

مطالعه تجربی عملکرد یک سیستم فتوولتایی مجهز به سامانه نوین خنک کاری هوشمند تحت تأثیر آلودگی سطحی

احسان مهرابی گوهری

استادیار گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه ملی مهارت، تهران، ایران

چکیده

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه فتوولتایی مجهز به سامانه نوین خنک کاری پاششی هوشمند در شرایط اقلیمی گرم و خشک کرمان بررسی می‌شود. هدف این مطالعه، ارزیابی اثر همزمان خنک کاری و آلودگی سطحی بر عملکرد الکتریکی پنل و بررسی قابلیت کاهش مصرف آب است. نتایج نشان می‌دهد که خنک کاری، دمای پنل را از ۶۵ به ۴۷ درجه سلسیوس کاهش داده و بازده الکتریکی را از ۱۵ به ۱۹ درصد افزایش می‌دهد. همچنین، در شرایط آلوده، فعال‌سازی سامانه خنک‌کننده توان خروجی را از ۲۰۰ به ۲۴۰ وات معادل ۲۰ درصد افزایش می‌رساند. افزایش ضریب آلودگی سطحی از ۰ تا ۰/۴ نیز توان خروجی را از ۳۰۰ به ۱۸۰ وات کاهش می‌دهد. مدار بسته سامانه، امکان بازگشت و استفاده مجدد از آب را فراهم کرده و مصرف آب را بهینه می‌سازد. همچنین، ارزیابی اولیه اقتصادی نشان می‌دهد که افزایش توان تولیدی مصرف انرژی پمپ را جبران کرده و توان خالص سامانه را بهبود می‌دهد. نتایج این پژوهش، خنک کاری پاششی هوشمند را به‌عنوان روشی مؤثر با مصرف بهینه آب برای افزایش بهره‌وری پنل‌های فتوولتایی در مناطق گرم و دارای آلودگی سطحی معرفی می‌کند.

واژه‌های کلیدی: سیستم فتوولتایی، خنک کاری هوشمند، آلودگی سطحی، راندمان انرژی، مدیریت گرمایی، مطالعه تجربی.

Experimental Study of the Performance of a Photovoltaic System Equipped with an Innovative Intelligent Cooling System under Surface Soiling Effects

Ehsan Mehrabi Gohari

Department of Mechanical Engineering, Technical and vocational university, Tehran, Iran

Abstract

In this research, the performance of a photovoltaic system equipped with a new smart spray cooling system is investigated in the hot and dry climate of Kerman. The aim of this study is to evaluate the simultaneous effect of cooling and surface contamination on the electrical performance of the panel and to investigate the possibility of reducing water consumption. The results show that cooling reduces the panel temperature from 65 to 47 degrees Celsius and increases the electrical efficiency from 15 to 19 percent. Also, in contaminated conditions, activating the cooling system increases the output power from 200 to 240 watts, equivalent to 20 percent. Increasing the surface contamination coefficient from 0 to 0.4 also reduces the output power from 300 to 180 watts. The closed circuit of the system allows for the return and reuse of water and limits water consumption. Also, the initial economic evaluation shows that the increase in production power can compensate for the pump energy consumption and improve the net power of the system. The results of this research introduce smart spray cooling as an effective and water-efficient method for increasing the efficiency of photovoltaic panels in hot and polluted areas.

Keywords: Photovoltaic system, smart cooling, Surface pollution, Energy efficiency, Thermal management, Experimental study

۱- مقدمه

انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی، نقش کلیدی در تولید انرژی پاک ایفا می‌کنند. با این حال، عملکرد این سیستم‌ها به‌شدت تحت تأثیر شرایط محیطی و پارامترهای عملیاتی قرار دارد. یکی از مهم‌ترین این عوامل، دمای کاری سلول‌های خورشیدی است. افزایش دمای پنل موجب کاهش ولتاژ مدار باز، افزایش تلفات داخلی و در نهایت افت توان خروجی و راندمان سیستم می‌شود. Skoplaki و Palyvos نشان دادند که عملکرد الکتریکی ماژول‌های فتوولتایی وابستگی مستقیمی به دمای کاری داشته و ضریب دمایی سلول یکی از پارامترهای مهم در تعیین راندمان سیستم است [۵]. Dubey و همکاران نیز اثر دما بر راندمان پنل‌های PV را بررسی کرده و کاهش عملکرد سیستم در اثر افزایش دمای سلول را گزارش کردند [۶]. Radziemska و Green تأثیر شرایط گرمایی بر عملکرد سلول‌های سیلیکونی را بررسی کرده و اهمیت کنترل دمای کاری برای حفظ بازده سیستم‌های فتوولتایی را نشان

افزایش روزافزون تقاضای جهانی برای انرژی، محدودیت منابع سوخت‌های فسیلی و پیامدهای زیست‌محیطی ناشی از انتشار گازهای گلخانه‌ای، توسعه و بهره‌برداری از منابع انرژی تجدیدپذیر را به یکی از مهم‌ترین اولویت‌های راهبردی در جهان تبدیل کرده است [۱،۲]. در این میان، انرژی خورشیدی به دلیل فراوانی، دسترسی گسترده، تجدیدپذیری و پاک بودن، به‌عنوان یکی از مهم‌ترین گزینه‌ها برای تأمین انرژی پایدار مورد توجه قرار گرفته است [۳]. پیشرفت‌های اخیر در فناوری‌های فتوولتایی منجر به افزایش قابل توجه ظرفیت نصب‌شده جهانی، کاهش هزینه تولید و بهبود راندمان سیستم‌ها شده است، به‌گونه‌ای که این فناوری به یکی از ارکان اصلی سیستم‌های انرژی آینده تبدیل شده است [۴]. سیستم‌های فتوولتایی با تبدیل مستقیم

دادند [۷،۸]. همچنین King و همکاران ضرایب دمایی ماژول‌های PV را برای پیش‌بینی عملکرد واقعی آرایه‌های فتوولتایی مورد بررسی قرار دادند [۹]. به منظور کاهش اثرات نامطلوب افزایش دما، روش‌های مختلف مدیریت گرمایی برای سیستم‌های فتوولتایی توسعه یافته‌اند. این روش‌ها شامل روش‌های غیرفعال مانند استفاده از مواد تغییر فاز، افزایش سطح انتقال گرما و بهبود انتقال گرما طبیعی، و روش‌های فعال مانند خنک‌کاری با هوا، آب، نانوسیالات و سامانه‌های ترکیبی هستند. در میان این روش‌ها، خنک‌کاری آبی به دلیل ظرفیت گرمایی بالا و قابلیت جذب گرمای محسوس، یکی از مؤثرترین روش‌ها برای کاهش دمای پنل‌های فتوولتایی محسوب می‌شود [۱۰-۱۳]. Krauter نشان داد که ایجاد جریان آب روی سطح پنل فتوولتایی می‌تواند علاوه بر کاهش دمای کاری، موجب افزایش توان خروجی سیستم شود [۱۰]. Abdolzadeh و Ameri نیز یک سامانه پمپاژ آب فتوولتایی مجهز به پاشش آب روی سطح سلول‌ها را بررسی کرده و بهبود عملکرد الکتریکی پنل را گزارش کردند [۱۱]. Behnia و Odeh اثر خنک‌کاری آبی بر راندمان ماژول‌های فتوولتایی را بررسی کرده و افزایش بازده سیستم در اثر کاهش دمای پنل را نشان دادند [۱۲]. Royne و همکاران نیز در یک مطالعه مروری، روش‌های مختلف خنک‌کاری سلول‌های خورشیدی را بررسی کرده و بر اهمیت طراحی مناسب سامانه انتقال گرما تأکید کردند [۱۳]. در سال‌های اخیر، توسعه سامانه‌های خنک‌کاری به عنوان یکی از مسیرهای مهم پژوهشی مطرح شده است. مطالعات جدید نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های پیشرفته خنک‌کاری، می‌تواند ضمن کاهش دمای پنل، بهره‌وری کلی سیستم را افزایش دهد [۱۴،۱۵]. علاوه بر افزایش دمای کاری، آلودگی سطحی یکی دیگر از عوامل مهم کاهش عملکرد سیستم‌های فتوولتایی، به‌ویژه در مناطق خشک و دارای گردوغبار است. تجمع ذرات گردوغبار، خاک و آلاینده‌های محیطی بر سطح پنل موجب کاهش عبور تابش خورشیدی، کاهش جریان تولیدی، افت توان خروجی و در نهایت کاهش راندمان سیستم می‌شود. Mani و Pillai اثر گردوغبار بر عملکرد سامانه‌های فتوولتایی را بررسی کرده و چالش‌های ناشی از آلودگی سطحی را مورد تحلیل قرار دادند [۱۶]. Sayyah و همکاران نیز کاهش انرژی تولیدی پنل‌های خورشیدی در اثر رسوب ذرات گردوغبار را بررسی کرده و ارتباط مستقیم بین میزان آلودگی سطحی و افت توان خروجی را نشان دادند [۱۷]. Kimber و همکاران با بررسی عملکرد سیستم‌های فتوولتایی متصل به شبکه، تأثیر تجمع گردوغبار بر کاهش تولید انرژی در شرایط واقعی بهره‌برداری را ارزیابی کردند [۱۸]. Sarver و همکاران یک مطالعه جامع درباره اثر گردوغبار بر فناوری‌های انرژی خورشیدی ارائه کرده و بر اهمیت توسعه روش‌های مؤثر برای کاهش تلفات ناشی از آلودگی سطحی تأکید کردند [۱۹]. Darwish و همکاران اثر گردوغبار بر عملکرد پنل‌های فتوولتایی را بررسی کرده و نشان دادند که شدت اثرگذاری آلودگی به عواملی مانند شرایط اقلیمی، ویژگی ذرات و مدت زمان تجمع آن‌ها وابسته است [۲۰]. همچنین Kaldellis و Kapsali با استفاده از داده‌های تجربی، اثر آلودگی سطحی را بر عملکرد انرژی تولیدی ژنراتورهای فتوولتایی شبیه‌سازی کردند [۲۱]. با توجه به اهمیت روزافزون مسئله آلودگی سطحی، مطالعات جدید به سمت توسعه روش‌های کم‌هزینه، خودکار و سازگار با شرایط محیطی برای کنترل آلودگی سطحی حرکت کرده‌اند. بررسی‌های اخیر

