

بررسی اثر رطوبت هوا و تشکیل شبیم بر عملکرد پنل‌های خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی

علی‌ماشاءاله کرمانی^{۱*}، سیداحمد حسینی^۲، اکبر عرب حسینی^۳

۱. استادیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۲. دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

۳. دانشیار، گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۶/۴/۴ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۶/۷/۱۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۶/۷/۱۷)

چکیده

این پژوهش به بررسی اثر رطوبت هوا و تشکیل شبیم بر پارامترهای عملکردی دو نوع پنل خورشیدی سیلیکونی مونوکریستال و پلی‌کریستال در شرایط آزمایشگاهی می‌پردازد. برای ایجاد شرایط رطوبتی مختلف و تشکیل شبیم دستگاه آزمایشگاهی آزمون عملکرد پنل‌های خورشیدی به سامانه کنترل شرایط محیطی دما و رطوبت نسبی تجهیز گردید. دو نوع آزمایش اثر رطوبت نسبی هوا در سه سطح ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد در دما ۲۵ درجه سلسیوس و اثر تشکیل شبیم ناشی از آن‌ها بر روی سطح دو نوع پنل در سه تکرار انجام شد. با توجه به تحلیل تصاویر در نرم‌فزار *imagJ* مقدار پوشش تشکیل شبیم روی سطح پنل در رطوبت‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد به ترتیب $۰/۴۵/۱۹$ ، $۰/۶۳/۵$ و $۰/۸۳/۶۲$ برآورد گردید. با تعیین منحنی‌های مشخصه جریان - ولتاژ (*I-V*) و توان - ولتاژ (*P-V*) برای شرایط مختلف، پارامترهای عملکردی شامل اختلاف پتانسیل مدار باز (V_{oc})، شدت جریان اتصال کوتاه (I_{sc})، توان بیشینه (P_{max})، اختلاف پتانسیل بیشینه (V_{max})، شدت جریان بیشینه (I_{max}) و راندمان تعیین گردید. نتایج نشان داد که تشکیل شبیم بر روی سطح پنل خورشیدی موجب افزایش پارامترهای عملکردی نسبت به شرایط هوای مرطوب می‌شود. اثر نوع پنل سیلیکونی، رطوبت نسبی و نوع شرایط محیطی تقریباً بر کلیه پارامترهای عملکردی پنل خورشیدی بسیار معنی‌دار ($p < 0.01$) بود. با افزایش رطوبت هوا و میزان پوشش شبیم روی سطح پنل پارامترهای عملکردی به طور خطی کاهش یافت. اثر دما بر پارامترهای عملکردی نسبت به اثر رطوبت هوا خیلی بیشتر بود. به طور کلی، راندمان پنل خورشیدی مونوکریستال در شرایط تشکیل شبیم ناشی از رطوبت نسبی در محدوده ۴۵ تا ۷۵ درصد به ترتیب موجب افزایش $۱۳/۷۴$ تا $۸/۴۳$ درصد برای پنل مونوکریستال و $۱۱/۳۸$ تا $۸/۰۱$ درصد برای پنل نوع پلی‌کریستال نسبت به شرایط هوای مرطوب گردید.

واژه‌های کلیدی: پنل‌های خورشیدی، رطوبت نسبی، شبیم، راندمان، عملکرد

مقدمه

در محیط‌های باز و در معرض انرژی تابشی خورشید قرار می‌گیرند. طیف خورشیدی تابیده شده به سطح پنل بسته به شرایط محیطی مختلف با رطوبت، دی‌اکسید کربن، گرد و غبار و ... متفاوت می‌باشد. در طراحی سیستم‌های فتوولتائیک بازده پنل‌های خورشیدی در شرایط محیطی مختلف یک پارامتر مهم و تأثیر گذار می‌باشد (Ibrahim, 2011). از طرفی به دلیل هزینه‌بر بودن آن باید شرایطی را ایجاد کرد که بتوان حداکثر بازده را از آن به دست آورد. شرایط آب و هوایی به‌ویژه میزان دما، رطوبت، آلاینده‌ها، بارندگی، گرد و غبار، سرعت و جهت باد اثر منفی بر کارایی سیستم‌های نصب‌شده خورشیدی دارد (Xu et al., 2016). مشخصات فنی پنل‌های خورشیدی که در اختیار مصرف‌کننده قرار می‌گیرد در شرایط استاندارد (STC^1) دما

امروزه، انرژی‌های تجدیدپذیر به عنوان یک راه حل مؤثر برای کاهش مصرف سوخت‌های فسیلی و کاهش مشکلات زیست محیطی مورد توجه قرار گرفته است. علاوه بر این، ارائه الگوی مصرف انرژی جامعه از منابع انرژی‌های تجدیدپذیر یکی از مهم‌ترین چالش‌ها است (Lewis, 2007). انرژی فراوان و لایزال خورشید، بدون نیاز به شبکه‌های انتقال و توزیع عظیم و پرخرج، در سراسر جهان گسترده شده است. با توجه به مساحت ایران، کل مقدار تابش در ایران حدود $۳/۳$ میلیون تراوات ساعت در سال می‌باشد که ۱۳ برابر کل انرژی مصرفی در ایران می‌باشد (Taghavi, 2015). سلول‌های فتوولتائیک به منظور تولید انرژی،

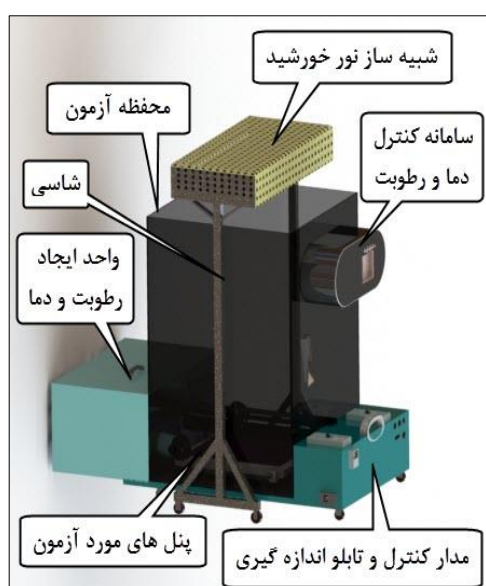
1. Standard testing condition

* نویسنده مسئول: amkermani@ut.ac.ir

مواد و روش‌ها

دستگاه شبیه‌ساز شرایط محیطی

در این پژوهش برای اجرای آزمایش‌ها، دستگاه آزمون عملکرد پنل‌های خورشیدی (شکل ۱) ساخته شده توسط Ameri et al., (2016) به سامانه کنترل شرایط محیطی رطوبت و دما تجهیز گردید. اجزای دستگاه مورد نظر شامل؛ شبیه‌ساز نورخورشید، محفظه آزمون و محل قرارگیری پنل، واحدهای ایجاد رطوبت و دما، سامانه کنترل دما و رطوبت، تابلو اندازه‌گیری ثبت خروجی-های پنل‌های مورد آزمون و شاسی است.



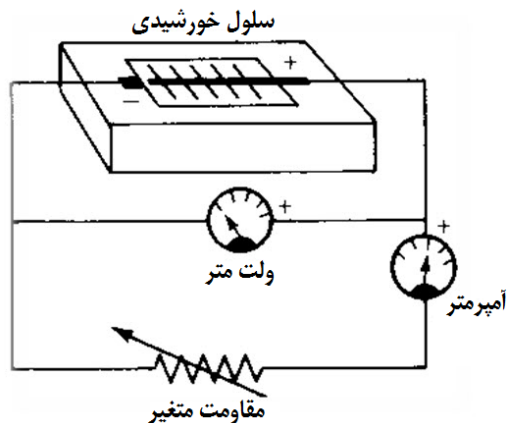
شکل ۱. دستگاه آزمون عملکرد پنل خورشیدی مجهز به محفظه کنترل شرایط محیطی دما و رطوبت.

