

## تأثیر آلودگی هوا بر عملکرد پنل‌های خورشیدی فتوولتائیک

علی عامری<sup>۱</sup>، علی ماشاءاله کرمانی<sup>۲\*</sup>، پیام زرافشان<sup>۳</sup>، شهریار کوراوند<sup>۴</sup>، مرتضی خشه‌چی<sup>۵</sup>

<sup>۱</sup> دانش‌آموخته کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک بیوسیستم، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

aliameri69@alumni.ut.ac.ir

<sup>۲</sup> استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

amkermani@ut.ac.ir

<sup>۳</sup> استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

p.zarafshan@ut.ac.ir

<sup>۴</sup> استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

skouravand@ut.ac.ir

<sup>۵</sup> استادیار گروه فنی کشاورزی، پردیس ابوریحان، دانشگاه تهران، تهران، ایران

m.khashehchi@ut.ac.ir

**چکیده:** در این تحقیق اثر آلودگی هوا ناشی از احتراق نفت‌گاز بر مشخصات عملکردی دو نوع پنل فتوولتائیک خورشیدی رایج شامل پنل‌های سیلیکونی مونوکریستال و پلی کریستال در مقیاس آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفته است. آزمایش‌ها در یک شبیه‌ساز خورشیدی مجهز به محفظه‌ای برای ایجاد آلودگی هوا انجام شد. آلودگی هوا از طریق احتراق نفت‌گاز در سه سطح سه، چهار و پنج میلی‌لیتر و انتقال دود حاصل از آن به داخل محفظه دستگاه آزمایشی ایجاد گردید. منحنی‌های مشخصه جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ برای پنل‌های مورد نظر رسم شد. ویژگی‌های عملکردی مورد بررسی شامل ولتاژ مدار باز، جریان اتصال کوتاه، ولتاژ بیشینه، جریان بیشینه و توان الکتریکی خروجی بیشینه تعیین گردید. نتایج نشان داد که آلودگی هوا بر همه پارامترهای عملکردی مؤثر بود. افزایش میزان غلظت آلودگی هوا موجب کاهش معنی‌دار تمامی مشخصات عملکردی پنل‌های فتوولتائیک شد. به‌طور کلی، میزان کاهش راندمان پنل سیلیکونی مونوکریستال در سطوح مختلف آلودگی به ترتیب ۳۷/۷۴، ۵۵/۸۷ و ۶۶/۶۱ درصد نسبت به شرایط هوای تمیز بوده است. مقادیر متناظر برای پنل نوع پلی کریستال به ترتیب ۲۵/۷۰، ۵۱/۴۹ و ۵۸/۰۵ درصد بود.

**واژه‌های کلیدی:** آلودگی هوا، راندمان، پنل خورشیدی سیلیکونی، فتوولتائیک، سیلیکون مونوکریستال، سیلیکون پلی کریستال.

## ۱. مقدمه

عملکرد پنل‌های خورشیدی ناشی از عوامل محیطی، تحقیقات و آزمایش‌های زیادی انجام شده است. به‌طور کلی این آزمایش‌ها به دو صورت آزمایش در شرایط طبیعی محیط بیرونی<sup>۲</sup> و در مقیاس آزمایشگاهی و اصطلاحاً محیط درونی<sup>۳</sup> می‌باشد. در انجام آزمایش در شرایط محیط بیرونی، عوامل متغیر بسیاری شامل تغییرات شدت میزان تشعشع دریافتی، درجه حرارت و رطوبت هوا، باد و... مؤثر است. از این رو، در این روش باید اطلاعات مربوط به تمامی پنل‌ها در یک زمان مشخص ثبت گردد. همچنین اطلاعات هواشناسی نیز باید به‌صورت روزانه مشخص شود تا بتوان تحلیل درستی از میزان عملکرد پنل خورشیدی انجام داد [۵].

