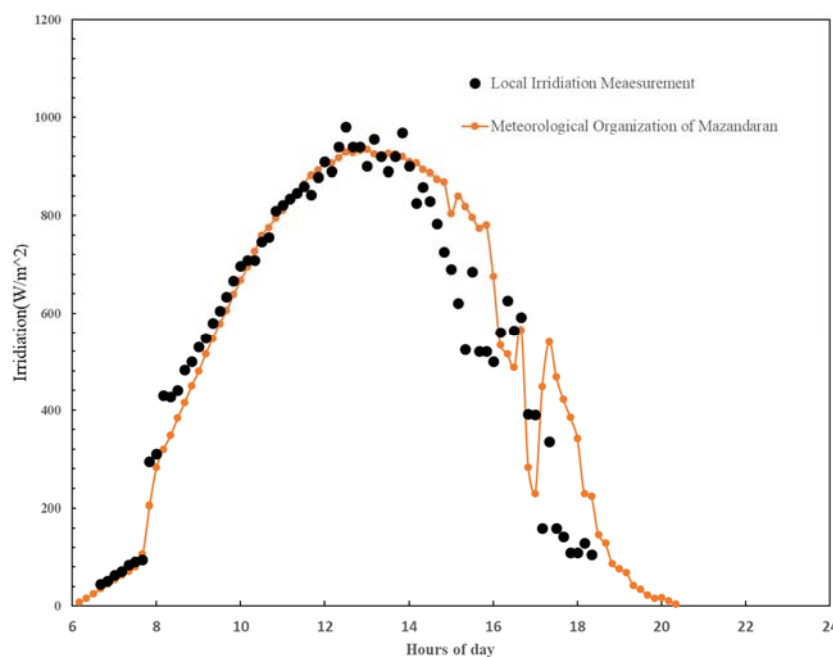


شکل ۵- مقایسه تابش داده‌های مدل تابش در روزهای مختلف سال با داده‌های مرکز هواشناسی

شدت تابش خورشید در طول روز به صورت هر ۱۰ دقیقه ثبت گردیده است. بر اساس اندازه‌گیری‌های صورت گرفته، مقدار پیک تابش خورشید دریافت شده در روز برابر 980 W/m^2 در ساعت ۱۲:۳۰ اتفاق می‌افتد. تابش خورشید در صبح زود تقریباً به صورت خطی با زمان افزایش می‌یابد. پس از آن در یک ساعت مشخص با افزایش چشم‌گیر در مقدار شدت تابش مواجه می‌شویم. رفتار شدت تابش به صورت هارمونیک در کل روز ادامه دارد. در نمودار شکل (۶) مقایسه میزان تابش خورشید اندازه‌گیری شده در یکی از روزهای تست به عنوان نمونه، با داده‌های ایستگاه هواشناسی را نشان می‌دهد. در زمان قبل از ظهر و صاف بودن آسمان مقادیر تابش اندازه‌گیری شده و داده‌های ایستگاه هواشناسی بر روی هم منطبق است و نشان دهنده دقت و صحت اندازه‌گیری می‌باشد. به منظور بررسی عملکرد سیستم پمپ در زمان عبور ابر و کاهش تابش خورشید، تاثیر این شرایط جوی را در نمودار تابش خورشید در بعداز ظهر دیده می‌شود.

۵-۱- تاثیر دما

دمای سطح پنل به عواملی مانند خواص حرارتی و فیزیکی پنل، دمای محیط، میزان تابش خورشید و انتقال حرارت به واسطه باد بستگی دارد. اندازه‌گیری اثر باد بر میزان انتقال حرارت و بیان آن به صورت مدل کار بسیار دشواری است [۲۲]. هر چقدر مقدار دمای هوای محیط و شدت تابش خورشید افزایش یابد، دمای سطح پنل خورشیدی نیز افزایش می‌یابد. مدل‌های مختلفی برای پیش‌بینی دمای سطح پنل وجود دارد. این مدل‌ها دما را یا به صورت صریح یا به صورت ضمنی محاسبه می‌کنند. یکی از پرکاربردترین روش برای محاسبه دمای سطح پنل، استفاده از دمای نرمال عملکرد سل فتوولتاییک^۱ می‌باشد. رابطه مارکوت براساس NOCT در زیر آورده شده است.