۲۵ درجه سلسیوس، تابش خورشید 1000 W/m^2 و جرم توده هوا $1/5$ می‌باشد. بنابراین برآورد دقیق عملکرد پنل‌های خورشیدی برای بکارگیری در شرایط مختلف محیط ضروری و مهم می‌باشد (Bashir et al., 2013). حدود ۳۰ درصد انرژی تابشی خورشید توسط ابرها جذب یا منعکس می‌شود، میزان آن برای مناطق مرطوب به ۷۰ درصد می‌رسد (Kazem & Chaichan, 2015). شب‌نم یا ژاله معمولاً هنگام صبح بر روی گیاهان و اجسام سرد دیگر تشکیل می‌شود. علت پدید آمدن شب‌نم بدان جهت است، که هوا غالباً شب‌ها رو به سردی می‌رود و مولکول‌های هوا زودتر از ذرات بخار آب اشباع می‌گردند. دو عامل اشباع نسبی و برودت موجب می‌شوند که ذرات بخار آب تبدیل به قطره‌های ریز آب شود و بر روی سطوح مختلف و گیاهان قرار گیرند. به دمایی که در شرایط حاضر هوا تا آن درجه حرارت باید سرد شود تا قطرات رطوبت ایجاد گردد، دمای نقطه شب‌نم می‌گویند. قرار گرفتن کشور ایران میان دریای خزر در شمال و خلیج فارس و دریای عمان در جنوب همچنین دارای رطوبت نسبی، سرعت باد و تعداد روزهای آفتابی نسبتاً زیاد باعث شده که میزان رطوبت هوا و شب‌نم در جلگه‌های کناره دریاها اثر بسیار داشته باشد (Sarparast et al., 2014). با توجه به آزمایش‌های کراتور، تابش روی سطح پنل موجب بازتاب نور حدود ۸ تا ۱۵ درصد می‌شود که با تشکیل قطرات آب روی سطح پنل موجب کاهش ۲ تا ۳/۶ درصد بازتاب نورخورشید می‌شود (Krauter, 2004).

با توجه به مصوبه هیئت وزیران، تأمین ۲۰ درصد از برق نهادهای دولتی با انرژی‌های تجدیدپذیر همچون نصب پنل‌های خورشیدی الزامی شده است (Anonymous, 2016). در راستای استفاده گسترده و فرهنگ‌سازی بکارگیری سلول‌های خورشیدی برای مناطق مختلف کشور، ارزیابی شرایط آب و هوایی بر عملکرد سامانه‌های فتوولتائیک در کشور یک ضرورت محسوب می‌گردد. به منظور امکان‌سنجی کاربرد پنل‌های خورشیدی در مناطق مرطوب نیاز به ارزیابی اثرات رطوبت هوا و شب‌نم است. با عنایت به کمبود اطلاعات در خصوص اثر عوامل محیطی شامل رطوبت و دمای هوا بر عملکردی پنل‌های خورشیدی ضرورت دارد. از این‌رو، هدف از انجام این تحقیق، بررسی سطوح مختلف رطوبت هوا و تشکیل شب‌نم بر مشخصات عملکردی و راندمان پنل‌های خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی بوده است.

شبیه‌ساز نورخورشید دستگاه آزمون از لامپ‌های ال‌ای‌دی با ترکیب چهار نور سفید، آبی، قرمز و فروسرخ به صورت

داده‌اند (Epia, 2015). در این پژوهش دو نمونه پنل مونوکریستال و پلی کریستال ساخت شرکت Yingli Solar کشور چین مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فنی این دو نوع پنل برای شرایط استاندارد در جدول (۱) ارائه شده است.



شکل ۲. طرح‌واره مدار واحد اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی پنل.

جدول ۱. مشخصات فنی پنل‌های فتوولتائیک مورد بررسی

نوع پنل سیلیکونی	مونوکریستال	پلی کریستال
ولتاژ مدار باز (ولت)	۲۲/۵	۲۱/۵۲
جریان اتصال کوتاه (آمپر)	۰/۶۱	۰/۶۶
ولتاژ توان بیشینه (ولت)	۱۸	۱۷/۵۶
جریان توان بیشینه (آمپر)	۰/۵۶	۰/۶
توان بیشینه (وات)	۱۰	۱۰
مساحت پنل (متر مربع)	۰/۰۷۲	۰/۰۹۲
تعداد سلول	۳۶	۳۶

روش انجام آزمایش

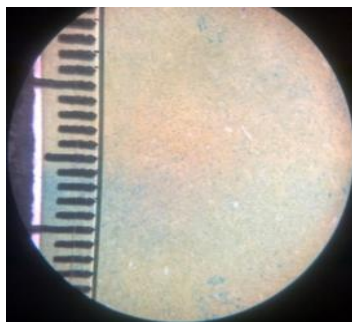
در اثر کاهش دمای هوای مرطوب و افزایش رطوبت، مولکول‌های هوا از ذرات بخار آب اشباع می‌گردند. این دو عامل موجب تبدیل ذرات بخار آب به قطره‌های ریز آب روی سطح اجسام شده و اصطلاحاً شبیم تشکیل می‌گردد. دمای نقطه شبیم دمایی است که هوای مرطوب برای آن که رطوبتش به حد اشباع برسد، بایستی هوا تا آن دما سرد شود. در این تحقیق برای مطالعه اثر تشکیل شبیم روی سلول‌های خورشیدی سه سطح رطوبت نسبی هوا ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس انتخاب شد. در هر یک از این سطوح رطوبتی با کاهش دما، شبیم روی سطوح پنل ایجاد شد. در دمای ۲۵ درجه سلسیوس برای رطوبت‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد با استفاده از نمودار سایکرومتریک (شکل ۳)، دمای نقطه شبیم به ترتیب ۱۲/۵، ۱۶/۵ و ۲۰/۵۱ تعیین گردید (Anonymous, 2009). برای انجام آزمایش پس از تنظیم هر سطح رطوبت نسبی هوا در

مجموعه‌های مربع شکل ساخته شده است (Kohraaku and Kurokawa, 2006). در این منبع نور تعداد ۳۶۸۰ عدد ال‌ای‌دی بیضی شکل^۱ با قطر پنج میلی‌متر (هر یک رنگ‌ها تعداد ۹۲۰ عدد) استفاده شده است. محفظه آزمون از جنس پلی‌کربنات با ضخامت ۵ میلی‌متر دارای استحکام کافی و سبک، ساخته شده است. به منظور جلوگیری از انعکاس نور از سطح داخلی محفظه به روی پنل و تغییرات دمای هوای درون محفظه، به ترتیب سطح داخلی با یک پوشش سیاه رنگ و سطح بیرونی بوسیله عایق پشم‌شیشه پوشانده شد. واحد ایجاد رطوبت و دما تشکیل شده است از دستگاه‌های رطوبت‌ساز التراسونیک، خنک‌ساز آبی، گرمکن الکتریکی می‌باشد. رطوبت‌ساز با ظرفیت ۴ لیتر ساخت شرکت شفابخش کشور ایران رطوبت مورد نیاز درون محفظه آزمون را فراهم می‌کرد. برای ایجاد شرایط دمایی مورد نیاز (۵۰°C - ۱۰°C) دو دستگاه خنک‌ساز آبی و گرمکن الکتریکی ساخته شد. برای هدایت شرایط رطوبت و دما از واحد رطوبت-ساز و گرمکن الکتریکی توسط دو عدد لوله خرطومی به محفظه آزمون متصل شد. شرایط محیطی آماده شده از طریق دو عدد لوله از جنس PVC به قطر ۳۰ میلی‌متر دارای شیار طولی روی بدنه آن به درون محفظه انتقال می‌یابد. به منظور یکنواختی شرایط درون محفظه چهار عدد دمنده کوچک ۱۲ ولت در پایین محفظه و متمایل به سمت خروجی کانال‌های شیاردار ورودی رطوبت و دما، قرار داده شد. واحد کنترل محیطی دستگاه، رطوبت‌ساز، گرمکن الکتریکی، و خنک‌ساز آبی را کنترل می‌کند. برای کنترل دما از حس‌گر LM35 و برای رطوبت هوا از حس‌گر HS1101 توسط میکروکنترلر AVR به صورت هم‌زمان اندازه‌گیری می‌کند. محدوده کاری برای حس‌گر رطوبت ۱ تا ۹۹٪ با دقت ± 1 درصد و برای حس‌گر دما 55°C تا 150°C با دقت $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ است. تابلو اندازه‌گیری و کنترل مدار پنل برای اندازه‌گیری شدت جریان (I) و اختلاف پتانسیل (V) پنل با توجه به مدار شکل (۲) از یک دستگاه آمپر متر و ولت‌متر دیجیتالی مدل Victor ساخت کشور چین استفاده شد. برای اندازه‌گیری شدت جریان یک مقاومت متغیر ۱۰ کیلو اهمی در مدار خروجی پنل‌ها قرار داده شد.