نشان داده‌اند که روش‌های نوین پاک‌سازی و مدیریت آلودگی می‌توانند ضمن کاهش تلفات ناشی از گردوغبار، هزینه‌های نگهداری سیستم‌های فتوولتایی را نیز کاهش دهند [۲۲]. از سوی دیگر، توسعه سامانه‌های انرژی پایدار نیازمند توجه همزمان به مدیریت انرژی، تحلیل عملکرد و بهینه‌سازی فرآیندهای انتقال گرما است. مطالعات انجام‌شده در حوزه سامانه‌های گرمایی نشان داده‌اند که استفاده از روش‌های تحلیل انرژی و بهینه‌سازی می‌تواند موجب افزایش بهره‌وری، کاهش مصرف انرژی و بهبود عملکرد سیستم‌های پیچیده گرمایی شود [۲۳]. با وجود مطالعات گسترده انجام‌شده در زمینه خنک‌کاری پنل‌های فتوولتایی و کاهش اثرات آلودگی سطحی، بررسی ادبیات موضوع نشان می‌دهد که بسیاری از پژوهش‌های پیشین، اثر افزایش دما و آلودگی سطحی را به صورت جداگانه بررسی کرده‌اند. در شرایط واقعی بهره‌برداری، به‌ویژه در مناطق گرم و خشک، این دو عامل به‌طور همزمان رخ داده و می‌توانند اثرات تشدیدکننده‌ای بر کاهش توان خروجی و راندمان سیستم ایجاد کنند. همچنین محدودیت منابع آب، نیاز به کاهش مصرف انرژی تجهیزات جانبی و ضرورت افزایش قابلیت اطمینان سیستم، توسعه سامانه‌های خنک‌کاری هوشمند و کم‌مصرف را ضروری ساخته است.

بر این اساس، هدف پژوهش حاضر طراحی، ساخت و ارزیابی تجربی یک سامانه فتوولتایی مجهز به سیستم خنک‌کاری پاششی هوشمند تحت تأثیر آلودگی سطحی است. در این پژوهش، یک سامانه خنک‌کاری مبتنی بر کنترل ترموستاتی طراحی شده است که فرآیند پاشش آب را تنها در زمان افزایش دمای پنل و عبور از مقدار بحرانی فعال می‌کند. این راهبرد علاوه بر کاهش زمان عملکرد پمپ، موجب کاهش مصرف انرژی کمکی و استفاده بهینه‌تر از آب در مدار خنک‌کاری می‌شود.

نواوری اصلی این تحقیق در یکپارچه‌سازی سامانه خنک‌کاری پاششی هوشمند، مدار بسته گردش آب با قابلیت بازیافت، کنترل فعال بر اساس دمای پنل و بررسی همزمان اثرات گرمایی و آلودگی سطحی بر عملکرد الکتریکی ماژول فتوولتایی و بهینه‌سازی مصرف انرژی و قابلیت توسعه سامانه در مقیاس بزرگ‌تر تعریف می‌شود. برخلاف بسیاری از مطالعات پیشین که تنها یکی از عوامل دما یا آلودگی را بررسی کرده‌اند، در این پژوهش عملکرد سیستم در چهار وضعیت عملیاتی شامل پنل تمیز بدون خنک‌کاری، پنل تمیز مجهز به خنک‌کاری، پنل آلوده بدون خنک‌کاری و پنل آلوده همراه با خنک‌کاری مورد بررسی قرار گرفته است. در نهایت، اثر سامانه پیشنهادی بر دمای کاری پنل، ولتاژ، توان خروجی، راندمان الکتریکی و کاهش اثرات نامطلوب آلودگی سطحی در شرایط اقلیمی گرم و خشک شهر کرمان ارزیابی شده است. نتایج این پژوهش می‌تواند در توسعه سامانه‌های فتوولتایی پایدار، کم‌مصرف و مناسب برای مناطقی با تابش شدید خورشیدی و بار گردوغبار بالا مورد استفاده قرار گیرد.

۲- مواد و روش‌ها

۲-۱- مشخصات سیستم طراحی شده

در این پژوهش، یک نمونه آزمایشگاهی از سیستم خنک‌کننده آبی پنل خورشیدی طراحی و ساخته شد که تصویر آن در شکل (۱) ارائه شده است.

این سامانه با هدف کاهش دمای سطح پنل و افزایش بازده الکتریکی آن توسعه یافته است.

جدول ۱- مشخصات سیستم پاشش خنک‌کننده آبی پنل خورشیدی

مشخصات سیستم پاشش	مقادیر
نوع سیستم پاشش	لوله توزیع آب سوراخ‌دار
جنس لوله	PVC با قطر خارجی 1 in
طول لوله	100 cm
تعداد سوراخ‌ها	16 عدد
قطر هر سوراخ	2 mm
فاصله بین سوراخ‌ها	6 cm
زاویه خروج آب	حدود ۹۰ درجه رو به پایین
فاصله لوله تا سطح پنل	2 cm



شکل ۱- نمونه آزمایشگاهی سیستم خنک‌کننده آبی پنل خورشیدی طراحی و ساخته شده در این مطالعه

آب استفاده‌شده پس از عبور از سطح پنل، در یک مخزن جمع‌آوری (تشتک) که در قسمت پایین پنل تعبیه شده است، ذخیره می‌گردد. این مخزن علاوه بر جمع‌آوری آب، امکان گردش مجدد سیال خنک‌کننده را فراهم می‌کند و نقش مهمی در کاهش مصرف آب سیستم دارد. جنس مخزن به‌گونه‌ای انتخاب شده است که در برابر رطوبت و خوردگی مقاوم باشد. در این سامانه، پمپ، آب ذخیره‌شده در مخزن (تشتک) را به سمت لوله توزیع در بالای پنل هدایت می‌کند. آب پس از پاشش بر سطح پنل و جذب گرما، مجدداً به مخزن بازمی‌گردد و چرخه تکرار می‌شود. عملکرد پمپ توسط ترموستات دیجیتال کنترل شده و تنها در زمان افزایش دمای پنل فعال می‌گردد که این امر موجب کاهش مصرف انرژی و افزایش عمر مفید پمپ می‌شود. پمپ مورد استفاده از نوع DC با ولتاژ نامی ۱۲ ولت بوده و انرژی الکتریکی موردنیاز خود را مستقیماً از خروجی پنل فتوولتایی تأمین می‌کند. به این ترتیب سامانه خنک‌کاری کاملاً مستقل از شبکه برق عمل می‌کند. توان مصرفی پمپ در شرایط کاری حدود ۳۰ وات بود که در تحلیل عملکرد، توان خالص سامانه با کسر توان مصرفی پمپ از توان خروجی پنل محاسبه شد. جدول ۲ مشخصات پمپ را ارائه می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات پمپ سیستم خنک‌کننده آبی پنل خورشیدی

مشخصات پمپ	مقادیر
منبع تغذیه پمپ	برق DC تولیدی همان پنل خورشیدی
ولتاژ کاری پمپ	12 V DC
توان نامی پمپ	35 W
توان مصرفی واقعی در حین آزمایش	28-32 W
دبی آب	6.8 L/min

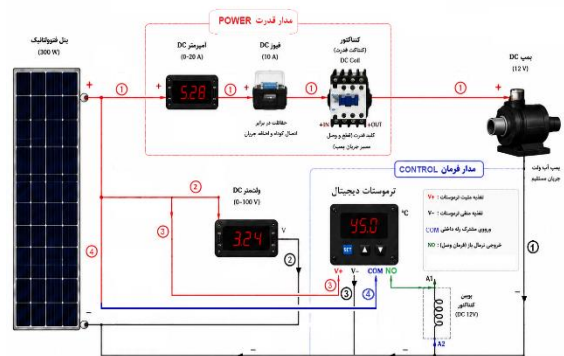
در این نمونه، یک پنل خورشیدی فتوولتایی تک کریستال ۳۰۰ وات با ابعاد تقریبی 1640×992 mm و با زاویه شیب ۱۰ درجه نسبت به افق و در راستای جنوب نصب شد.