شکل ۶- مقایسه تابش خورشید در طول یک روز تست با داده ایستگاه داده برداری هواشناسی استان مازندران

¹ Normal Operation Cell Temperature

$$T_{pv} = T_a + \frac{T_N - 20}{800} G_c \quad (13)$$

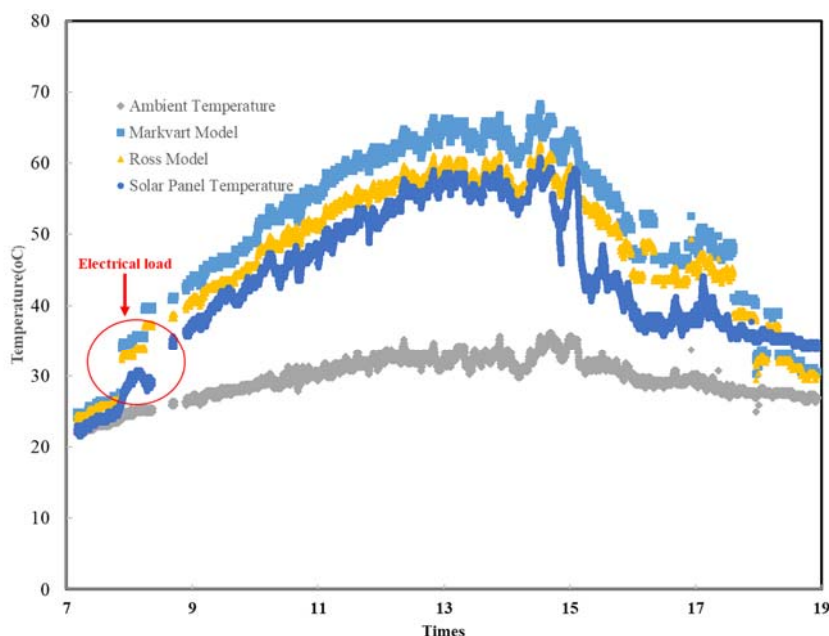
ساده‌ترین معادله صریح برای بدست آوردن دمای پنل، ارتباط دمای پنل با دمای محیط و تابش خورشیدی می‌باشد.

$$T_{pv} = T_a + k G_c \quad (14)$$

در این رابطه خطی ضریب k یک پارامتر دارای بعد km^2/w بوده و به ضریب راس^۱ معروف است. در واقع این ضریب شیب خط اختلاف دمای پنل به دمای محیط بر حسب تابش است $(\Delta(T_c - T_a)/G_c)$. این ضریب بر اساس ارتفاع نصب و میزان فاصله هوایی ماژول بستگی دارد در جدول (۴) ضریب راس برای شرایط مختلف آورده شده است.

جدول ۴- مقدار ضریب راس برای شرایط مختلف نصب پنل خورشیدی

ضریب راس $K(\text{km}^2/\text{w})$	نوع آرایه پنل خورشیدی
۰,۰۲	کاملاً خنک شده
۰,۰۲۰۸	آزاد قرار داده شده
۰,۰۲۶	مسطح بر روی سقف
۰,۰۳۴۲	درست خنک نشده
۰,۰۴۵۵	پنل های شفاف
۰,۰۵۳۸	پنل نصب بر روی نما
۰,۰۵۶۳	سقف شیبدار