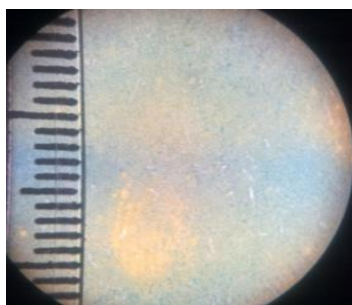
نوع پنل‌های مورد آزمون

با بررسی‌های انجام شده دو نوع پنل رایج مورد استفاده در بازار ایران شامل پنل‌های سیلیکونی مونوکریستال و پلی کریستال می‌باشد. این سلول‌ها ۸۸٪ از بازار جهان را به خود اختصاص

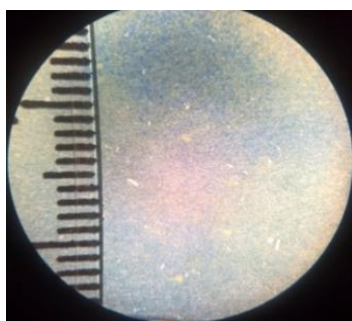
عکس برداری شده و با استفاده از نرم افزار پردازش و تحلیل تصویر ImagJ درصد پوشش شبنم روی سطح پنل برآورد گردید. شکل (۵) نمونه های کاغذ حساس به آب برای سه حالت تشکیل شبنم را نشان می دهد. نتایج نشان داد که میانگین درصد پوشش شبنم روی سطح پنل برای رطوبت های نسبی هوا ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد به ترتیب ۴۵/۱۹، ۶۳/۵ و ۸۳/۶۲ درصد بود.



(الف)



(ب)



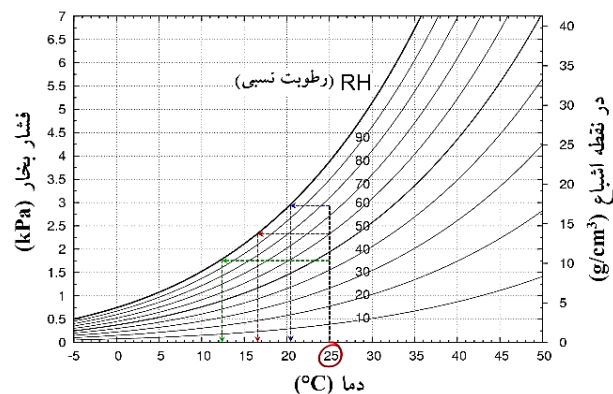
(ج)

شکل ۵. تراکم شبنم روی سطح کاغذ حساس به آب، الف) ۱۹/۴۵٪ در رطوبت نسبی ۴۵ درصد، ب) ۶۳/۵٪ در رطوبت نسبی ۶۰ درصد، و ج) ۸۳/۶۲٪ در رطوبت نسبی ۷۵ درصد.

پارامترهای عملکردی مورد بررسی

مهم ترین پارامترهای عملکردی مورد اندازه گیری شامل اختلاف پتانسیل و شدت جریان می باشد که توسط واحد اندازه گیری دستگاه آزمون (شکل ۲) اندازه گیری و ثبت شد و با استفاده از آن منحنی مشخصه شدت جریان- ولتاژ (I-V) رسم شد. وقتی مقاومت متغیر روی صفر باشد سلول اتصال کوتاه شده و

دمای ۲۵ درجه سلسیوس، واحد رطوبت ساز و گرمکن شرایط اولیه مورد نظر را فراهم نموده و داده های خروجی پنل ها ثبت گردید. سپس برای تشکیل شبنم، دمای نقطه شبنم متناظر روی واحد کنترل تنظیم و پس از تشکیل شبنم روی سطح پنل داده های خروجی پنل در واحد اندازه گیری دستگاه ثبت شد. آزمایش های برای سطوح مختلف رطوبت و دمای اولیه و تشکیل شبنم برای هر یک از دو نوع پنل در سه تکرار انجام شد.

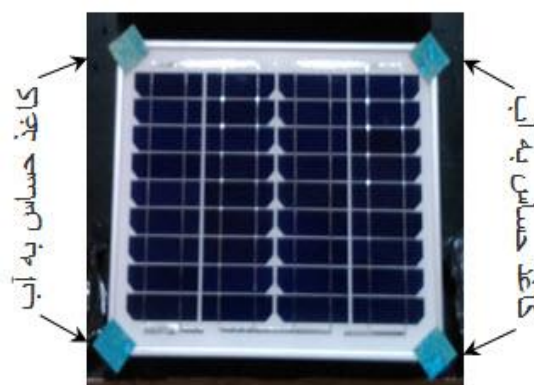


شکل ۳. نمودار سایکرومتریک و تعیین دمای نقطه شبنم برای سطوح

رطوبت نسبی مورد بررسی (Anonymous, 2009).

میزان پوشش شبنم روی سطح پنل

به منظور تعیین میزان پوشش قطرات شبنم بر روی سطح پنل از کاغذهای حساس به آب ساخت شرکت Ciba استفاده شد. این نوع کاغذ یک کارت مقاوم باروکش مخصوص و سطح زرد رنگ است که با ترشح قطرات آب روی آن به رنگ آبی تیره تغییر رنگ می دهد. شکل (۴) تشکیل شبنم بر روی پنل مورد آزمایش و کاغذ حساس به آب را نشان می دهد.



شکل ۴. پنل خورشیدی در شرایط تشکیل شبنم همراه با نصب کاغذ حساس به آب.

از کاغذهای تغییر رنگ یافته هر تیمار آزمایش با استفاده از دستگاه بینوکولار دوربین دار مدل SMZ ساخت کشور اسپانیا

شرایط تشکیل شبنم روی سطح پنل تعیین گردید. با تقسیم این مقدار بر توان پنل در شرایط شبنم، راندمان کاهش یافته پنل محاسبه شد (Ndiaye et al., 2013).

$$\eta = \frac{P_d - P_h}{P_h} \times 100 \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در آن، η = درصد افزایش راندمان (درصد)، P_h = توان الکتریکی پنل در شرایط هوای مرطوب (وات)، و P_d = توان الکتریکی پنل در شرایط تشکیل شبنم هوای با رطوبت متناظر (وات).