در اوایل دهه ۱۹۶۰ دانشمندان در رابطه با کاهش عملکرد کلکتورهای خورشیدی به‌سبب آلودگی نشسته بر روی سطح آن‌ها تحقیقاتی را انجام دادند [۶]. اغلب مطالعات در آن دوران بر روی واحدهای گرمایی و نشست گردوغبار بر روی آینه‌های بازتابنده و متمرکزکننده بود [۷]. بعد از ۱۹۷۰ تحقیقات برای افزایش اطلاعات در رابطه با اثر گردوغبار بر نحوه عملکرد پنل‌های خورشیدی صورت گرفت.

ماسه و خاک به‌عنوان عوامل ابتدایی فرسایش طبیعی، همچنین ذرات آلودگی هوا، فرایندهای شیمیایی آب و هوا و آلودگی‌های صنعتی و کثیفی‌های دیگر مورد آزمایش قرار گرفتند [۸]. در ادامه تحقیقاتی بر روی عوامل طبیعی تأثیرگذار بر عملکرد پنل‌های خورشیدی و پنل‌های گرمایی صورت گرفت [۹-۱۱]. اکثر جمع‌کننده‌های خورشیدی شامل هر دو نوع الکتریکی و گرمایی با عملکرد مشخص، راندمان عملکردی پایینی را بعد از گذشت مدتی بدون تمیز کردن نشان دادند.

منابع ایجاد آلودگی گوناگونی تاکنون برای انجام آزمایش‌ها به‌صورت محیطی و درون آزمایشگاهی مورد استفاده قرار گرفته است. با توجه به انواع آلودگی در یک بررسی با استفاده از انواع ذرات میزان آلودگی مورد نیاز ایجاد شد و تأثیر هر یک از آن‌ها به‌صورت مجزا مورد تحلیل قرار گرفت [۱۲]. در روشی دیگر آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی و خودروهای شهری در شرایط محیطی باز و در یک دوره یک‌ساله مورد بررسی قرار گرفت و میزان کاهش توان پنل خورشیدی در آلوده‌ترین روز حدود ۶۰ درصد تعیین شد [۴]. تحقیقات کمیسیون سلامت و محیط زیست شورای شهر تهران نشان داد آنچه در حال حاضر کدورت هوای پایتخت را تشدید کرده و به شکل‌گیری غبار زرد و مه‌دود طی اغلب روزها در آسمان تهران منجر

یکی از روش‌های استفاده از انرژی خورشید به کار بردن سلول‌های خورشیدی در سامانه‌های فتوولتائیک<sup>۱</sup> (PV) برای تولید برق است. سلول‌های خورشیدی به‌دلیل قابل استفاده بودن در سرتاسر جهان و از طرفی عدم نیاز به مواد خام اولیه برای تولید انرژی و تنها نیاز به یک محیط مستقل برای نصب، به‌عنوان یک منبع تولید انرژی الکتریکی به‌شدت مورد توجه قرار گرفته است [۱]. در حقیقت، سامانه‌های فتوولتائیک به‌عنوان یک گزینه مناسب در بین منابع مختلف انرژی‌های تجدیدپذیر است که دسترسی به انرژی در آینده را تضمین کرده است [۲]. میزان توان الکتریکی تولیدشده توسط یک سیستم خورشیدی در یک مکان خاص بستگی به میزان انرژی دریافتی از خورشید دارد. کشور پهناور ایران با قرارگیری در کمربند انرژی تابش خورشید در بین مدارهای ۲۵ تا ۴۰ درجه عرض شمالی با میزان تابش متوسط روزانه چهار کیلووات ساعت بر مترمربع و تعداد ساعات آفتابی بیش از ۲۸۰۰ ساعت در سال، قابلیت تولید انرژی پاک از این منبع عظیم بسیار بالاست [۳]. با توجه به این میزان دریافت تشعشع یکی از بهترین روش‌ها برای بهره بردن از انرژی خورشیدی به‌کارگیری پنل‌های فتوولتائیک است.