شکل ۷- تغییرات دمای محیط و دمای سطح پنل در روز آفتابی تست و مقایسه با مقادیر مدل

¹ Ross Coefficient

با طلوع آفتاب و شروع روز دمای محیط افزایش می‌یابد و به مقدار ماکسیمم خود در طول روز می‌رسد و پس از آن مسیر نزولی را طی می‌کند. دمای سطح پنل به طور مستقیم از دمای محیط و میزان تابش خورشید تاثیر می‌پذیرد. در این آزمایش دمای محیط و دمای سطح پنل در زمان روشن بودن پمپ و آمپردهی پنل اندازه‌گیری شده است. در شکل (۷) مقایسه دمای سطح پنل تست و مدل راس و مدل دمای نرمال عملکرد ارایه شده است. همانطور که در نمودار دیده می‌شود مدل راس به داده‌های تست نزدیک‌تر است و مدل دمای نرمال عملکرد بیشتر از مقدار تجربی پیش‌بینی می‌کند. مقدار ضریب راس در این بررسی ۰,۰۲۶ در نظر گرفته شده است. مقدار متوسط اختلاف دمای سطح پنل اندازه‌گیری شده با مقدار مدل راس ۲,۶ درصد و این مقدار برای مدل دمای نرمال عملکرد پنل برابر ۷ درصد می‌باشد.

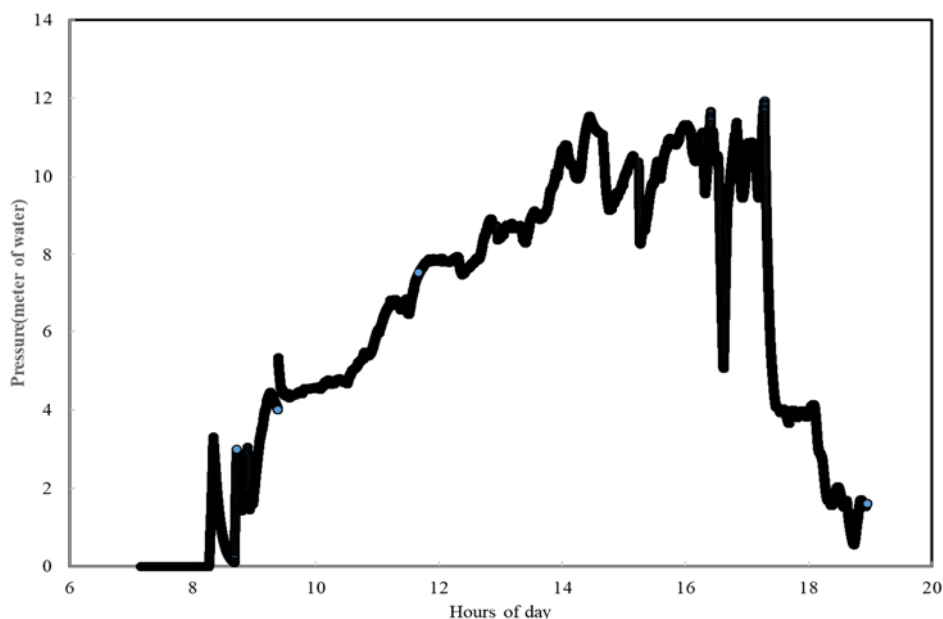
نتایج دمای سطح پنل با مدل‌های ارایه شده توسط مارکوارت و راس مقایسه شده است. روند کاهش و افزایش دمای سطح پنل با افزایش و کاهش دمای محیط منطبق است. تا زمان شروع بکار نکردن پمپ اختلاف دمای سطح پنل و دمای محیط کم می‌باشد و با شروع جریان خروجی از پنل اختلاف دمای سطح پنل و محیط افزایش می‌یابد. در واقع به واسطه جهش در میزان تابش دریافتی به سطح پنل، مقدار انرژی مورد نیاز برای راه‌اندازی موتور تامین می‌گردد. افزایش سطح تابش به سطح پنل و افزایش بار الکتریکی پنل باعث افزایش ناگهانی در دمای سطح پنل می‌گردد که در شکل با دایره قرمز نشان داده شده است.