طرح آماری و روش بررسی نتایج

داده‌های حاصل از پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی در شرایط هوای مرطوب و تشکیل شبنم به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری بلوک‌های کامل تصادفی توسط نرم‌افزار آماری SAS v.9.2 مورد تجزیه قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵٪ انجام شد.

نتایج و بحث

منحنی‌های مشخصه جریان-پتانسیل (I-V) و توان-پتانسیل (P-V) برای دو نوع پنل سیلیکونی مونو و پلی کریستال در شرایط هوای با رطوبت نسبی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد در دمای ۲۵ درجه سلسیوس و شرایط تشکیل شبنم در شکل (۷) ارائه شده است. با توجه به این منحنی‌ها می‌توان دریافت که در حالت تشکیل شبنم پتانسیل و جریان تولید شده هر دو نوع پنل افزایش می‌یابد.

تغییرات ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه

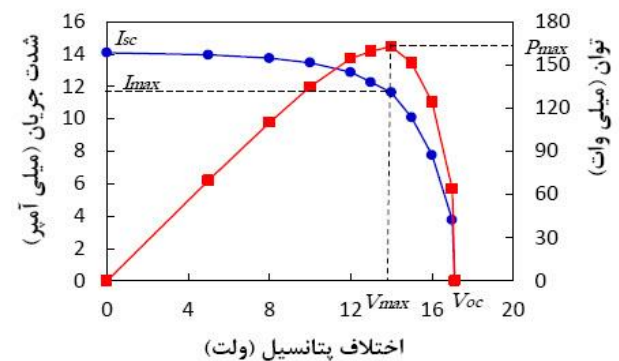
شکل (۸) (الف) و (ب) به ترتیب تغییرات میانگین ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه بر حسب رطوبت نسبی هوا برای دو حالت هوای مرطوب و شرایط تشکیل شبنم برای دو نوع پنل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که در شرایط محیطی تشکیل شبنم ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه پنل‌های فتوولتائیک نسبت به شرایط محیطی مرطوب افزایش یافته است. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش مقدار آب یا پوشش شبنم روی سطح پنل پارامتر ولتاژ مدار باز و جریان اتصال کوتاه به شکل خطی کاهش می‌یابد. ولتاژ مدار باز در حالت شبنم ناشی از سطوح رطوبت ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد برای پنل مونوکریستال به ترتیب ۳/۹، ۳/۰۵، ۲/۳۱ درصد و برای پنل نوع پلی کریستال ۴/۵۷، ۳/۱۶ و ۱/۹۶ درصد افزایش نسبت به دمای مرطوب در ۲۵ درجه سلسیوس نشان داد. میزان درصد افزایش جریان اتصال کوتاه برای شرایط ذکر شده برای پنل مونو و پلی کریستال به ترتیب ۲/۸۴، ۲/۵۲، ۱/۶، ۲/۴۵، ۲/۰۲ و ۱/۱۳ بود.

بیشترین جریان را تولید می‌کند، که به عنوان جریان اتصال کوتاه^۱ (I_{sc}) ثبت گردید. وقتی مقاومت متغیر روی ۱۰ کیلو اهمی قرار بگیرد جریانی از آن عبور نمی‌کند و اصطلاحاً مدار باز است، که ولتاژ مدار باز^۲ (V_{oc}) نیز ثبت شد. برای رسم منحنی I-V در چند نقطه دیگر از مقاومت متغیر داده‌های شدت جریان و اختلاف پتانسیل ثبت گردید. با استفاده از رابطه (۱) برای داده‌های مذکور توان الکتریکی خروجی محاسبه و منحنی مشخصه توان-ولتاژ (P-V) بدست آمد (Pidwirny, 2006).

$$P = V.I \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در آن؛ V = اختلاف پتانسیل (V)، I = شدت جریان (A)، و P = توان الکتریکی خروجی (W).

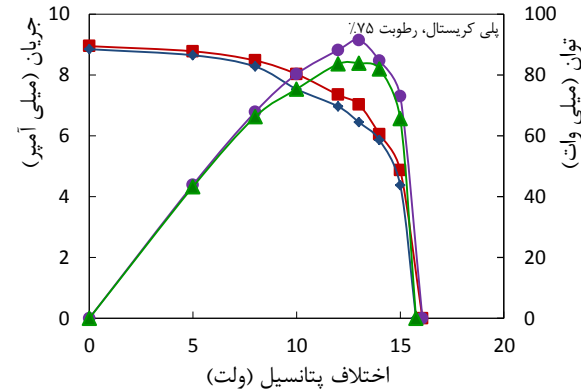
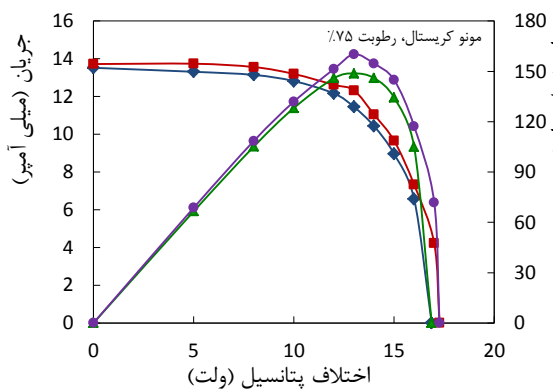
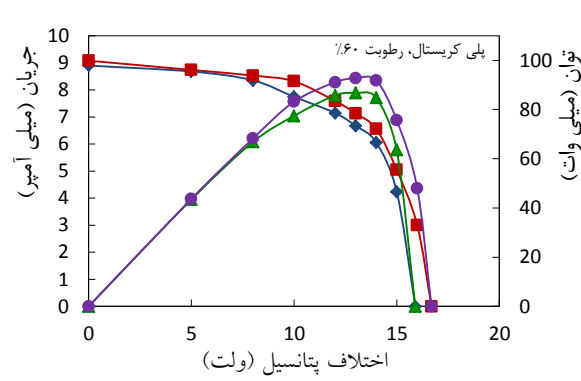
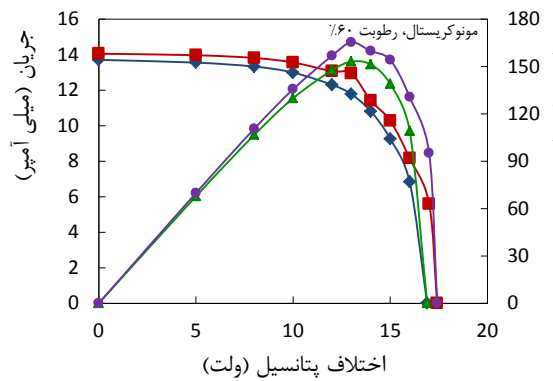
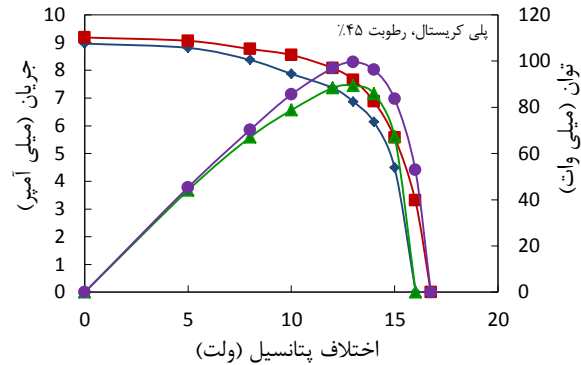
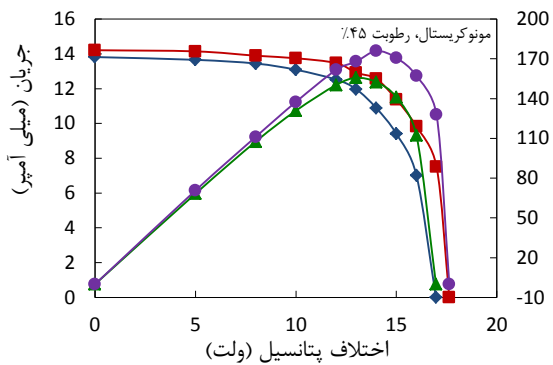
شکل (۶) نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ بدست آمده از یک آزمایش را نشان می‌دهد. نقطه توان بیشینه^۳ (MPP) نقطه‌ای است که در آن جریان و ولتاژ تولید شده بیشترین توان (P_{max}) را تولید می‌کند. جریان در نقطه توان بیشینه با I_{max} و ولتاژ در آن نقطه با V_{max} نشان داده شده است. برای تعیین آن‌ها با استفاده نرم‌افزار متلب Matlab R2012b بر داده‌های جریان-ولتاژ با کمک دستور polyfit منحنی برازش شده و معادله آن به دست آمد. سپس با استفاده از این معادله، مقدار توان بیشینه (P_{max}) محاسبه و شدت جریان بیشینه (I_{max}) و (V_{max}) تعیین گردید.