شکل ۲ طرحواره سیستم شامل مسیر گردش آب در مدار بسته، مخزن ذخیره، پمپ، لوله پاشش، پنل فتوولتایی را نشان می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود سامانه خنک‌کاری از یک لوله توزیع سوراخ‌دار نصب‌شده در امتداد لبه فوقانی پنل تشکیل شده است. آب پس از ورود به لوله، از سوراخ‌ها با قطر حدود ۲ میلی‌متر و فاصله یکنواخت ۶ سانتی‌متر خارج شده و به‌صورت یک فیلم نازک روی سطح پنل جریان می‌یابد. فاصله لوله تا سطح پنل حدود ۲ سانتی‌متر انتخاب شد تا توزیع یکنواخت آب روی کل سطح مازول حاصل شود جدول ۱ مشخصات سیستم پاشش را ارائه می‌دهد.



شکل ۲- طرحواره مسیر گردش آب در سامانه طراحی و ساخته شده در این مطالعه

مدار بسته با مخزن بازیافت	هد پمپ
نوع گردش آب	2.5m



شکل ۳- طرحواره مدار الکتریکی و تجهیزات اندازه گیری در سامانه طراحی و ساخته شده در این مطالعه

در شکل ۳ طرحواره مدار الکتریکی و تجهیزات اندازه گیری در سامانه هوشمند طراحی شده نشان داده شده است این مجموعه شامل ترموستات دیجیتال، ولت متر، آمپر متر، کنتاکتور، فیوز مینیاتوری و سیم کشی و اتصالات فرمان و قدرت می باشد. ترموستات به عنوان واحد کنترل دما عمل می کند و با اندازه گیری دمای تنظیم شده، فرمان قطع و وصل پمپ را صادر می نماید. این تجهیز امکان تعریف محدوده دمایی را فراهم می کند تا در صورت افزایش دمای پنل از حد مجاز، سیستم خنک کننده فعال گردد. کنتاکتور به عنوان کلید قدرت الکترومغناطیسی، وظیفه قطع و وصل جریان اصلی پمپ را بر عهده دارد. استفاده از کنتاکتور باعث افزایش ایمنی سیستم و جلوگیری از عبور مستقیم جریان بالا از مدار کنترل می شود. فیوز مینیاتوری برای حفاظت مدار در برابر اضافه بار و اتصال کوتاه به کار رفته است. در صورت بروز خطا، فیوز به صورت خودکار مدار را قطع کرده و از آسیب به تجهیزات جلوگیری می کند. ولت متر DC به صورت موازی و آمپر متر DC به صورت سری به ترتیب به منظور اندازه گیری ولتاژ و جریان در مدار قرار گرفته اند تا امکان ثبت لحظه ای جریان و ولتاژ در آزمایش ها فراهم گردد.

۲-۲- عملکرد کنترلی سیستم

مکانیزم عملکرد به این صورت است که با افزایش دمای پنل خورشیدی و رسیدن آن به مقدار از پیش تعیین شده، ترموستات دیجیتال فرمان فعال سازی را به کنتاکتور ارسال می کند. در نتیجه، مدار قدرت پمپ وصل شده و جریان آب بر سطح پنل برقرار می شود. آب پس از عبور از نازل، به صورت لایه ای نازک روی سطح پنل جریان یافته و ضمن جذب گرما اضافی، باعث کاهش دمای سلول های فتوولتایی می شود. آب استفاده شده پس از عبور از سطح پنل، در یک مخزن جمع آوری (تشتک) که در قسمت پایین پنل تعبیه شده است، ذخیره می گردد. این مخزن علاوه بر جمع آوری آب، امکان گردش مجدد سیال خنک کننده را فراهم می کند و نقش مهمی در کاهش مصرف آب سیستم دارد. جنس مخزن به گونه ای انتخاب شده است که

در برابر رطوبت و خوردگی مقاوم باشد. پس از کاهش دما به محدوده تعریف شده، سیستم به صورت خودکار خاموش می گردد. این ساختار کنترلی موجب می شود که مصرف انرژی پمپ بهینه شود؛ از عملکرد مداوم و غیر ضروری جلوگیری گردد؛ عمر مفید تجهیزات افزایش یابد و در نهایت ایمنی الکتریکی سیستم حفظ شود. این سیستم از نوع خنک کننده فعال مبتنی بر آب بوده و علاوه بر خنک کاری، قابلیت تمیزکاری سطح پنل را نیز داراست که این موضوع موجب کاهش افت توان ناشی از آلودگی سطح می شود. سادگی ساخت، هزینه پایین و امکان پیاده سازی در مقیاس کوچک از مزایای اصلی این نمونه آزمایشگاهی محسوب می شود. در این تحقیق، عملکرد یک سیستم فتوولتایی تحت شرایط واقعی محیطی به صورت تجربی مورد بررسی قرار می گیرد. تمرکز اصلی بر ارزیابی اثر خنک کاری و آلودگی سطحی بر پارامترهای عملکردی شامل دما، ولتاژ، توان و راندمان است.

۲-۳- شرایط محیطی و نحوه انجام آزمایش

به منظور بررسی اثر خنک کاری پاششی و آلودگی سطحی بر عملکرد پنل فتوولتایی، آزمایش های تجربی طی سه روز آفتابی منتخب در تیرماه در شهر کرمان و در بازه زمانی ثابت بین ساعت ۹ تا ۱۳ انجام شدند پنل خورشیدی مونوکریستال با زاویه نصب ۱۰ درجه رو به جنوب نصب شد. در تمامی آزمایش ها، محل نصب، زاویه استقرار، تجهیزات اندازه گیری و شرایط بهره برداری ثابت نگه داشته شد و تنها متغیرهای مورد مطالعه شامل خنک کاری و آلودگی سطح پنل بودند.

در روز نخست، عملکرد پنل در دو حالت «بدون خنک کاری» و «با خنک کاری پاششی» مورد بررسی قرار گرفت. اندازه گیری ها در ساعات ۹، ۱۰، ۱۱، ۱۲ و ۱۳ انجام شدند. در هر ساعت، ابتدا ولتاژ، جریان، دمای سطح پنل و توان خروجی در حالت بدون خنک کاری ثبت گردید. سپس سامانه پاشش آب فعال شد و پس از حدود ۳ تا ۵ دقیقه و رسیدن دمای پنل به شرایط پایدار، همان پارامترها مجدداً اندازه گیری شدند.

در روز منتخب دوم به منظور شبیه سازی شرایط واقعی بهره برداری در مناطق خشک، نمونه های گردوغبار طبیعی از محیط اطراف محل انجام آزمایش در شهر کرمان جمع آوری شدند. نمونه ها پس از خشک شدن در دمای محیط، با استفاده از الک استاندارد ۲۵۰ میکرون یکنواخت شدند تا ذرات درشت و ناخالصی ها حذف شوند. سپس گردوغبار آماده شده در ظروف دربسته تا زمان انجام آزمایش نگهداری شد. پیش از هر آزمایش، سطح پنل به طور کامل تمیز و خشک شد. سپس مقدار مشخصی از گردوغبار با استفاده از ترازوی دیجیتال با دقت ۰/۰۱ گرم توزین و به صورت یکنواخت توسط الک دستی روی سطح پنل پخش شد. برای یکنواخت سازی توزیع ذرات، از یک برس نرم استفاده شد تا چگالی آلودگی در کل سطح پنل تقریباً یکسان باشد.

به منظور ایجاد سطوح مختلف آلودگی، چهار مقدار جرم سطحی گردوغبار شامل ۲۰، ۴۰، ۶۰ و ۸۰ گرم بر مترمربع انتخاب شد که برای پنل مورد استفاده با مساحت مؤثر ۱/۶۳ مترمربع، به ترتیب معادل ۳۲/۶، ۶۵/۲، ۹۷/۸ و ۱۳۰/۴ گرم گردوغبار روی کل سطح پنل است. پس از اعمال هر سطح آلودگی، توان خروجی پنل اندازه گیری و ضریب آلودگی از رابطه زیر محاسبه شد:

$$SL = \frac{P_{clean} - P_{soiled}}{P_{clean}} \quad (1)$$

بر این اساس، سطوح آلودگی مورد بررسی به‌ترتیب متناظر با مقادیر تقریبی ۰/۱، ۰/۲، ۰/۳ و ۰/۴ می‌باشند. پس از اعمال هر سطح آلودگی و پایدار شدن شرایط عملکردی پنل، ولتاژ، جریان، دمای سطح و توان خروجی اندازه‌گیری و ثبت شدند.