۵-۲- فشار

فشار متناسب در سیستم قطره چکان بین ۵ الی ۲۰ متر آب است [۱۴]. این فشار تابع میزان تابش خورشید و انرژی ورودی به پنل خورشیدی و پمپ می‌باشد. در زمان صبح و غروب و در شرایط تابش کم، مقدار فشار شبکه قطره‌ای کم می‌باشد و با افزایش تابش خورشید مقدار فشار در شبکه قطره‌ای افزایش می‌یابد این درحالی است که مقدار دبی خروجی با افزایش فشار تقریباً ثابت می‌ماند. پدیده کاهش فشار خط توزیع قطره‌ای در زمان گذر ابر و کاهش تابش خورشید دیده می‌شود. پمپ به واسطه کوپل مستقیم بودن تحت تاثیر تابش ورودی به پنل خورشیدی می‌باشد و با کاهش تابش آن بر فشار خط تاثیر می‌گذارد. این در حالی است که دبی رفتار ثابتی از خود نشان می‌دهد.

۵-۳- دبی پمپ

مقدار دبی نامی پمپ برابر با ۲۴۰ لیتر بر ساعت است. با شروع تابش خورشید پمپ با دبی کمتر از دبی نامی شروع به پمپ نمودن آب و افزایش فشار در خط شبکه قطره‌ای می‌نماید. تا زمانی که مقدار تابش به اندازه‌ی شد که پمپ به حداکثر دبی اسمی خود نزدیک شد در این شرایط با افزایش شدت تابش مقدار دبی پمپ تغییری پیدا نمی‌کند و چنانچه مقدار شدت تابش از مقدار مشخص کمتر نگردد، دبی پمپ تقریباً ثابت می‌ماند. در شرایط صبحگاهی و غروب و یا ابری شدن هوا که منجر به کاهش تابش خورشید می‌گردد، مقدار دبی کاهش می‌یابد. کاهش دبی در این شرایط با کاهش فشار خط توزیع قطره‌ای متناسب است.



شکل ۸- تغییرات ساعتی فشار خط شبکه قطره‌ای در طول روز

دبی پمپ در سیستم آبیاری قطره‌ای با توجه به میزان تابش خورشید به سه بخش تقسیم می‌شود. توان پمپ برابر است با توان خالص تولید شده توسط سیستم خورشیدی و پاسخ سیستم پمپاژ را می‌توان توسط مجموعه معادلات زیر مدل کرد:

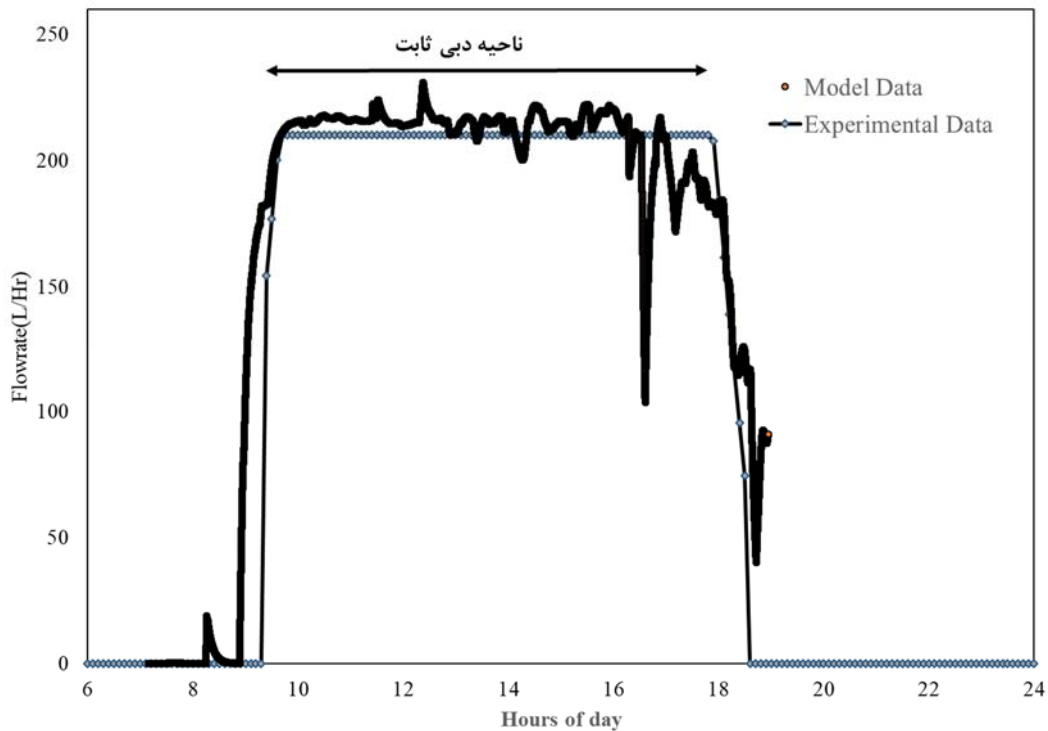
$$\left\{ \begin{array}{l} a: \quad IF P_{pv} < P_m \Rightarrow Q = 0 \\ b: \quad IF P_m < P_{pv} < P_M \Rightarrow Q = Q_M \left(\frac{P_{pv}}{P_M} \right) \\ c: \quad IF P_{pv} > P_M \Rightarrow Q = Q_M \end{array} \right. \quad (15)$$