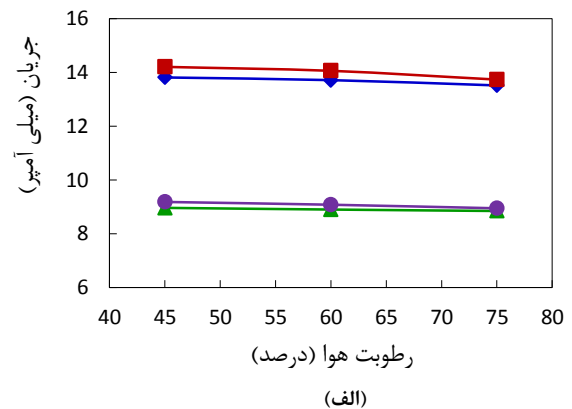
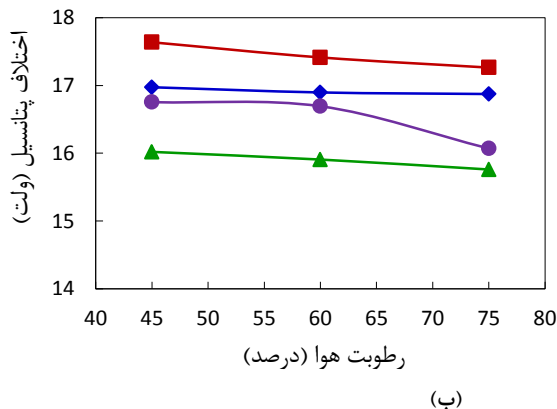
شکل ۶. نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه، جریان-ولتاژ (I-V) و توان-ولتاژ (P-V).

با استفاده از رابطه (۲) میزان افزایش راندمان توان الکتریکی تولید شده توسط پنل خورشیدی در شرایط تشکیل شبنم روی سطح پنل نسبت به شرایط هوای مرطوب محاسبه گردید. جهت انجام این محاسبه میزان کاهش توان الکتریکی خروجی پنل در شرایط هوای مرطوب از توان خروجی پنل در

1. Short circuit current
2. Open circuit voltage
3. Maximum power point

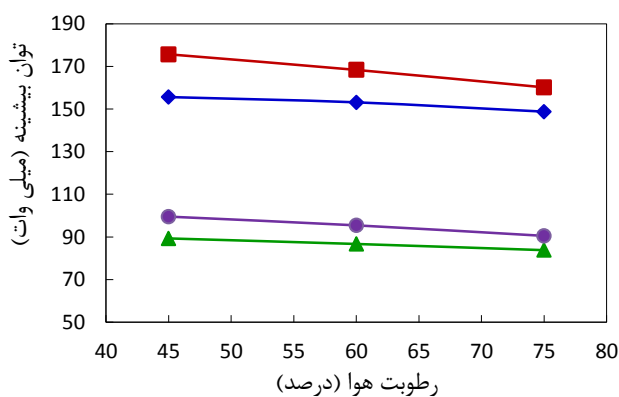


شکل ۷. منحنی‌های مشخصه I-V و P-V پنل‌های سیلیکونی مونو و پلی کریستال در محیط با رطوبت‌های ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد در دمای ۲۵°C و شرایط تشکیل شبنم، (■ و ◆ به ترتیب I-V در شرایط هوای مرطوب و تشکیل شبنم؛ ● و ▲ به ترتیب منحنی P-V در شرایط هوای مرطوب و تشکیل شبنم).



شکل ۸. (الف) تغییرات جریان اتصال کوتاه، و (ب) تغییرات پتانسیل مدار باز با رطوبت، (■ و ◆ به ترتیب مقدار پارامتر در شرایط تشکیل شبنم و هوای مرطوب در دمای ۲۵°C برای پنل مونوکریستال؛ ● و ▲ برای پنل پلی کریستال).

(I-V) پنل‌ها و استفاده از رابطه شماره (۱) مقادیر توان بیشینه خروجی محاسبه شد. شکل (۹) تغییرات میانگین توان بیشینه بر حسب رطوبت نسبی در دو حالت رطوبتی و تشکیل شبنم برای دو نوع پنل را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که توان بیشینه در هر دو پنل سیلیکونی مورد نظر در دمای شبنم بیشتر از دمای ۲۵ درجه سلسیوس می‌باشد. همچنین افزایش توان بیشینه در پنل مونو و پلی کریستال به ترتیب از ۷/۶۶ تا ۱۲/۸۸ درصد و ۷/۹۹ تا ۱۲/۴۵ درصد می‌باشد. با توجه به نتایج داده‌ها تأثیرگذاری بیشتر دمای شبنم بر پنل مونوکریستال مشخص می‌باشد. این موضوع می‌تواند به سبب افزایش شدت تابش خورشیدی برخوردی در حالت شبنم روی سطح پنل باشد. میزان توان الکتریکی خروجی در هر دو نوع پنل سیلیکونی با افزایش رطوبت به صورت خطی کاهش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های (Huld and AmilloGarcia, 2015) نشان می‌دهد که بازتاب نور از سطح ماژول باعث افت ۲ تا ۴ درصدی عملکرد پنل‌های فتوولتائیک می‌شود با توجه به آزمایش‌های کراتور، تشکیل آب روی سطح پنل موجب کاهش بازتاب ۲ خورشیدی می‌شود (Krauter, 2004).



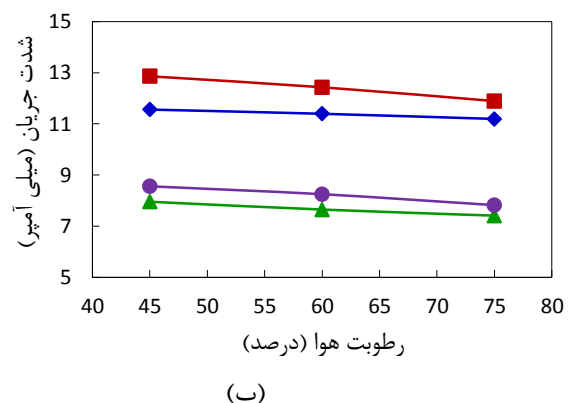
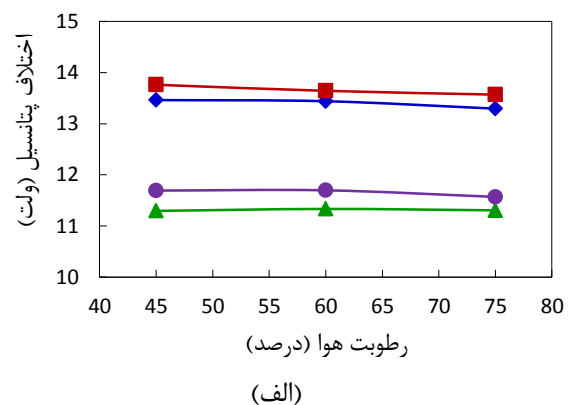
شکل ۹. تغییرات توان الکتریکی بیشینه خروجی با رطوبت برای پنل مونوکریستال و پلی کریستال، (■ و ◆) به ترتیب در شرایط تشکیل شبنم و هوای مرطوب در دمای ۲۵ °C برای پنل مونوکریستال؛ ● و ▲ برای پنل پلی کریستال).