در روز سوم، همان سطوح آلودگی ایجادشده در روز دوم مجدداً بر روی پنل اعمال شدند، با این تفاوت که سامانه پاشش آب در طول آزمایش فعال بود. پس از اعمال هر سطح آلودگی، سیستم خنک‌کاری راه‌اندازی شد و پس از رسیدن شرایط به حالت پایدار، پارامترهای الکتریکی و گرمایی پنل اندازه‌گیری شدند. پس از پایان اندازه‌گیری هر سطح آلودگی، پنل شستشو، خشک و سطح آلودگی بعدی اعمال گردید. داده‌های این روز به‌همراه نتایج روز اول و روز دوم برای تحلیل هم‌زمان اثر آلودگی و خنک‌کاری مورد استفاده قرار گرفته‌اند.

به‌منظور ارزیابی رفتار سامانه در شرایط مختلف بهره‌برداری، نتایج حاصل از سه روز آزمایش در چهار حالت مختلف شامل: پنل تمیز بدون خنک‌کاری، پنل تمیز با خنک‌کاری، پنل آلوده بدون خنک‌کاری، پنل آلوده با خنک‌کاری، مورد تحلیل قرار گرفتند.

سامانه خنک‌کاری طراحی شده در این پژوهش به‌صورت مدار بسته عمل می‌کند. آب پس از عبور از سطح پنل در مخزن ذخیره جمع‌آوری شده و توسط پمپ DC مجدداً به لوله توزیع آب منتقل می‌شود. به‌منظور جلوگیری از ورود ذرات معلق و رسوبات به پمپ و سوراخ‌های لوله توزیع، در مسیر مکش پمپ یک فیلتر توری استیل با مش ۱۰۰ میکرون نصب شد. این فیلتر ذرات درشت و ناخالصی‌های احتمالی را حذف کرده و از گرفتگی سوراخ‌های لوله جلوگیری می‌کند. از آنجا که مدت زمان هر آزمایش محدود بوده و مدار کاملاً بسته است، در طول انجام آزمایش تغییر محسوس در کیفیت آب مشاهده نشد. بنابراین نیازی به فرایندهای تصفیه شیمیایی یا تعویض آب در طول هر آزمایش وجود نداشت.

به‌منظور افزایش دقت و قابلیت اطمینان نتایج آزمایش، تست‌ها در بازه زمانی ثابت بین ساعت ۹ تا ۱۳ انجام شدند که این بازه متناظر با شرایط نسبتاً پایدار تابش خورشیدی در طول روز است. با وجود اینکه آزمایش‌ها در چند روز منتخب در تیرماه انجام شدند، تلاش گردید روزهایی با شرایط جوی مشابه (آسمان صاف، تغییرات کم سرعت باد و دمای محیط) انتخاب شوند تا اثر متغیرهای محیطی به حداقل برسد. علاوه بر این، هر یک از مراحل آزمایش شامل حالت بدون خنک‌کاری، حالت مجهز به سامانه خنک‌کاری هوشمند، و حالت همراه با آلودگی سطحی (گرد و غبار)، بیش از یک بار تکرار شدند تا اثر خطاهای تصادفی کاهش یابد.

همچنین، تحلیل داده‌ها بر اساس شاخص‌های نسبی عملکرد (نظیر راندمان و تغییرات توان خروجی) انجام گرفت تا تأثیر تغییرات جزئی شرایط محیطی در روزهای مختلف کاهش یابد. این رویکرد موجب می‌شود که مقایسه بین حالات مختلف به‌صورت دقیق‌تر و قابل اتکاتر انجام گیرد. داده‌های به دست آمده مبنای تحلیل گرمایی و الکتریکی قرار گرفتند.

جدول ۳، شرایط محیطی مربوط به دوره انجام آزمایش‌ها در شهر کرمان را ارائه کند. داده‌های مربوط به شدت تابش خورشیدی با استفاده از داده‌های گزارش شده در مطالعه عبدال زاده و عامری [۱۱] و برای بازه زمانی مشابه در نظر گرفته شده است، در حالیکه دمای محیط به صورت مستقیم در محل آزمایش اندازه‌گیری شده است.

جدول ۳- شرایط محیطی شدت تابش و دمای محیط در ساعات ۹ تا ۱۳

زمان	تابش (W/m ²)	دمای محیط (°C)
9	600	25
10	750	28
11	850	30
12	950	32
13	1000	35

در ادامه توان خروجی و راندمان سیستم به ترتیب با کمک رابطه ۲ و ۳ بدست آمد:

$$\eta = P_{net} / (G \times A) \quad (2)$$

$$P_{net} = VI - P_{pump} \quad (3)$$

که در آنها G شدت تابش خورشیدی (W/m²)، A، سطح پنل (m²)، V ولتاژ خروجی پنل (V)، I جریان خروجی پنل (A) و P_{pump} توان مصرفی پمپ DC می‌باشد. در این آزمایشات، نوع آلودگی به‌صورت یکنواخت فرض شده است.

۳- نتایج و بحث

در این تحقیق، عملکرد یک پنل فتوولتایی مجهز به سیستم خنک‌کاری هوشمند در دو حالت «با خنک‌کاری» و «بدون خنک‌کاری» مورد بررسی تجربی قرار گرفت. همچنین اثر آلودگی سطحی به‌صورت کنترل‌شده بر عملکرد سیستم اعمال شد. پارامترهای دمایی و الکتریکی از اندازه‌گیری مستقیم در بازه زمانی ۹ تا ۱۳ ثبت گردید.

۳-۱- بررسی اثر سیستم خنک‌کاری بر دمای پنل

دمای پنل فتوولتایی یکی از پارامترهای کلیدی تعیین‌کننده عملکرد سیستم است در این پژوهش دمای سطح پنل با استفاده از سنسورهای دمایی نصب‌شده در پشت ماژول برای دو حالت با سیستم خنک‌کاری و بدون سیستم خنک‌کاری اندازه‌گیری می‌شود. شکل ۴ نمودار تغییرات دمای پنل خورشیدی نسبت به زمان برای دو حالت مذکور ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش شدت تابش خورشیدی از ساعات اولیه صبح تا حوالی ظهر، دمای سطح پنل در هر دو حالت مرجع و مجهز به سامانه خنک‌کاری روندی افزایشی دارد. با این حال، نرخ افزایش دما در پنل مجهز به سامانه خنک‌کاری به‌طور محسوس کمتر است. علت این رفتار، انتقال گرما از سطح پنل به لایه نازک آب در حال گردش و کاهش مقاومت گرمایی بین سطح

شکل ۵ - تغییرات ولتاژ خروجی سیستم فتوولتایی در شرایط مختلف

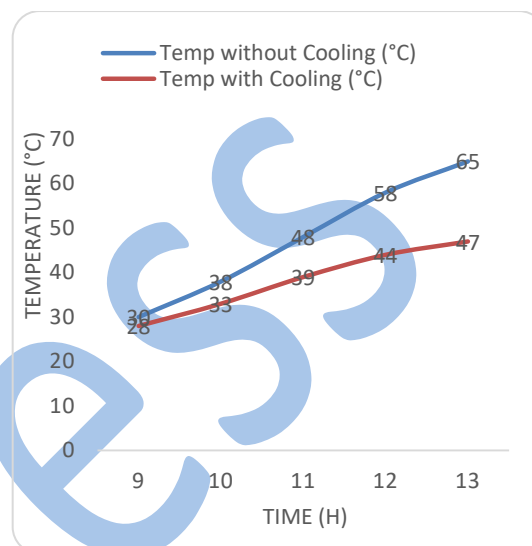
همان‌گونه که نتایج نشان می‌دهد، در حالت بدون خنک‌کاری، با افزایش شدت تابش و در نتیجه افزایش دمای پنل در ساعات میانی روز، ولتاژ خروجی روندی کاهشی از ۳۲ ولت در ساعت ۹ به ۲۸ ولت در ساعت ۱۳ را نشان می‌دهد. این رفتار ناشی از وابستگی منفی ولتاژ به دمای سلول‌های فتوولتایی است؛ به‌طوری‌که افزایش دما موجب کاهش اختلاف پتانسیل در پیوندهای نیمه‌هادی و در نتیجه افت ولتاژ خروجی می‌گردد. در مقابل، در حالت استفاده از سیستم خنک‌کاری، ولتاژ خروجی در تمامی ساعات در مقادیر بالاتری نسبت به حالت بدون خنک‌کاری قرار دارد و تغییرات آن نیز محدودتر است. به‌عنوان مثال، در ساعت اوج تابش (ساعت ۱۳)، ولتاژ خروجی در حالت خنک‌کاری برابر ۳۲ ولت ثبت شده است، در حالی که این مقدار در حالت بدون خنک‌کاری به ۲۸ ولت کاهش یافته است. این اختلاف حدود ۴ ولتی بیانگر تأثیر قابل‌توجه سیستم خنک‌کاری در بهبود عملکرد الکتریکی پنل می‌باشد. از دیدگاه فیزیکی، کاهش دمای پنل از طریق خنک‌کاری موجب کاهش نرخ بازترکیب حامل‌های بار در سلول‌های خورشیدی شده و در نتیجه ولتاژ مدار باز افزایش می‌یابد. این موضوع باعث پایداری بیشتر ولتاژ خروجی در شرایط عملیاتی مختلف می‌شود. همچنین، کاهش نوسانات ولتاژ در حالت خنک‌کاری نشان‌دهنده عملکرد پایدارتر سیستم در مواجهه با تغییرات محیطی است. در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم خنک‌کاری نه تنها موجب افزایش مقدار ولتاژ خروجی می‌شود، بلکه با کاهش حساسیت آن به تغییرات دمایی، پایداری عملکرد سیستم فتوولتایی را نیز بهبود می‌بخشد. این امر اهمیت به‌کارگیری راهکارهای مدیریت گرمایی را در طراحی و بهره‌برداری از سیستم‌های خورشیدی برجسته می‌سازد.