در این رابطه Q مقدار دبی پمپ در آن ساعت، P_{pv} توان لحظه‌ای تامین شده توسط پنل خورشیدی، Q_m و P_m دبی و توان پمپ در آستانه راه‌اندازی می‌باشد.

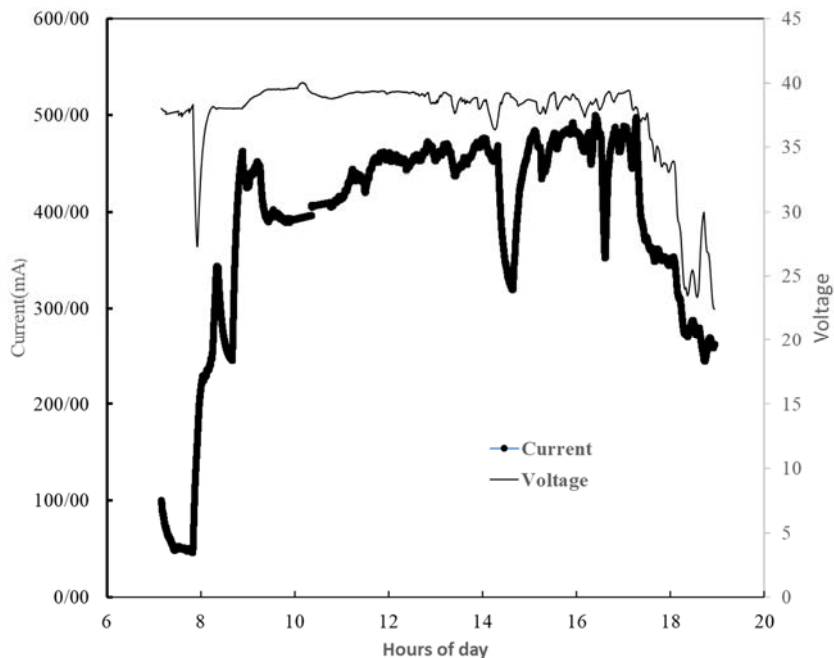
۵-۴- ولتاژ و جریان پمپ

رفتار ولتاژ سر پمپ در شرایط دبی ثابت تقریباً مقدار ثابتی می‌باشد. پمپ جابجایی مثبت دیافراگمی رفتار نوسانی با فرکانس بالا در پمپ کردن آب دارد. در تابش‌های پایین مقدار توانی که پمپ می‌تواند از پنل خورشیدی دریافت کند کاهش می‌یابد، جریان خواهی پمپ و عدم تامین آن توسط پنل منجر به کاهش ولتاژ می‌گردد. کاهش ولتاژ منجر به کاهش دور الکتروموتور و کاهش فرکانس حرکت دیافراگم می‌گردد.