نتایج تجزیه واریانس داده‌ها

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای عملکردی دو نوع پنل خورشیدی در شرایط مختلف محیطی در جدول (۲) نشان می‌دهد که اثرات نوع پنل سیلیکونی، دما و رطوبت نسبی هوا تقریباً بر کلیه پارامترهای عملکردی بسیار معنی‌دار ($p < 0.01$) است. رطوبت نسبی بر ولتاژ بیشینه، جریان بیشینه و جریان اتصال کوتاه اثر معنی‌دار نداشت. همچنین مشاهده می‌شود که اثر متقابل دما و رطوبت نسبی هوا بر هیچکدام از مشخصات عملکردی پنل به جز توان بیشینه اثر معنی‌دار نداشته است. اثر متقابل سه گانه نوع پنل، رطوبت نسبی و دما بر هیچکدام از

تغییرات ولتاژ و جریان بیشینه

شکل (۹) (الف) و (ب) به ترتیب نمودار ولتاژ و جریان بیشینه برای دو نوع پنل سیلیکونی بر حسب رطوبت نسبی در دو حالت هوای مرطوب و تشکیل شبنم را نشان می‌دهد. مشاهده می‌گردد که با افزایش رطوبت ولتاژ و جریان بیشینه روندی نزولی را طی می‌نمایند. مقدار کاهش شدت جریان بیشینه با شیبه بیشتر از ولتاژ بیشینه می‌باشد. در شدت جریان و اختلاف پتانسیل پنل مورد آزمایش برای دمای شبنم نسبت به دمای ۲۵ درجه سلسیوس افزایش قابل ملاحظه‌ای مشاهده شد. با توجه به آزمایش‌های کراتور، تابش روی سطح پنل موجب بازتاب نور حدود ۸ تا ۱۵ درصد می‌شود که با تشکیل آب روی سطح پنل موجب کاهش بازتاب ۲ تا ۳/۶ درصد می‌شود (Krauter, 2004). میزان افزایش در شدت جریان و ولتاژ بیشینه با توجه به نوع پنل و سطوح مورد آزمایش از ۵/۵۵ تا ۱۱/۲۵ و ۱/۵۱ تا ۳/۵۱ درصد مشاهده شد.



شکل ۹. (الف) تغییرات جریان بیشینه، و (ب) تغییرات پتانسیل بیشینه با رطوبت، (■ و ◆) به ترتیب مقدار پارامتر در شرایط تشکیل شبنم و هوای مرطوب در دمای ۲۵ °C برای پنل مونوکریستال؛ ● و ▲ برای پنل پلی کریستال).

نتایج توان بیشینه

با توجه به داده‌های حاصل از منحنی مشخصه جریان ولتاژ

پارامترهای عملکردی اثر معنی دار نداشت. تحقیقات انجام شده توسط Ettah *et al.*, (2015) و Mekhilefa *et al.* (2012) نشان می‌دهد که افزایش دما و رطوبت هوا موجب کاهش عملکرد خروجی پنل می‌شود.

جدول ۲. نتایج تجزیه واریانس داده‌های پارامترهای عملکردی دو نوع پنل خورشیدی در شرایط محیطی مختلف

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ولتاژ مدار باز	جریان اتصال کوتاه	ولتاژ بیشینه	جریان بیشینه
نوع پنل (A) (بلوک)	۱	۹/۷۸۶**	۲۵۷/۱۲۱**	۱۲/۲۵۴**	۱۳۱/۲۳۶**
رطوبت نسبی (B)	۲	۰/۰۵۴**	۰/۴۳۹*	۱/۲۶۴**	۰/۵۹۰**
A×B	۲	۰/۰۱۵ ^{ns}	۰/۰۷۳ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۰/۵۹۳**
دما (C)	۱	۰/۴۰۳**	۱۶۹/۲۱۶**	۴/۹۲۳**	۴۱/۶۴۳**
A×C	۱	۰/۰۶۳*	۲/۰۶۹**	۱۲/۵۱۲**	۴/۲۱۰**
B×C	۲	۰/۰۰۷ ^{ns}	۰/۲۲۳**	۱/۰۳۱**	۰/۱۴۷ ^{ns}
A×B×C	۲	۰/۰۰۸ ^{ns}	۰/۰۰۴ ^{ns}	۰/۰۱۶ ^{ns}	۰/۱۵۱ ^{ns}
خطا	۲۴	۰/۰۰۹	۰/۰۹۳	۰/۱۴۱	۰/۰۷۸
ضریب تغییرات (C.V.)		٪۰/۵۷	٪۰/۲۲۸	٪۰/۲/۸۰	٪۰/۲/۷۵
					٪۰/۲/۳۰

** و ^{ns} ، به ترتیب معنی دار در سطح ٪۰/۵، ٪۰/۱ و عدم معنی داری در سطح ٪۰/۵.

مقایسه میانگین‌های پارامترهای عملکردی

نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل نوع پنل خورشیدی سیلیکونی و رطوبت هوا (در دو حالت مرطوب و نقطه شبنم) بر ویژگی‌های عملکردی پنل در جدول (۳) نشان می‌دهد که برای هر دو نوع پنل، افزایش رطوبت موجب کاهش کلیه ویژگی‌های عملکردی شده است. بر اساس داده‌های با افزایش رطوبت از ٪۰/۴۵ به ٪۰/۷۵، به طور متوسط ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ و جریان بیشینه برای دو نوع پنل مونوکریستال و پلی کریستال به ترتیب ۱/۱۱ و ۰/۴۴ درصد، ۳/۰۶ و ۲/۲ درصد، ۴/۶۴ و ۴/۲۲ درصد و ۶/۵۲ و ۰/۸۳ درصد کاهش نشان می‌دهد. همچنین اثر رطوبت بر روی کاهش عملکرد پنل مونوکریستال بیشتر بوده است. کاهش ولتاژ و جریان خروجی پنل را می‌توان به میزان بخار آب

موجود در هوای محفظه آزمون مرتبط کرد. با افزایش رطوبت محیط مقدار بخار آب موجود در هوا افزایش می‌یابد. این موضوع موجب انعکاس، شکست و پراکنده شدن تابش خورشیدی شده که در نتیجه آن کاهش تابش برخوردی به سطح پنل می‌گردد (Mekhilefa *et al.*, 2012).

بر اساس داده‌های جدول (۴) با کاهش دمای پنل از دمای محیط (۲۵ °C) تا دمای نقطه شبنم منجر به افزایش ولتاژ مدار باز، ولتاژ بیشینه، جریان اتصال کوتاه و جریان بیشینه برای دو نوع پنل مونوکریستال و پلی کریستال به ترتیب ۱/۷۷ و ۱/۰ درصد، ۱/۳۵ و ۱/۴۲ درصد، ۱/۰۳ و ۱/۱۶ درصد و ۱/۱۲ و ۱/۴۱ درصد گردید.