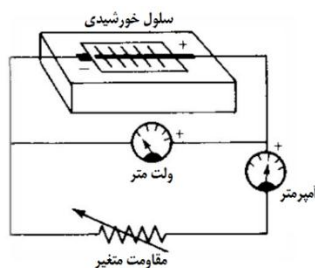
از مزایای سامانه‌های فتوولتائیک می‌توان به عمر زیاد این سلول‌ها و همچنین در دسترس بودن در تمامی نقاط اشاره کرد. اما از مهم‌ترین معایب آن هزینه بالا و راندمان پایین این پنل‌هاست. با توجه به پیشرفت تکنولوژی، تلاش‌های زیادی در راستای کاهش هزینه‌ها و افزایش راندمان صورت پذیرفته است. اما بررسی عوامل تأثیرگذار بر راندمان پنل‌های خورشیدی می‌تواند کمک بزرگی در راستای مدیریت آن‌ها نماید. عوامل تأثیرگذار بر عملکرد پنل خورشیدی به دو دسته اصلی عوامل مصنوعی شامل زاویه نصب، نوع پنل، مکان نصب و غیره و همچنین عوامل طبیعی شامل میزان تابش خورشید، باد، دما، سایه و برف اشاره کرد [۲].

بعد از گذشت تابش خورشید از سطح جو به داخل اتمسفر، عوامل بسیاری در رسیدن این تابش به سطح زمین تأثیرگذار است. دو گروه عمده عوامل تأثیرگذار شامل عوامل طبیعی و آلودگی‌های محیطی هستند. آلودگی محیطی نیز دارای منابع متعددی است که می‌توان طوفان‌های گردوغبار، آلودگی‌های ناشی از فعالیت‌های صنعتی و خودروها و غیره را نام برد. آلودگی فعالیت‌های صنعتی و خودروها یکی از عواملی است که بر روی میزان تشعشع دریافتی توسط پنل‌های خورشیدی اثر می‌گذارد [۴]. برای تعیین میزان کاهش در راندمان و

استفاده در این شبیه‌ساز دارای اختلاف پتانسیل ۱۲ ولت است. پنل‌های مورد آزمون به‌صورت افقی بر روی پایه‌هایی به فاصله ۹۰ سانتی‌متر از شبیه‌ساز نور خورشید قرار گرفته و به واحد اندازه‌گیری متصل شد. در واحد اندازه‌گیری و کنترل برای اندازه‌گیری شدت جریان و اختلاف پتانسیل پنل و دمای درون محفظه به‌ترتیب از یک دستگاه آمپر متر، ولت‌متر و ترمومتر استفاده شده است. آمپر متر به‌صورت سری و ولت‌متر به‌صورت موازی در مدار قرار داده شدند. همچنین برای اندازه‌گیری اختلاف پتانسیل یک مقاومت متغیر ۵ کیلو اهمی در مدار خروجی پنل‌ها قرار داده شد (شکل ۱-ب).



(الف)



(ب)

شکل (۱): الف. نمایی از دستگاه آزمون پنل خورشیدی و انجام آزمایش، ب. طرح‌واره واحد اندازه‌گیری پارامترهای عملکردی پنل

## ۲.۰۲ پنل‌های مورد آزمایش

دو نوع رایج پنل‌های مورد استفاده در بازار ایران شامل پنل‌های سیلیکونی مونوکریستال و سیلیکونی پلی‌کریستال است. در این تحقیق، دو نمونه از این پنل‌های ساخت شرکت Yingli Solar کشور چین برای اجرای آزمایش‌ها مورد استفاده قرار گرفت. مشخصات فنی این دو نوع پنل برای شرایط آزمون استاندارد<sup>۱</sup> (STC) دما ۲۵ درجه

شده، از اراضی بایر و مناطق شن و ماسه در جنوب غرب این کلان‌شهر نشئت می‌گیرد که در کنار سه منبع داخلی دیگر شامل خودروها و موتورسیکلت‌ها، عملیات تخریب و ساختمان‌سازی و موتورخانه ساختمان‌ها، باعث افزایش غلظت و حجم ذرات معلق با قطر کوچک‌تر از ۲/۵ میکرون شده است [۱۳].

وجود ذرات معلق در هوا به سه شکل بر روی کاهش شدت تابش دریافتی تأثیر می‌گذارد. در حالت اول، تابش خورشید پراکنده شده و به مسیر جدید هدایت می‌گردد. در این حالت، میزان طول موج و شدت تابش تغییری نمی‌کند. در حالت دوم، اشعه خورشید توسط ذره موجود در جو جذب شده و به‌صورت انرژی گرمایی تابشی با طول موج بلند منتشر می‌شود. در حالت سوم، انرژی تابشی خورشید در برخورد با ذره بدون هیچ‌گونه تغییری به فضا بازتاب می‌شود [۱۴].