در نتیجه آن دبی و فشار خط کاهش می‌یابد. رفتار جریان و ولتاژ پمپ متاثر از تابش خورشید می‌باشد. این جریان و ولتاژ ورودی به پمپ باعث ایجاد ناحیه خطی و ناحیه دبی ثابت در پمپ می‌گردد. در شکل (۱۰) منحنی تغییرات جریان و ولتاژ پمپ بر حسب زمان نشان داده شده است. مقدار ولتاژ و جریان در شرایط دبی ثابت به ترتیب برابر با ۳۸ ولت و جریان بین ۴۰۰ الی ۵۰۰ میلی آمپر است. مقدار ولتاژ به حداکثر ولتاژ خروجی پنل خورشیدی در حالت اتصال سری نزدیک می‌باشد.



شکل ۹- منحنی تغییرات دبی بر حسب زمان در طول روز تست



شکل ۱۰- منحنی تغییرات جریان و ولتاژ پمپ بر حسب زمان

۵-۵- تعیین نایقینی^۱

مقدار نایقینی کل برای پارامترهای که به صورت مستقیم در تست‌ها اندازه‌گیری نمی‌شود، به صورت زیر خواهد بود.

$$U = \pm \sqrt{\sum_{i=1}^j U^2(X_i)} \quad (16)$$

در این رابطه U مقدار نایقینی پارامتر محاسباتی و $U(X)$ مقدار نایقینی اندازه‌گیری شده می‌باشد. پارامترهای آرایه شده در این مقاله به طور مستقیم از خروجی حسگرها برداشت شده است. در آزمایشات صورت گرفته، خطاهای حسگرها به صورت: حسگر تابش 0.5% ، حسگر دبی 0.5% ، حسگر فشارسنج دیجیتال 0.5% ، خروجی حداکثر، خطای دما 0.3 ، درجه، ولتاژ و جریان 0.5 واحد می‌باشد.

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، عملکرد تجربی پمپ خورشیدی در مقیاس کوچک در شرایط کوپل مستقیم و اتصال به سیستم آبیاری قطره‌ای مورد ارزیابی قرار گرفت. سیستم پمپ خورشیدی مورد نظر از نوع جریان مستقیم و دیافراگمی است. بر این اساس، یک مدل تجربی از سیستم پمپ مورد نظر، طراحی و نصب گردید. آزمایشات در چندین روز انجام گرفت و مقادیر مهم برای چهار روز مختلف مورد بررسی قرار گرفت تا تکرارپذیری آن تایید گردد. از مهمترین نتایج تحقیق حاضر می‌توان موارد زیر را برشمرد:

- دبی پمپ به سه قسمت مختلف تقسیم می‌شود. چنانچه میزان تابش از مینیمم توان مورد نیاز برای راه‌اندازی پمپ کمتر باشد، عملاً دبی صفر می‌باشد. پس از آن، رفتار دبی پمپ به گونه‌ای است که به صورت خطی تا دبی ماکسیمم (210 لیتر بر ساعت) افزایش می‌یابد و پس از آن با افزایش انرژی تابشی، میزان دبی خروجی ثابت باقی می‌ماند. در زمان صبح و غروب و ساعاتی که ابرناکی زیاد می‌گردد، مقدار دبی کاهش می‌یابد.
- فشار سیستم قطره‌ای، تابع میزان تابش خورشید و انرژی ورودی به پنل خورشیدی و پمپ می‌باشد. در زمان صبح و غروب و در شرایط تابش کم، مقدار فشار شبکه قطره‌ای کم می‌باشد و با افزایش تابش خورشید مقدار فشار در شبکه قطره‌ای افزایش می‌یابد و پس از آن مقدار ثابتی از خود نشان می‌دهد. با کاهش توان ورودی به پمپ و کاهش مقدار ولتاژ و جریان پمپ، مقدار فشار نیز کاهش می‌یابد.
- دمای سطح پنل نیز تابعی از دمای محیط و میزان تابش خورشید می‌باشد و روند تغییرات دمای سطح پنل رفتار مشابه مدل‌ها و روابط تحلیلی دارد، اما مقادیر بدست آمده در این آزمایش از مقادیر روابط تئوری، کمتر بوده است. میانگین خطای روش راس در پیش‌بینی دمای سطح پنل 2.6 درصد و میانگین خطای روش دمای نرمال کارکرد 7 درصد می‌باشد.
- در بازه زمانی خرداد ماه بیشترین دمای سطح پنل برابر با 60.7 درجه سلسیوس به دست آمده است.