جدول ۳. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع پنل و رطوبت هوا بر پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی

نوع پنل سیلیکونی	رطوبت هوا (٪)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA)	ولتاژ بیشینه (V)	جریان بیشینه (mA)
مونوکریستال	۴۵	۱۷/۱۸ ^a	۱۶/۲۹ ^a	۱۴/۲۲ ^a	۱۲/۴۱ ^a
	۶۰	۱۷/۰۲ ^b	۱۶/۲۰ ^a	۱۴/۱۳ ^a	۱۲/۲۰ ^a
	۷۵	۱۶/۹۹ ^b	۱۵/۷۹ ^b	۱۳/۵۶ ^b	۱۱/۶۰ ^b
پلی کریستال	۴۵	۱۶/۰۵ ^c	۱۰/۸۷ ^c	۱۳/۰۲ ^c	۸/۳۶ ^c
	۶۰	۱۶/۰۲ ^c	۱۰/۷۵ ^c	۱۲/۹۲ ^{cd}	۸/۰۹ ^c
	۷۵	۱۵/۹۸ ^c	۱۰/۶۳ ^c	۱۲/۴۷ ^d	۸/۲۹ ^c

میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک در هر ستون بر مبنای آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی دار ندارند.

جدول ۴. مقایسه میانگین اثر متقابل نوع پنل و دما بر پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی

نوع پنل سیلیکونی	دما (°C)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA)	ولتاژ بیشینه (V)	جریان بیشینه (mA)
مونوکریستال	۲۵	۱۶/۹۱ ^b	۱۳/۶۸ ^b	۱۳/۷۵ ^b	۱۱/۳۴ ^b
	نقطه شبیم	۱۷/۲۱ ^a	۱۸/۵ ^a	۱۴/۱۹ ^a	۱۲/۸۰ ^a
پلی کریستال	۲۵	۱۵/۹۵ ^d	۸/۸۱ ^d	۱۳/۷۶ ^b	۹/۶۶ ^d
	نقطه شبیم	۱۶/۰۸ ^c	۱۲/۶۸ ^c	۱۱/۸۴ ^c	۶/۸۳ ^c

میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک در هر ستون بر مبنای آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت معنی‌دار ندارند.

جدول (۵) نتایج مقایسه میانگین اثر متقابل دوگانه رطوبت و دمای محیط بر داده‌های توان الکتریکی بیشینه به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵٪ درصد را نشان می‌دهد. بر اساس داده‌های جدول بیشترین مقدار متوسط توان بیشینه برای پنل مونوکریستال و پلی کریستال در شرایط محیطی دمای شبیم و رطوبت ۴۵ درصد بود. در این حالت کاهش دما برای تشکیل شبیم از رطوبت نسبی ۴۵ درصد بیشترین مقدار (۱۲/۵ °C) را داشته است. تحقیقات نشان داده است که کاهش دمای پنل موجب افزایش توان و راندمان پنل-های فتوولتائیک می‌شود (Rahman et al., 2015; Shan et al., 2014). کم‌ترین مقادیر متناظر در هوای با رطوبت ۷۵ درصد برای پنل نوع مونوکریستال و ۶۰ درصد برای پنل پلی کریستال

در دمای ۲۵°C مشاهده شد. در این شرایط علاوه بر اثر دما عامل ذرات بخار آب موجود در هوا موجب جذب و بازتاب تابش خورشیدی و در نتیجه کاهش تابش برخوردی به سطح پنل گردیده است (Mekhilefa et al., 2012). به طور کلی توان بیشینه تولید شده توسط پنل خورشیدی در شرایط تشکیل شبیم بیشتر از میزان آن در شرایط هوای مرطوب است. به نظر می‌رسد دو عامل مؤثر در این پدیده کاهش دمای پنل و عدم ذرات بخار آب در محیط موجب این افزایش بوده است. بر اساس داده‌های جدول تغییرات توان تولیدی در شرایط تشکیل شبیم بیشتر از مقدار آن برای شرایط هوای مرطوب است. این موضوع نشان می‌دهد که اثر عامل دما نسبت به رطوبت هوا برای هر دو نوع پنل خیلی بیشتر است.

جدول ۵. مقایسه میانگین اثر متقابل رطوبت‌های مختلف هوا و دو حالت دما بر توان الکتریکی بیشینه دو نوع پنل خورشیدی

شرایط محیطی		نوع پنل خورشیدی سیلیکونی	
دما (°C)	رطوبت هوا (%)	مونوکریستال	پلی کریستال
۲۵	۴۵	۱۵۵/۶۰ ^d	۸۹/۸۶ ^h
	۶۰	۱۵۳/۱۴ ^{de}	۸۶/۷۱ ^h
	۷۵	۱۴۸/۸۰ ^e	۸۳/۸۰ ^h
دمای نقطه شبیم	۴۵	۱۷۶/۹۸ ^a	۱۰۰/۰۸ ^f
	۶۰	۱۶۹/۶۰ ^b	۹۶/۵۱ ^f
	۷۵	۱۶۱/۳۵ ^c	۹۰/۵۲ ^g

میانگین‌های دارای حروف لاتین مشترک بر مبنای آزمون دانکن در سطح ۵ درصد تفاوت آماری معنی‌دار ندارند.

تغییرات راندمان (افزایش توان نسبی) پنل‌های خورشیدی توان الکتریکی خروجی در شرایط تشکیل شبیم روی سطح پنل نسبت به شرایط هوای مرطوب افزایش داشت. شکل (۱۰) تغییرات افزایش راندمان (افزایش توان نسبی) دو نوع پنل خورشیدی در شرایط تشکیل شبیم نسبت به شرایط محیطی مرطوب را بر حسب رطوبت بوجود آورنده نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش میزان پوشش یا تشکیل شبیم روی سطح پنل از ۴۵ تا ۷۵ درصد، به طور متوسط برای پنل‌های مونوکریستال و پلی کریستال به ترتیب از ۱۳/۷۴ تا ۸/۴۳ درصد و از ۱۱/۳۸ تا ۸/۰۱ درصد افزایش راندمان نسبت به حالت هوای مرطوب بدست آمد. نتایج به دست آمده ممکن است علاوه بر اثرات کاهش دمای پنل، به دلیل کاهش بازتاب نور از سطح پنل در حالت تشکیل شبیم باشد. نتایج آزمایش‌های هلد

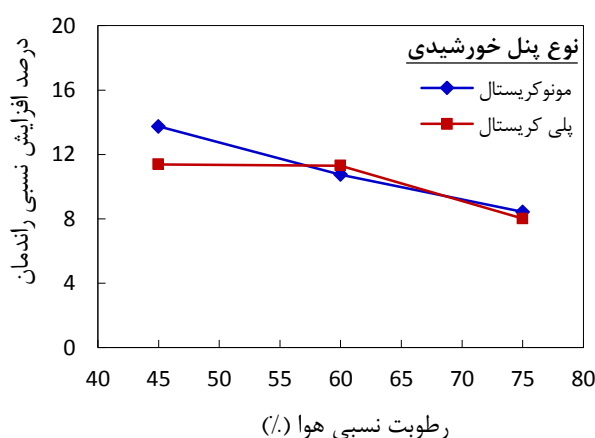
سطح پنل از ۴۵/۱۹ تا ۸۳/۶۲ درصد سطح ناشی از رطوبت نسبی هوا از ۴۵ تا ۷۵ درصد، به طور متوسط برای پنل‌های مونوکریستال و پلی کریستال به ترتیب از ۱۳/۷۴ تا ۸/۴۳ درصد و از ۱۱/۳۸ تا ۸/۰۱ درصد افزایش راندمان نسبت به حالت هوای مرطوب بدست آمد. نتایج به دست آمده ممکن است علاوه بر اثرات کاهش دمای پنل، به دلیل کاهش بازتاب نور از سطح پنل در حالت تشکیل شبیم باشد. نتایج آزمایش‌های هلد

نتیجه گیری

در این پژوهش اثر شرایط محیطی شامل سه سطح رطوبت نسبی ۴۵، ۶۰ و ۷۵ درصد و دمای هوا در دو سطح ۲۵ درجه سلسیوس و دمای نقطه شبنم بر پارامترهای عملکرد دو نوع پنل خورشیدی سیلیکونی شامل مونوکریستال و پلی کریستال به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق به طور خلاصه به شرح زیر بود.