۳-۳- بررسی اثر سیستم خنک‌کاری بر راندمان

راندمان یکی از مهم‌ترین شاخص‌های ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتایی است که نشان‌دهنده میزان تبدیل انرژی تابشی خورشید به انرژی الکتریکی می‌باشد. در این پژوهش، راندمان سیستم با استفاده از توان خروجی اندازه‌گیری شده و شدت تابش ورودی، محاسبه شده و در دو حالت «با خنک‌کاری» و «بدون خنک‌کاری» مورد مقایسه قرار گرفته است. نتایج در شکل (۶) ارائه شده‌اند. بررسی داده‌ها نشان می‌دهد که در حالت بدون خنک‌کاری، راندمان سیستم در طول ساعات مختلف تغییرات محدودی داشته و در بازه‌ای حدود ۱۵ تا ۱۶ درصد قرار دارد. با افزایش دمای پنل در ساعات میانی روز، راندمان روندی نزولی را تجربه می‌کند که این امر ناشی از کاهش ولتاژ و توان خروجی در اثر افزایش دما می‌باشد. در مقابل، در حالت استفاده از سیستم خنک‌کاری، راندمان سیستم در تمامی ساعات به‌طور قابل‌توجهی افزایش یافته است. به‌عنوان نمونه، راندمان از حدود ۱۷ درصد در ساعت ۹ به حدود ۱۹ درصد در ساعت ۱۳ رسیده است. این در حالی است که در همان بازه زمانی، راندمان در حالت بدون خنک‌کاری تقریباً ثابت یا حتی کاهشی بوده است. بیشترین اختلاف راندمان بین دو حالت در ساعات اوج تابش مشاهده می‌شود که بیانگر تأثیر مؤثر

پنل و محیط است. این فرآیند موجب می‌شود بخشی از انرژی گرمایی جذب‌شده توسط پنل به آب منتقل شده و دمای کاری سلول‌های فتوولتایی کاهش یابد.

همچنین مشاهده می‌شود که اختلاف دمای دو حالت در ساعات میانی روز، به‌ویژه بین ساعت ۱۱ تا ۱۳، افزایش یافته است. این موضوع نشان می‌دهد که سامانه خنک‌کاری در شرایطی که بار گرمایی پنل بیشتر است، عملکرد مؤثرتری داشته و بیشترین تأثیر خود را در زمان بیشینه تابش خورشیدی نشان می‌دهد.

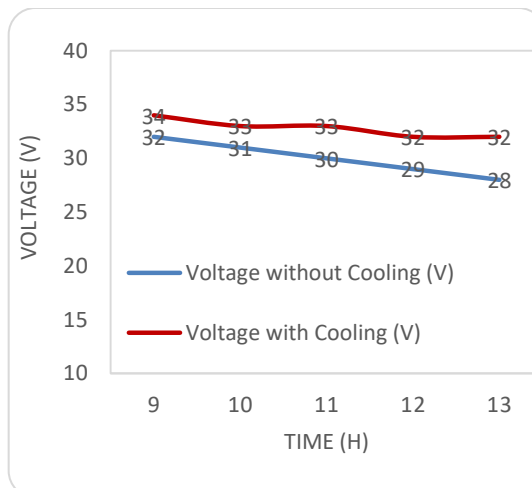


شکل ۴ - تغییرات دمای پنل در حضور و عدم حضور سامانه خنک‌کاری هوشمند

۳-۲- بررسی اثر سیستم خنک‌کاری بر ولتاژ

خروجی

ولتاژ خروجی یکی از پارامترهای کلیدی در ارزیابی عملکرد سیستم‌های فتوولتایی است که به‌طور مستقیم تحت تأثیر دمای سلول قرار دارد. در این پژوهش، ولتاژ خروجی پنل در دو حالت «با خنک‌کاری» و «بدون خنک‌کاری» در بازه زمانی ۹ تا ۱۳ اندازه‌گیری و مقایسه شد. نتایج حاصل در شکل (۵) ارائه شده است.

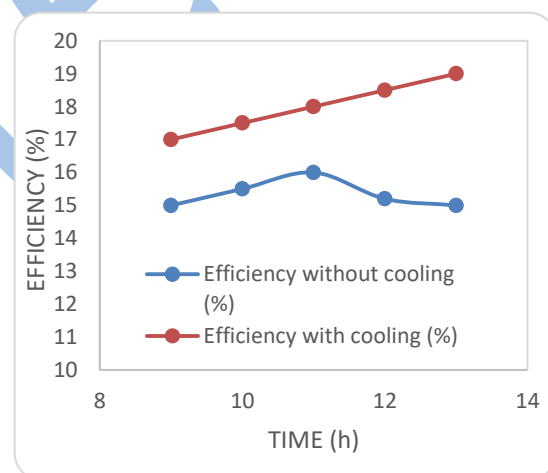


تبدیل انرژی را به دنبال داشته باشد. در این پژوهش، به منظور ارزیابی کمی اثر آلودگی، از ضریب آلودگی (Soiling Level - SL) در بازه ۰ تا ۰/۴ استفاده شده است که بیانگر افزایش تدریجی شدت آلودگی سطح پنل می‌باشد. نتایج تجربی حاصل در قالب دو نمودار مجزا در شکل‌های ۷ و ۸ ارائه شده‌اند تا اثر آلودگی بر دو پارامتر کلیدی عملکرد سیستم، یعنی توان خروجی و راندمان، به صورت تفکیک شده و دقیق مورد تحلیل قرار گیرد. بر اساس نتایج ارائه شده در شکل ۷، توان خروجی سیستم با افزایش ضریب آلودگی روندی نزولی و تقریباً خطی از خود نشان می‌دهد. به طوری که توان تولیدی از مقدار ۳۰۰ وات در شرایط بدون آلودگی ($SL=0$) به ۱۸۰ وات در بیشترین سطح آلودگی ($SL=0.4$) کاهش یافته است. این افت ۱۲۰ واتی معادل کاهش حدود ۴۰ درصدی توان خروجی است که نشان‌دهنده تأثیر بسیار قابل توجه آلودگی بر میزان انرژی تولیدی سیستم می‌باشد. رفتار تقریباً خطی کاهش توان را می‌توان به کاهش یکنواخت عبور تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش جریان اتصال کوتاه (I_{sc}) نسبت داد، در حالی که ولتاژ مدار باز (V_{oc}) معمولاً حساسیت کمتری نسبت به آلودگی دارد.

از سوی دیگر، نتایج شکل ۸ نشان‌دهنده کاهش تدریجی و یکنواخت راندمان سیستم با افزایش ضریب آلودگی است. راندمان سیستم از مقدار ۱۹ درصد در حالت تمیز به ۱۱/۴ درصد در بیشترین میزان آلودگی کاهش یافته است که بیانگر افتی معادل ۷/۶ واحد درصد می‌باشد. این کاهش راندمان نه تنها ناشی از افت توان خروجی، بلکه نتیجه افزایش تلفات داخلی، کاهش شدت تابش مؤثر و احتمال بروز ناهمبندی بین سلول‌ها در اثر آلودگی غیریکنواخت سطح پنل است. تحلیل هم‌زمان دو نمودار نشان می‌دهد که اگرچه هر دو پارامتر توان و راندمان تحت تأثیر آلودگی قرار می‌گیرند، اما کاهش توان خروجی با نرخ بیشتری نسبت به راندمان رخ می‌دهد که این موضوع اهمیت بررسی جداگانه این دو شاخص عملکردی را برجسته می‌سازد. همچنین، نتایج به دست آمده بیانگر آن است که حتی سطوح نسبتاً پایین آلودگی ۰/۱ تا ۰/۲ نیز می‌توانند کاهش قابل توجهی در عملکرد سیستم ایجاد کنند، که این امر لزوم توجه به نگهداری و بهره‌برداری بهینه از سیستم‌های فتوولتایی را دوچندان می‌کند. در مجموع، یافته‌های این بخش به وضوح نشان می‌دهند که آلودگی سطحی یکی از عوامل کلیدی در کاهش عملکرد سیستم‌های فتوولتایی بوده و می‌تواند تأثیرات قابل توجهی بر تولید انرژی در مقیاس‌های مختلف داشته باشد. از این رو، استفاده از راهکارهایی نظیر برنامه‌های تمیزکاری دوره‌ای، پوشش‌های خودتمیزشونده، یا طراحی سیستم‌های خنک‌کاری و شست‌وشوی هوشمند، می‌تواند نقش مؤثری در کاهش اثرات منفی آلودگی و بهبود پایداری عملکرد سیستم ایفا نماید.