¹ Uncertainty

- نتایج نشان داد در طراحی و انتخاب پمپ جایجایی مثبت بایستی تلاش شود هد ماکسیمم پمپ به مجموع هد دینامیک مورد نیاز در سیستم آبیاری قطره‌ای نزدیک گردد. راندمان در این شرایط به مقدار ماکسیمم نزدیک خواهد شد. لذا تعداد قطره چکان‌ها با دبی پمپ و حداکثر هد دینامیک سیستم با حداکثر هد پمپ متناسب است.

مراجع

- [1] Chandel, S. S., Naik, M. N., and Chandel, R., "Review of Solar Photovoltaic Water Pumping System Technology for Irrigation and Community Drinking Water Supplies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 49, pp. 1084-1099, (2015).
- [2] Chandel, S. S., Naik, M.N., and Chandel, R., "Review of Performance Studies of Direct Coupled Photovoltaic Water Pumping Systems and Case Study", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 76, pp. 163-175, (2017).
- [3] Rawat, R., Kaushik, S.C., and Lamba, R., "A Review on Modeling, Design Methodology and Size Optimization of Photovoltaic Based Water Pumping, Standalone and Grid Connected System", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 57, pp. 1506-1519, (2016).
- [4] Ebaid, M.S., Qandil, H., and Hammad, M., "A Unified Approach for Designing a Photovoltaic Solar System for the Underground Water Pumping Well-34 at Disi Aquifer", *Energy Conversion and Management*, Vol. 75, pp. 780-795, (2013).
- [5] Amer, E.H., and Younes, M.A., "Estimating the Monthly Discharge of a Photovoltaic Water Pumping System: Model Verification", *Energy Conversion and Management*, Vol. 47, pp. 2092-2102, (2006).
- [6] Mokeddem, A., Midoun, A., Kadri, D., Hiadsi, S., and Raja, I.A., "Performance of a Directly-coupled PV Water Pumping System", *Energy Conversion and Management*, Vol. 52, pp. 3089-3095, (2011).
- [7] Kou, Q., Klein, S.A., and Beckman, W.A., "A Method for Estimating the Long-term Performance of Direct-Coupled PV Pumping Systems", *Solar Energy*, Vol. 64, pp. 33-40, (1998).
- [8] Pande, P.C., Singh, A.K., Ansari, S., Vyas, S.K., and Dave, B.K., "Design Development and Testing of a Solar PV Pump Based Drip System for Orchards", *Renewable Energy*, Vol. 28, No. 3, pp. 385-396, (2003).
- [9] Glasnovic, Z., and Margeta, J., "Optimization of Irrigation with Photovoltaic Pumping System", *Water Resources Management*, Vol. 21, pp. 1277-1297, (2007).
- [10] Hamidat, A., and Benyoucef, B., "Systematic Procedures for Sizing Photovoltaic Pumping System, using Water Tank Storage", *Energy Policy*, Vol. 37, pp. 1489-1501, (2009).