در سال‌های اخیر، موضوع آلودگی هوای شهرهای بزرگ و صنعتی ایران به یکی از معضلات مهم جوامع شهری تبدیل شده است. یکی از عوامل مؤثر بر روی میزان تشعشع دریافتی توسط پنل‌های خورشیدی آلودگی‌های جوی می‌باشد [۴]. با عنایت به مصوبه اخیر دولت مبنی بر تولید ۲۰ درصد انرژی برق مصرفی ادارات در شهرهای کشور از طریق انرژی‌های تجدیدپذیر همچون نصب پنل‌های خورشیدی و نیز افزایش تقاضا برای نصب آن‌ها، بررسی رابطه و میزان آلودگی هوا بر راندمان پنل‌های خورشیدی، امری مهم به نظر می‌رسد. تاکنون تحقیقی در خصوص بررسی میزان و شدت اثر سطوح مختلف آلودگی ناشی از آلاینده‌های شهری و صنعتی بر عملکرد پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی انجام نشده است. از این‌رو هدف از انجام این تحقیق، بررسی اثر سطوح مختلف غلظت آلودگی‌های هوا ناشی از احتراق سوخت خودروها بر مشخصات عملکردی پنل‌های خورشیدی در شرایط آزمایشگاهی بوده است.

## ۲. مواد و روش‌ها

### ۱.۰۲ واحد آزمایشگاهی آزمون پنل خورشیدی

با توجه به عوامل طبیعی تأثیرگذار بر عملکرد پنل‌های خورشیدی، به‌منظور ایجاد شرایط کنترل‌شده انجام آزمایش یک واحد آزمایشگاهی آزمون پنل فتوولتائیک مجهز به شبیه‌ساز خورشیدی طراحی و ساخته شد (شکل ۱-الف). اجزای دستگاه شامل منبع شبیه‌ساز نور خورشید، محفظه شفاف، دمنده، محل قرارگیری پنل، دریچه ورود آلودگی، تابلو کنترل و اندازه‌گیری و شاسی است. برای ساخت منبع شبیه‌ساز نور خورشید از چهار نوع لامپ ال‌ای‌دی با نورهای سفید، آبی، قرمز و فروسرخ در ترکیبات مربعی شکل استفاده شد [۱۵]. منبع تغذیه مورد

بر اساس تحقیقات انجام شده درباره گازهای منتشره از نفت‌گاز در شهر تهران، میزان مجموع گازهای خروجی سیستم حمل‌ونقل شهری با سوخت نفت گاز ۷۶/۳۴ گرم در لیتر است [۱۶]. بر این اساس میزان غلظت آلاینده‌های حاصل از سطوح مختلف آزمایش‌ها محاسبه و در جدول (۲) ارائه شده است. حجم محفظه آزمون ۰/۳۲۴ مترمکعب و چگالی هوا ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب در نظر گرفته شده است.

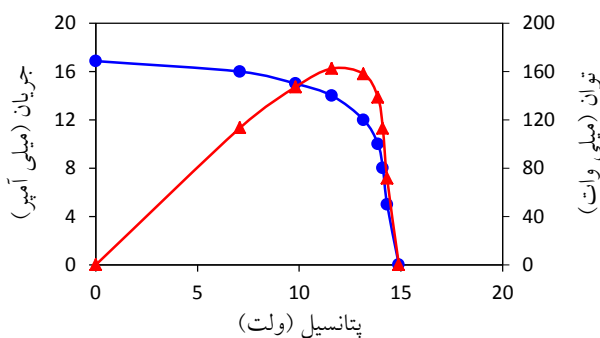
جدول (۲): سطوح میزان گازهای تولیدشده و غلظت آن در آزمایش‌ها