سیستم خنک‌کاری در شرایط بحرانی دمایی است. از دیدگاه تحلیلی، افزایش راندمان در حضور خنک‌کاری را می‌توان ناشی از بهبود هم‌زمان پارامترهای الکتریکی دانست. کاهش دمای پنل موجب افزایش ولتاژ خروجی و در نتیجه افزایش توان تولیدی می‌شود، در حالی که شدت تابش ورودی تقریباً ثابت باقی می‌ماند. بنابراین، نسبت توان خروجی به توان تابشی دریافتی (راندمان) افزایش می‌یابد. این موضوع نشان می‌دهد که کنترل دمای پنل نقش کلیدی در بهینه‌سازی عملکرد سیستم دارد. علاوه بر این، نتایج بیانگر آن است که سیستم خنک‌کاری موجب کاهش نوسانات راندمان در طول زمان شده و عملکرد پایدارتر سیستم را تضمین می‌کند. این پایداری به‌ویژه در شرایطی که تغییرات دمایی سریع رخ می‌دهد، اهمیت بیشتری پیدا می‌کند.

در مجموع، نتایج این بخش نشان می‌دهد که استفاده از سیستم خنک‌کاری می‌تواند منجر به بهبود قابل توجه راندمان سیستم فتوولتایی شود، به طوری که افزایش راندمان از حدود ۱۵ درصد به ۱۹ درصد، معادل بهبود نسبی در حدود ۲۵ تا ۲۷ درصد را نشان می‌دهد. این یافته‌ها اهمیت استفاده از روش‌های مدیریت گرمایی را در افزایش بهره‌وری و عملکرد سیستم‌های خورشیدی در شرایط واقعی محیطی تأیید می‌کند. شکل‌ها و جدول‌ها بعد از اشاره در متن می‌توانند در محل مناسب داخل متن آورده شوند.

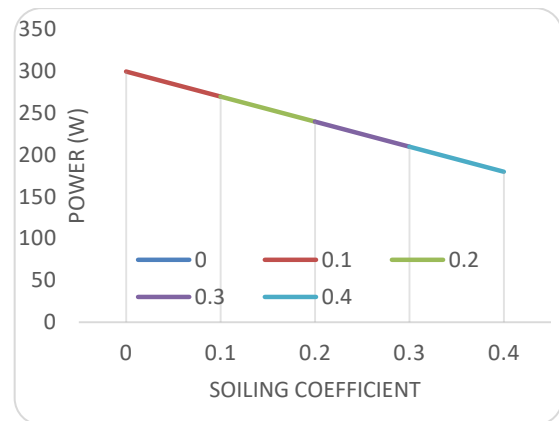


شکل ۶- راندمان سیستم با و بدون خنک‌کاری

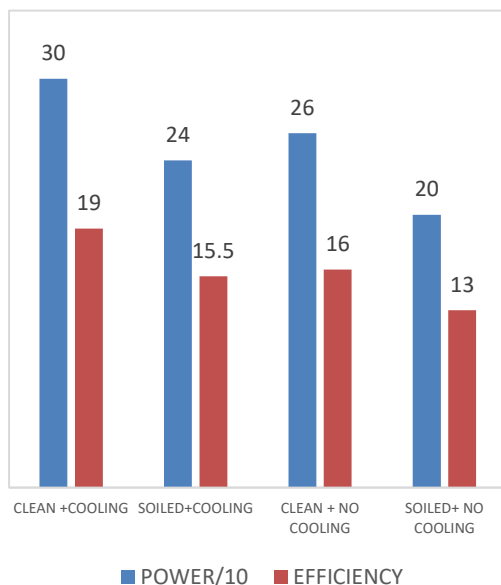
۳-۴- بررسی اثر آلودگی

آلودگی سطحی (Soiling) به عنوان یکی از مهم‌ترین چالش‌های بهره‌برداری واقعی از سیستم‌های فتوولتایی، نقش تعیین‌کننده‌ای در کاهش عملکرد و بازدهی این سیستم‌ها ایفا می‌کند. در شرایط محیطی واقعی، تجمع تدریجی ذرات گردوغبار، دوده، آلاینده‌های صنعتی و ذرات معلق در هوا بر سطح پنل‌های خورشیدی، منجر به کاهش میزان عبور تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش تولید جریان فوتوالکتریک در سلول‌ها می‌شود. این پدیده علاوه بر کاهش شدت تابش مؤثر، می‌تواند با ایجاد سایه‌های موضعی (partial shading) و افزایش دمای موضعی سلول‌ها، اثرات مخرب‌تری همچون افزایش تلفات اهمی و کاهش بازده

P/P_{ideal}			
0	19	300	تمیز + خنک کاری
20	15.5	240	آلوده + خنک کاری
13.3	16	260	تمیز + بدون خنک کاری
33.3	13	200	آلوده + بدون خنک کاری

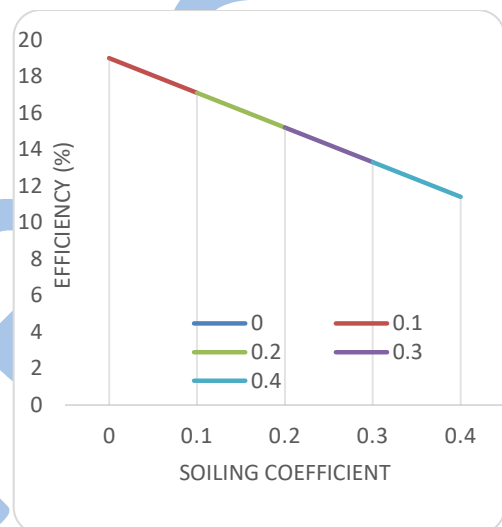


شکل ۷- اثر آلودگی سطحی بر کاهش توان خروجی سیستم



شکل ۹- توان خروجی و راندمان سیستم فتوولتایی تحت اثرات همزمان خنک کاری و آلودگی سطحی

همان گونه که از داده ها مشخص است، بهترین عملکرد سیستم مربوط به حالت «پنل تمیز همراه با خنک کاری» می باشد که در آن توان خروجی برابر ۳۰۰ وات و راندمان معادل ۱۹٪ ثبت شده است. این وضعیت بیانگر شرایط ایده آل عملکردی است که در آن هر دو عامل محدودکننده (دمای بالا و آلودگی) کنترل شده اند. در مقابل، ضعیف ترین عملکرد مربوط به حالت «پنل آلوده بدون خنک کاری» است که توان خروجی به ۲۰۰ وات و راندمان به حدود ۱۳٪ کاهش یافته است. این به معنای افتی در حدود ۳۳ تا ۳۵ درصد نسبت به حالت بهینه است که نشان دهنده تأثیر شدید و هم افزای این دو عامل می باشد. همچنین، در شرایط آلوده، فعال سازی سامانه خنک کننده توان خروجی را از ۲۰۰ به ۲۴۰ وات معادل ۲۰ درصد افزایش



شکل ۸- اثر آلودگی سطحی بر راندمان سیستم

۳-۵- بررسی همزمان اثر دما و آلودگی

افزایش دمای پنل موجب کاهش ولتاژ مدار باز و در نتیجه کاهش توان خروجی می شود. این پدیده ناشی از افزایش نرخ باز ترکیب حامل ها در سلول های نیمه هادی است. بنابراین در شرایط بدون خنک کاری، افزایش دما مستقیماً باعث افت عملکرد الکتریکی می گردد. تجمع ذرات گردوغبار بر سطح پنل نیز باعث کاهش عبور تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش شدت تابش مؤثر می شود. این موضوع مستقیماً جریان تولیدی را کاهش داده و در نهایت منجر به افت توان خروجی می شود.

به منظور بررسی دقیق تر رفتار سیستم فتوولتایی در شرایط واقعی بهره برداری، اثر همزمان دو عامل کلیدی شامل دمای کاری پنل و آلودگی سطحی به صورت ترکیبی مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج حاصل در جدول (۴) و شکل ۹ ارائه شده است.

جدول ۴- رفتار سیستم فتوولتایی در شرایط واقعی

بهره برداری (بررسی اثر همزمان دما و آلودگی)

حالت	توان (W)	راندمان (%)	افت عملکرد
			$DR = P_{ideal} -$

به صورت چند چرخه کوتاه در طول دوره آزمایش می باشد. بر این اساس، برای انجام تحلیل مهندسی، با توجه به فعال شدن پمپ هنگام رسیدن دما به حدود ۴۵ درجه سانتیگراد و هر بار روشن شدن حدود ۳۰ تا ۶۰ ثانیه و تعداد چرخه‌ها در ساعات اوج تابش (۱۱ تا ۱۳): حدود ۶ تا ۱۰ بار زمان تجمعی کارکرد پمپ در یک دوره آزمایش چهار ساعته (۹ تا ۱۳) حدود ۱۰ دقیقه در نظر گرفته شد. این مقدار بیانگر مجموع زمان روشن بودن پمپ در تمام چرخه‌های فعال سازی بوده و به معنی کارکرد پیوسته نیست.