- [11] Yadav, K., Kumar, A., Sastry, O.S., and Wandhare, R., "Solar Photovoltaics Pumps Operating Head Selection for the Optimum Efficiency", *Renewable Energy*, Vol. 134, pp. 169-177, (2019).
- [12] Abdolzadeh, M., Ameri, M., and Mehrabian, M.A., "Effects of Water Spray over the Photovoltaic Modules on the Performance of a Photovoltaic Water Pumping System under Different Operating Conditions", *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 33, pp. 1546-1555, (2011).
- [13] Tiwari, A.K., and Kalamkar, V.R., "Effects of Total Head and Solar Radiation on the Performance of Solar Water Pumping System", *Renewable Energy*, Vol. 118, pp. 919-927, (2018).
- [14] López-Luque, R., Reca, J., and Martínez, J., "Optimal Design of a Standalone Direct Pumping Photovoltaic System for Deficit Irrigation of Olive Orchards", *Applied Energy*, Vol. 149, pp. 13-23, (2015).
- [15] Reca, J., Torrente, C., López-Luque, R., and Martínez, J., "Feasibility Analysis of a Standalone Direct Pumping Photovoltaic System for Irrigation in Mediterranean Greenhouses", *Renewable Energy*, Vol. 85, pp. 1143-1154, (2016).
- [16] Niajalili, M., Mayeli, P., Naghashzadegan, M., and Poshtiri, A.H., "Techno-economic Feasibility of Off-grid Solar Irrigation for a Rice Paddy in Guilan Province in Iran: A Case Study", *Solar Energy*, Vol. 150, pp. 546-557, (2017).
- [17] Benganem, M., Daffallah, K.O., Joraid, A.A., Alamri, S.N., and Jaber, A., "Performances of Solar Water Pumping System using Helical Pump for a Deep Well: A Case Study for Madinah, Saudi Arabia", *Energy Conversion and Management*, Vol. 65, pp. 50-56, (2013).
- [18] Hamrouni, N., Jraidi, M., and Cherif, A., "Theoretical and Experimental Analysis of the Behavior of a Photovoltaic Pumping System", *Solar Energy*, Vol. 83, pp. 1335-1344, (2009).
- [۱۹] چهارطاقی، محمود و هدایت پور جلودار مهدی، "مدلسازی سیستم پمپ خورشیدی فتوولتائیک به صورت کوپل مستقیم با آبیاری قطره ای"، کنفرانس ملی پژوهش های نوین در مهندسی کشاورزی، محیط زیست و منابع طبیعی، دانشگاه جامع علمی کاربردی سازمان همیاری شهرداری ها، کرج، البرز، ایران، (۱۳۹۶).
- [20] Nikzad, A., Chahartaghi, M., and Ahmadi, M.H., "Technical, Economic, and Environmental Modeling of Solar Water Pump for Irrigation of Rice in Mazandaran Province in Iran: A Case Study", *Journal of Cleaner Production*, Vol. 239, 118007, (2019).
- [21] Duffie, J.A., and Beckman, W.A., "*Solar Engineering of Thermal Processes*", John Wiley & Sons, Inc, New York, NY, USA, (2013).
- [22] Skoplaki, E.P.J.A., and Palyvos, J.A., "Operating Temperature of Photovoltaic Modules: A Survey of Pertinent Correlations", *Renewable Energy*, Vol. 34, pp. 23-29, (2009).

Abstract

In this paper, experimental performance of a solar photovoltaic positive displacement pump connected to drip irrigation system has been studied in direct coupling condition. Also, a mathematical model has been presented to predict the main parameters of the system. The values of solar radiation, water discharge, emitter line pressure, panel surface temperature, ambient temperature, current and output voltage of solar panel have been measured in actual operation time. The results illustrate that the positive displacement pump discharge shows three different behaviors in a day. The output flow of the pump tends to be constant after a mid-day threshold radiation. The amount of discharge and line pressure in the morning and evening, when the sun radiation is in a low level, are ascending and descending, respectively. One of the important factors in the performance of the panel is the surface temperature of the panel, with the maximum observed temperature being 60.7 degrees Celsius.