میزان سوخت مصرفی (mL)	میزان گازهای تولیدشده (g)	غلظت آلودگی هوا در محفظه آزمون (ppm)
۳	۰/۲۲۹	۵۷۷/۰۲۱
۴	۰/۳۰۵	۷۶۹/۳۶۲
۵	۰/۳۸۱	۹۶۱/۷۰۳

#### ۴.۲. پارامترهای عملکردی مورد بررسی

در هر آزمایش، مقادیر اختلاف پتانسیل و شدت جریان متناظر با آن توسط واحد اندازه‌گیری ثبت گردید و منحنی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) رسم شد. با استفاده از رابطه (۱) توان متناظر با هر ولتاژ محاسبه شد و منحنی مشخصه توان-ولتاژ (P-V) رسم گردید [۱۴]. شکل (۳) نمونه‌ای از منحنی‌های جریان-ولتاژ و توان-ولتاژ به‌دست‌آمده از یک آزمایش نمونه را نشان می‌دهد.

$$P = V \cdot I \quad (1)$$



شکل (۳): نمونه‌ای از منحنی‌های مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) و توان-ولتاژ (P-V)

پارامترهای عملکردی اندازه‌گیری شده در پنل‌های خورشیدی شامل اختلاف پتانسیل مدار باز ( $V_{oc}$ ) و شدت جریان اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ) بودند. برای تعیین سایر پارامترهای عملکردی شامل توان بیشینه ( $P_{max}$ )، اختلاف پتانسیل بیشینه ( $V_{max}$ ) و شدت جریان بیشینه ( $I_{max}$ ) از اطلاعات منحنی برازش‌شده بر منحنی مشخصه جریان-ولتاژ استفاده شد. برای این کار با استفاده نرم‌افزار متلب Matlab R2014b

سلسیوس، تابش خورشید  $1000 \text{ W/m}^2$  و جرم توده هوا  $1/5$ ، که از طرف شرکت سازنده اعلام شده، در جدول (۱) ارائه شده است.

جدول (۱): مشخصات فنی پنل‌های خورشیدی مورد آزمایش

نوع پنل سیلیکونی	مونوکریستال	پلی‌کریستال
ولتاژ مدار باز (ولت)	۲۲/۵	۲۱/۵۲
جریان اتصال کوتاه (آمپر)	۰/۶۱	۰/۶۶
ولتاژ بیشینه توان (ولت)	۱۸	۱۷/۵۶
جریان بیشینه توان (آمپر)	۰/۵۶	۰/۶
توان بیشینه (وات)	۱۰	۱۰

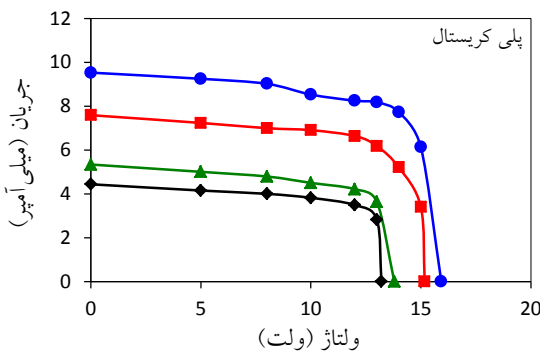
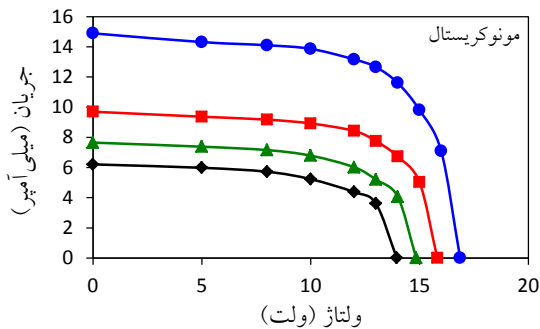
#### ۳.۲. روش انجام آزمایش