با توجه به دبی پمپ، حجم آب عبوری از مدار در این مدت با استفاده از رابطه ۶ برابر با ۶۸ لیتر بدست می آید.

$$V_t = Q \times t \quad (6)$$

این مقدار بیانگر حجم آب گردش یافته در مدار خنک کاری است و نباید به عنوان مصرف آب در نظر گرفته شود، زیرا آب پس از جمع آوری در مخزن مجدداً وارد چرخه می شود. با توجه به مدار بسته بودن سامانه و محدود بودن تلفات ناشی از تبخیر و خروج جزئی آب از چرخه، مقدار آب جبرانی مورد نیاز برای هر دوره آزمایش حدود ۲ تا ۱ لیتر برآورد می شود. بنابراین، بخش عمده آب مورد استفاده پس از جمع آوری و فیلتراسیون مجدداً بازیافت شده و در چرخه خنک کاری مورد استفاده قرار می گیرد. این تحلیل نشان می دهد که سامانه پیشنهادی ضمن دستیابی به کاهش قابل توجه دمای پنل و افزایش عملکرد الکتریکی، مصرف واقعی آب بسیار محدودی دارد. همچنین، تأمین انرژی مورد نیاز پمپ از توان تولیدی سامانه، هزینه بهره برداری را کاهش داده و استفاده از این روش را از نظر اقتصادی توجیه پذیر می سازد. کاهش دمای کاری پنل علاوه بر افزایش بازده الکتریکی، موجب کاهش تنش های گرمایی و در نتیجه افزایش طول عمر مازول های فتوولتایی خواهد شد.

از منظر توسعه پذیری، ساختار مدار بسته و طراحی مازولار سامانه امکان استفاده از آن را در آرایه های فتوولتایی فراهم می کند. در مقیاس های بزرگ تر، هر ردیف از پنل ها می تواند به یک مدار باز چرخش مستقل شامل مخزن، پمپ و شبکه توزیع آب مجهز شود. در این حالت، افزایش تعداد پنل ها الزاماً موجب افزایش متناسب مصرف آب نخواهد شد، زیرا بخش عمده آب مورد استفاده پس از جمع آوری مجدداً وارد مدار شده و مصرف واقعی عمدتاً تابع میزان تبخیر و شرایط محیطی خواهد بود.

لازم به ذکر است که مقادیر مربوط به زمان تجمعی کارکرد پمپ، حجم آب در گردش و آب جبرانی، به عنوان یک تحلیل مهندسی مبتنی بر رفتار گرمایی مشاهده شده و مشخصات واقعی تجهیزات سامانه ارائه شده اند.

۴- نتیجه گیری

در این پژوهش، عملکرد یک سامانه فتوولتایی تک کریستال ۳۰۰ وات مجهز به سامانه خنک کاری پاششی هوشمند در شرایط اقلیمی گرم و خشک شهر کرمان به صورت تجربی بررسی شده است. مهم ترین یافته این پژوهش، ارزیابی همزمان اثر خنک کاری فعال و آلودگی سطحی بر عملکرد الکتریکی مازول فتوولتایی است که نشان می دهد مدیریت همزمان دمای کاری و شرایط سطحی پنل، نقش مهمی در حفظ و بهبود عملکرد سیستم های خورشیدی دارد. نتایج نشان می

می رساند. این نتایج نشان می دهد که استفاده صرف از خنک کاری بدون کنترل آلودگی نمی تواند عملکرد بهینه سیستم را تضمین کند. همچنین تمیز بودن پنل بدون مدیریت گرمایی نیز کافی نیست. بنابراین، ترکیب همزمان استراتژی های خنک کاری و تمیزکاری سطحی برای دستیابی به بیشینه راندمان ضروری است.

۶-۳- تحلیل مصرف آب، قابلیت توسعه سامانه

و ملاحظات اقتصادی

یکی از دغدغه های اصلی استفاده از سامانه های خنک کاری آبی در سامانه های فتوولتایی، میزان مصرف آب و امکان توسعه این سامانه در مقیاس های بزرگ است. در سامانه پیشنهادی این پژوهش، مدار خنک کاری به صورت مدار بسته طراحی شده است؛ به گونه ای که آب پس از پاشش بر سطح پنل در مخزن جمع آوری شده، پس از عبور از فیلتر جهت حذف ذرات معلق، مجدداً توسط پمپ به شبکه توزیع آب منتقل می شود. همچنین انرژی الکتریکی مورد نیاز پمپ از توان تولیدی سامانه فتوولتایی تأمین شده و سامانه به منبع تغذیه خارجی وابسته نیست.

در این سامانه، آب به صورت باز چرخشی در مدار حرکت می کند و پمپ تنها در زمان افزایش دمای پنل تا مقدار تنظیم شده توسط ترموستات فعال می شود. بنابراین، برخلاف سامانه های خنک کاری با جریان پیوسته، عملکرد پمپ به صورت متناوب بوده و آب پس از ایجاد لایه نازک بر سطح پنل، مجدداً جمع آوری و به چرخه خنک کاری بازگردانده می شود. تنها بخش محدودی از آب به دلیل تبخیر طبیعی، پاشش خارج از سطح پنل و باقی ماندن مقدار اندکی آب بر سطح پنل از مدار خارج می شود. برای ارزیابی میزان بازیافت آب، راندمان بازیافت و درصد تلفات آب به ترتیب از روابط زیر تعریف می شوند:

$$\eta_{rw} = (V_r / V_t) \times 100 \quad (4)$$

$$\text{Loss (\%)} = [(V_t - V_r) / V_t] \times 100 \quad (5)$$

به منظور برآورد مصرف آب و تحلیل اقتصادی سامانه، زمان عملکرد پمپ با توجه به رفتار گرمایی ثبت شده در آزمایش ها و منطق کنترل ترموستات بررسی شد. نتایج تجربی نشان داد که در شرایط بدون خنک کاری، دمای پنل از حدود ۳۰ درجه سلسیوس در ساعت ۹ به حدود ۶۵ درجه سلسیوس در ساعت ۱۳ افزایش می یابد. در مقابل، پس از فعال شدن سامانه خنک کاری، دمای پنل در ساعت ۱۳ به حدود ۴۷ درجه سلسیوس محدود شد. این کاهش دما نشان دهنده توانایی سامانه در دفع گرما اضافی پنل با استفاده از پاشش کنترل شده آب است.

با توجه به اینکه سامانه تحت کنترل ترموستات عمل می کند، پمپ در تمام مدت آزمایش روشن نبوده و تنها در زمان عبور دمای پنل از مقدار بحرانی فعال می شود. همچنین با توجه به دبی نسبتاً بالای پمپ و مساحت پنل مورد استفاده، هر چرخه فعال شدن پمپ تنها به زمان کوتاهی برای تشکیل و تجدید لایه آب روی سطح پنل نیاز دارد. پس از ایجاد این لایه نازک، ادامه عملکرد پمپ اثر افزایشی قابل توجهی بر کاهش دما ندارد و تنها موجب افزایش گردش آب خواهد شد.

بر اساس رفتار گرمایی مشاهده شده، کاهش دمای پنل پس از فعال شدن سامانه و ماهیت روشن/خاموش کنترل ترموستات، عملکرد پمپ

دهد که خنک کاری پاششی با کاهش دمای کاری ماژول، موجب بهبود پارامترهای الکتریکی و افزایش راندمان سیستم می شود، در حالی که آلودگی سطحی به عنوان یک عامل محدودکننده مستقل، با کاهش تابش مؤثر دریافتی، باعث افت توان تولیدی می گردد. نتایج آزمایش های انجام شده نشان می دهد که استفاده از سامانه خنک کاری هوشمند باعث کاهش دمای سطح پنل تا حدود ۱۸ درجه سلسیوس در ساعات با بیشترین بار گرمایی است. این کاهش دما موجب بهبود عملکرد الکتریکی ماژول، افزایش ولتاژ خروجی حدود ۴ ولت و افزایش راندمان الکتریکی از حدود ۱۵ درصد در حالت بدون خنک کاری به حدود ۱۹ درصد در حالت مجهز به سامانه خنک کاری می گردد. این موضوع تأثیر مستقیم کنترل دمای سلول های فتوولتایی بر کاهش افت عملکرد ناشی از افزایش دما را نشان می دهد.