اثرات نوع پنل سیلیکونی، شرایط رطوبتی هوا و شرایط تشکیل شبنم تقریباً بر کلیه پارامترهای عملکردی بسیار معنی-دار ($p < 0.01$) بود. کلیه پارامترهای عملکردی پنل خورشیدی در شرایط تشکیل شبنم نسبت به هوای مرطوب به علت اثر کاهش دمای پنل و عدم ذرات بخار آب در هوا بالاتر بود. با افزایش رطوبت هوا و میزان پوشش شبنم روی سطح پنل پارامترهای عملکردی به طور خطی کاهش یافت. اثر دما بر پارامترهای عملکردی نسبت به اثر رطوبت هوا خیلی بیشتر بود. اثرات متقابل نوع پنل و شرایط رطوبت نوع پنل و شرایط دمایی بر کلیه مشخصات عملکردی پنل بسیار معنی دار بود. برای هر دو نوع پنل در کلیه سطوح رطوبت نسبی با کاهش دما درصد راندمان پنل افزایش یافت. پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی مورد آزمون در حالت تشکیل شبنم نسبت به حالت رطوبتی افزایش یافت. به طور کلی، راندمان پنل خورشیدی مونوکریستال در شرایط تشکیل شبنم ناشی از رطوبت نسبی در محدوده ۴۵ تا ۷۵ درصد به ترتیب موجب ۱۳/۷۴ تا ۸/۴۳ درصد برای پنل مونوکریستال و ۱۱/۳۸ تا ۸/۰۱ درصد گردید.

و آمیلو نشان داد که بازتاب نور از سطح ماژول باعث افت ۲ الی ۴ درصدی عملکرد پنل‌های فتوولتائیک شود (Huld & Amillo, 2015). ضریب شکست آب (۱/۳) بین ضریب شکست شیشه (۱/۵) و هوا (۱) قرار دارد که این عمل موجب کاهش بازتاب ۲ تا ۳/۶ درصد می‌شود (Krauter, 2004). هنگامی که نور به شبنم روی سطح پنل بر خورد می‌کند زاویه انحراف آن بیشتر از هنگامی است که به پنل (شیشه) می‌تابد و به خط عمود نزدیک تر می‌شود. زیرا ضریب شکست شیشه از ضریب شکست آب بیشتر است. در نتیجه نور یا تابش خورشید به خط عمود نزدیک تر شده و شدت تابش بر خوردی افزایش یافته است.



شکل ۱۰. تغییرات افزایش راندمان نسبی دو نوع پنل خورشیدی سیلیکونی مونوکریستال و پلی کریستال در شرایط تشکیل شبنم نسبت به هوای مرطوب.

REFERENCES

- Ameri, A., Kermani, Ali M., Zarafshan, P., Kouravand, S., Khashehchi, M. (2016). Effects of agricultural dust deposition on photovoltaic panel performance. The 3rd International Conference and Exhibition on Solar Energy (ICESE-2016), 5-6 September 2016, University of Tehran, Tehran, Iran.
- Anonymous. (2009). The psychrometric chart and its use. Service Application Manual, SAM Chapter 630-16, Section 3A, by: Refrigeration Service Engineers Society (RSES).
- Anonymous. (2016). A set of the legal references and the strategies to optimize energy consumption in Iran. Renewable Energy and Energy Efficiency Organization (SATBA), http://www.saba.org.ir/saba_content/media/image/2016/11/8720_orig.pdf (In Farsi)
- Bashir, M.A., Ali, H.M., Ali, M., & Siddique, A.M. (2015). An experimental investigation of performance of photovoltaic modules in Pakistan, *Thermal Science*, 19(2): S525-S534.
- Epia. (2015). Global market outlook for solar power 2015-2019. Solar Power Europe (Spe). Formerly Known As Epia – European Photovoltaic Industry Association.
- Ettah, E.B., Ushie, P.O., Obiefuna, J.N., & Nwachukwu, N.C. (2015). Comparative study of the effects of relative humidity on solar electricity generation in UYO and Port-Harcourt, Nigeria. *International Journal of Mathematics and Physical Sciences Research*, 3(2): 66-70.
- Huld, T., & Garcia Amillo, A. M. (2015). Estimating PV module performance over large geographical regions: The role of irradiance, air temperature, wind speed and solar spectrum, *Energies* 8: 5159-5181.
- Ibrahim, A. (2011). Effect of shadow and dust on the performance of silicon solar cell. *Journal of Basic and Applied Scientific Research*, 1(3): 222-230.
- Katkar, A.A., Shinde, N.N., & Patil, P.S. (2011). Performance & evaluation of industrial solar cell w.r.t. temperature and humidity, *International Journal of Research in Mechanical Engineering*

- and Technology*, Vol. 1, No. 1: 69-73.
- Kazem, H. A. & Chaichan, M. T. (2015). Effect of humidity on photovoltaic performance based on experimental study. *International Journal of Applied Engineering Research*, 10(23): 43572-43577.
- Kohraku, S., & Kurokawa, K. (2006). A fundamental experiment for *discrete-wavelength LED solar simulator*. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 90(18): 3364-3370.
- Krauter, S. (2004). Increased electrical yield via water flow over the front of *photovoltaic panels*. *Solar Energy Materials & Solar Cells*, 82: 131-137.
- Lewis, N. S. (2007). Toward cost-effective solar energy use. *Science* 315: 798-801.
- Mekhilefa, S., Saidurb, R. & Kamalisarvestanib, M. (2012). Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of *photovoltaic cells*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16: 2920– 2925
- Ndiaye, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., Charki, A., Kobi A., & Sambou, V. (2013). Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in sahelian environment: the case of Senegal" *International Journal of Physical Sciences*, Vol. 8, No. 21: 1166-1173.
- Pidwirny, M., (2006). Atmospheric effects on incoming solar radiation, *Fundamentals of Physical Geography*, 2nd Edition. Date Viewed. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html>.
- Rahman, M.M., Hasanuzzaman, M., & Rahim, N.A. (2015). Effects of various parameters on PV-module power and efficiency. *Energy Conversion and Management*, Vol. 103: 348–358.
- Sarparast, M. Hesa, M., & Asgari, H.R. (2014). Determining Appropriate Provinces for *Dew Harvesting in Iran*. *Environmental Resources Research* .Vol. 2, No. 1: 21-30.
- Shan, F., Tang, F., Cao, L., & Fang, G. (2014). Comparative simulation analyses on dynamic performances of photovoltaic–thermal solar collectors with different configurations. *Energy Conversion and Management*, Vol. 87: 778–786.
- Taghavi, M., (2015). The use of new and renewable energy in heating and *cooling buildings*, *Solar Energy Conference and Exhibition, Tehran University, September 7-8*. (In Farsi)
- Xu, J., Hu, Z., Jia, X., Huang, L., Huang, X., Wang, L., & Zhu, Y. (2016). A rapid annealing technique for efficient perovskite solar cells fabricated in air condition under high humidity. *Organic Electronics*, 34: 84-90.