در این تحقیق برای ایجاد آلودگی هوا از دود ناشی از سوختن نفت‌گاز به‌عنوان یکی از منابع اصلی آلوده‌کننده هوای شهرهای صنعتی استفاده شد. برای این کار مقدار معینی از نفت‌گاز در منبع تولیدکننده دود که در کنار دستگاه قرار داشت، محترق شده و دود حاصل از آن به کمک لوله‌ای به دریچه ورودی محفظه آزمون پنل منتقل می‌شد (شکل ۱). با توجه به آزمایش‌های اولیه و مقدماتی انجام‌شده، برای انجام آزمایش‌ها میزان آلودگی ناشی از سه سطح مختلف نفت‌گاز سه سطح مختلف نفت‌گاز شامل سه، چهار و پنج میلی‌لیتر مورد بررسی قرار گرفت. با اتمام سوخت برای مدت کوتاهی، دمنده‌های داخل محفظه آزمون روشن شده تا هوای آلوده در تمام نقاط محفظه به‌صورت یکنواخت درآید. شکل (۲) تصویر دود ایجادشده درون محفظه دستگاه آزمون ناشی از سطوح مختلف میزان نفت‌گاز به‌کاررفته را نشان می‌دهد. با خاموش کردن فن‌ها، شبیه‌ساز خورشید روشن شده و داده‌های اختلاف پتانسیل و شدت جریان متناظر با آن ثبت می‌شد. آزمایش‌ها برای هر سطح آلودگی در سه تکرار انجام شد.



شکل (۲): محفظه آزمون بعد از ایجاد دود حاصل از احتراق کامل نفت‌گاز به میزان الف. سه میلی‌لیتر، ب. چهار میلی‌لیتر، ج. پنج میلی‌لیتر

سیلیکون پلی کریستال و مونوکریستال به ترتیب از ۱۵/۹۳ به ۱۳/۲ ولت و ۱۶/۸۷ به ۱۳/۹۶ ولت با افزایش غلظت آلودگی هوا کاهش یافت. مقادیر متناظر برای شدت جریان اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ) به ترتیب ۹/۵۳ به ۴/۴۴ و از ۱۴/۹ به ۶/۲۱ میلی آمپر بوده است.

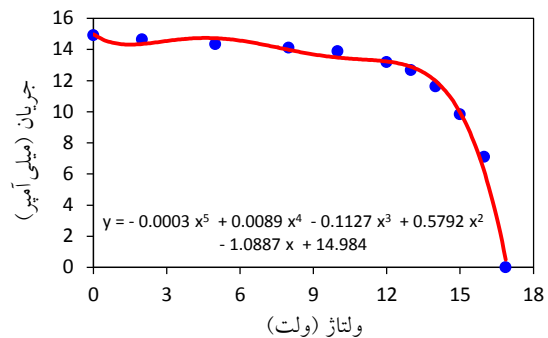


شکل (۵): منحنی مشخصه جریان-ولتاژ (I-V) در سطوح مختلف آلودگی هوا برای دو نوع پنل فتوولتائیک سیلیکونی مونو و پلی کریستال (میزان آلودگی (ppm): تمیز ●، ۵۷۷ ■، ۷۶۹/۴ ▲، ۹۶۱/۷ ◆)

### ۱.۳. نتایج توان الکتریکی تولیدشده

با توجه به داده‌های حاصل از منحنی مشخصه جریان-ولتاژ پنل‌ها و استفاده از رابطه (۱) مقادیر توان الکتریکی تولیدشده محاسبه شد و منحنی آن بر حسب ولتاژ رسم شد (شکل ۶). مشاهده می‌شود که در هر دو نوع پنل با افزایش میزان آلودگی هوا ظرفیت توان الکتریکی تولیدشده توسط پنل‌ها کاهش یافته است. بیشترین توان تولیدشده مربوط به شرایط جوی تمیز و عاری از دود بوده است. علت این امر را می‌توان به کاهش شدت تابش خورشیدی دریافتی در شرایط آلودگی هوا در اثر جذب یا پراکنده شدن آن توسط مولکول‌های گازهای انتشاریافته ناشی از احتراق سوخت مرتبط نمود.

داده‌های جریان-ولتاژ ثبت و 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 پتانسیل بیشینه ( $V_{max}$ ) تعیین شد. شکل (۴) نمونه‌ای از منحنی برازش شده را نشان می‌دهد.