بررسی اثر آلودگی سطحی نشان می دهد که تجمع ذرات آلاینده بر سطح پنل، یکی از عوامل مهم کاهش تولید انرژی در مناطق گرم و خشک است. با افزایش میزان آلودگی سطحی، توان خروجی و راندمان الکتریکی ماژول به صورت قابل توجهی کاهش می یابد؛ به طوری که در بیشترین سطح آلودگی بررسی شده، توان خروجی از ۳۰۰ وات در شرایط تمیز به حدود ۱۸۰ وات کاهش می یابد و راندمان سیستم از ۱۹ درصد به حدود ۱۱/۴ درصد می رسد. این نتایج نشان می دهد که حتی در شرایطی که مدیریت گرمایی به خوبی انجام شود، وجود لایه آلاینده روی سطح پنل می تواند مانع دستیابی به حداکثر توان تولیدی شود. تحلیل همزمان اثر خنک کاری و آلودگی سطحی نشان می دهد که این دو عامل دارای اثرات متفاوت اما مکمل بر عملکرد سیستم فتوولتایی هستند. خنک کاری قادر است اثرات منفی افزایش دمای پنل را کاهش دهد، اما نمی تواند افت ناشی از کاهش عبور تابش در اثر آلودگی را به طور کامل جبران کند. مقایسه شرایط مختلف عملکردی نشان می دهد که بهترین عملکرد مربوط به حالت پنل تمیز همراه با خنک کاری بوده، در حالی که پنل آلوده بدون خنک کاری کمترین عملکرد را ارائه داده است. بنابراین، استفاده همزمان از راهکارهای مدیریت گرمایی و کنترل آلودگی سطحی می تواند به عنوان یک راهبرد مؤثر برای افزایش پایداری عملکرد سامانه های فتوولتایی در شرایط واقعی بهره برداری مورد توجه قرار گیرد. از نظر انرژی مصرفی، نتایج نشان می دهد که توان مورد نیاز پمپ خنک کننده به دلیل استفاده از یک سامانه کم مصرف و کنترل عملکرد آن توسط ترموستات دیجیتال، محدود بوده و افزایش توان تولیدی حاصل از کاهش دمای پنل توانسته است مصرف انرژی سامانه خنک کاری را جبران نماید. بنابراین، استفاده از معیار توان خالص خروجی نشان می دهد که سامانه پیشنهادی علاوه بر افزایش راندمان پنل، قابلیت بهبود عملکرد کلی سیستم را نیز دارا است. همچنین، به دلیل استفاده از مدار بسته بازچرخشی آب و وجود سیستم فیلتراسیون، بخش عمده آب مصرفی مجدداً به چرخه خنک کاری بازگردانده شده است. تحلیل زمان عملکرد پمپ نشان می دهد که مجموع زمان فعال بودن پمپ در طول دوره آزمایش محدود بوده و با توجه به دبی ۶/۸ لیتر بر دقیقه، حجم آب گردش یافته نسبت به روش های جریان پیوسته بسیار کمتر است. این ویژگی، سامانه پیشنهادی را از نظر کاهش مصرف آب در مناطق خشک، قابل توجه می سازد.

در مجموع، نتایج این تحقیق نشان می دهد که سامانه خنک کاری

پاششی هوشمند پیشنهادی، به عنوان یک روش ساده، کم هزینه و قابل توسعه، می تواند با کاهش دمای کاری، افزایش راندمان الکتریکی و کاهش اثرات نامطلوب شرایط محیطی، عملکرد ماژول های فتوولتایی را بهبود دهد. همچنین بررسی همزمان دو عامل مهم دما و آلودگی سطحی، دید جامع تری برای ارزیابی عملکرد واقعی سیستم های خورشیدی در مناطق گرم و خشک فراهم می کند

۵- نمادها

T	دما (°C)
P _{net}	توان (W)
P _{pump}	توان پمپ (W) DC
DR	افت عملکرد
G	شدت تابش خورشیدی (W/m ²)
A	سطح پنل (m ²)
V	ولتاژ (V)
I	جریان (A)
Q	دبی (L/min)
t	زمان (min)
η _{rw}	راندمان بازیافت آب (%)
V _r	حجم آب بازیافتی (L)
V _t	حجم کل آب در گردش (L)
Loss	درصد تلفات آب (%)
P _{clean}	توان خروجی پنل تمیز
P _{soiled}	توان خروجی پنل آلوده
SL	ضریب آلودگی

۶- مراجع

- [1] International Energy Agency (IEA). World Energy Outlook. 2023. Paris (France): IEA. doi:10.1787/weo-2023-en.
- [2] REN21. Renewables 2023 Global Status Report. Paris (France): REN21; 2023. doi:10.18757/ren21gsr2023.
- [3] Parida B, Iniyar S, Goic R. A review of solar photovoltaic technologies. Renew Sustain Energy Rev. 2011; 15(3):1625-1636. doi: 10.1016/j.rser.2010.11.032.
- [4] Green MA, Dunlop ED, Yoshita M, Kopidakis N, Bothe K, Siefer G, Jiang JY. Solar cell efficiency tables: Version 68. Joule. 2026 Jul 15;10(7).
- [5] Skoplaki E, Palyvos JA. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance. Sol Energy. 2009; 83(5):614-624. doi: 10.1016/j.solener.2008.10.008.
- [6] Dubey S, Sarvaiya JN, Seshadri B. Temperature dependent photovoltaic (PV) efficiency. Energy Procedia. 2013; 33:311-321. doi: 10.1016/j.egypro.2013.05.072.
- [7] Radziemska A. The effect of temperature on the power drop in crystalline silicon solar cells. Renew Energy. 2003; 28(1):1-12. doi:10.1016/S0960-1481(02)00015-0.

- [17] Sayyah A, Horenstein MN, Mazumder MK. Energy yield loss caused by dust deposition on photovoltaic panels. *Sol Energy*. 2014; 107:576-604. doi:10.1016/j.solener.2014.05.030.
- [18] Kimber A, Mitchell L, Nogradi S, Wenger H. The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States. 2006; IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference, Waikoloa, HI, USA, 2391-2395. doi: 10.1109/WCPEC.2006.279690.
- [19] Sarver T, Al-Qaraghuli A, Kazmerski LL. A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy. *Renew Sustain Energy Rev*. 2013; 22:698-733. doi: 10.1016/j.rser.2013.02.012.
- [20] Darwish Z, Darwish ZA, Sopian K. Effect of dust on photovoltaic performance: Review and research status. 2013.
- [21] Kaldellis JK, Kapsali M. Simulating the dust effect on the energy performance of photovoltaic generators based on experimental measurements. *Appl Energy*. 2011; 88(11):3851-3858. doi:10.1016/j.apenergy.2011.04.067.
- [22] Liu Y, Li H, Li L, Yin X, Wu X, Su Z, Gao F, Cai B, Tang L, Zhouet S. Solar photovoltaic panel soiling accumulation and removal methods: A review. *IET Renewable Power Generation*. 2024;18(16):4097-4118. <https://doi.org/10.1049/rpg2.12940>.
- [۲۳] گیجکاران آ، جدا ف. طراحی و بهینه‌سازی یکپارچه آب‌شیرین‌کن خورشیدی با ذخیره‌سازی انرژی گرمایی به کمک مواد تغییر فاز دهنده. *مجله مهندسی مکانیک تبریز*. ۱۳۹۸؛ ۴۹(۱):۲۳۵-۲۴۴.
- [8] Green MA. General temperature dependence of solar cell performance. *Prog Photovolt Res Appl*. 2003; 11(5):333-340.
- [9] King D L, Kratochvil J A, Boyson W E. Temperature coefficients for PV modules and arrays: measurement methods, difficulties, and results. Conference Record of the Twenty Sixth IEEE Photovoltaic Specialists Conference - 1997, 29 Sept. 1997 - 3 Oct. 1997, Anaheim, CA, USA, id.285.
- [10] Krauter S. Increased electrical yield via water flow over photovoltaic panels. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2004; 82(1-2):131-137. doi: 10.1016/j.solmat.2004.01.009.
- [11] Abdolzadeh M, Ameri M. Improving the effectiveness of a photovoltaic water pumping system by spraying water over the front of photovoltaic cells. *Renewable Energy*. 2009; 34:91-96. doi: 10.1016/j.renene.2008.03.024.
- [12] Odeh S, Behnia M. Improving photovoltaic module efficiency using water cooling. *Heat Transf Eng*. 2009; 30(6):499-505. doi:10.1080/01457630802529214.
- [13] Roynce A, Dey CJ, Mills DR. Cooling of photovoltaic cells: A review. *Sol Energy Mater Sol Cells*. 2005;86(4):451-483. doi:10.1016/j.solmat.2004.09.004.
- [14] Ahmed, Y.E., Maghami, M.R., Pasupuleti, J., Danook, S.H., Basim Ismail, F. Overview of recent solar photovoltaic cooling system approaches. *Technologies*. 2024;12(9):171. doi:10.3390/technologies12090171.
- [15] Kabakus A, Öztürk A, Sönmez F. A new approach to cooling photovoltaic panels: Electrospray cooling, Case Studies in Thermal Engineering. 2024;64(1):105545, ISSN 2214-157X. <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.105545>.
- [16] Mani M, Pillai R. Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renew Sustain Energy Rev*. 2010;14(9):3124-3131. doi: 10.1016/j.rser.2010.07.065.