شکل (۴): نمونه‌ای از منحنی برازش شده بر داده‌های جریان-ولتاژ در پنل سیلیکونی نوع مونوکریستال

درصد کاهش راندمان پنل نیز با توجه به توان بیشینه خروجی در حالت بدون دود (تیمار شاهد) و توان بیشینه محاسبه شده در تیمارهای آزمایشی با استفاده از رابطه (۲) مشخص گردید [۱۷].

$$\eta = \frac{P_c - P_p}{P_c} \times 100 \quad (2)$$

که در آن،  $\eta$  درصد کاهش راندمان پنل (بدون بعد)؛  $P_c$  و  $P_p$  به ترتیب میزان توان بیشینه در شرایط آلودگی و توان بیشینه در شرایط تمیز (بدون آلودگی) بر حسب وات می‌باشد.

### ۴.۲. روش بررسی نتایج

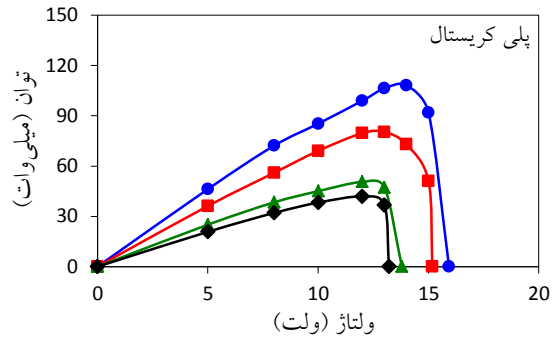
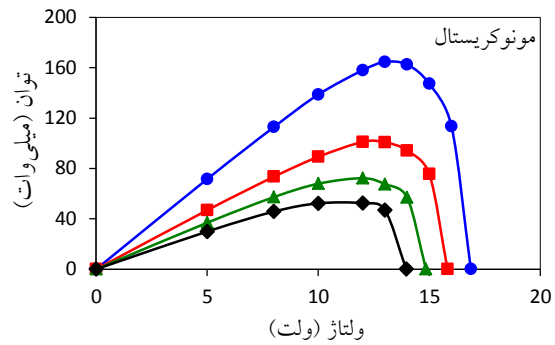
داده‌های حاصل از پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی در شرایط آلودگی هوا به صورت آزمایش فاکتوریل در قالب طرح آماری کاملاً تصادفی توسط نرم‌افزار آماری SAS v. 9.2 مورد تجزیه قرار گرفت. مقایسه میانگین‌ها توسط آزمون چند دامنه‌ای دانکن<sup>۱</sup> در سطح ۵٪ انجام شد.

### ۳. نتایج و بحث

شکل (۵) منحنی‌های مشخصه جریان-پتانسیل (I-V) را به ترتیب برای پنل‌های فتوولتائیک سیلیکونی مونوکریستال و پلی کریستال برای غلظت‌های مختلف آلودگی هوا نشان می‌دهد. داده‌های حاصل از منحنی‌ها بیانگر آن است که اختلاف پتانسیل مدار باز ( $V_{oc}$ ) برای پنل

با توجه به داده‌های جدول (۴) میزان ولتاژ مدار باز در غلظت آلودگی متوسط ppm ۶۶۹/۳۶ (متوسط سه سطح آزمایشی) نسبت به هوای تمیز به ترتیب برای دو نوع پنل مونوکریستال و پلی‌کریستال موجب کاهش ۱۱/۸۱ درصد و ۱۱/۷۵ درصد شد. نتایج نشان می‌دهد که با افزایش آلودگی هوا جریان اتصال کوتاه به‌طور لگاریتمی کاهش یافت. به‌طور متوسط، میزان کاهش شدت جریان اتصال کوتاه در شرایط غلظت آلودگی هوای متوسط سه سطح نسبت به هوای تمیز در پنل مونوکریستال حدود ۴۷/۲۷ درصد و در پنل پلی‌کریستال ۳۹/۲۴ درصد مشاهده شد. میزان توان الکتریکی خروجی در هر دو نوع پنل سیلیکونی با افزایش غلظت آلودگی هوا به‌صورت لگاریتمی کاهش می‌یابد. میزان کاهش توان بیشینه برای غلظت متوسط ppm ۶۶۹/۳۶ در پنل مونوکریستال ۵۳/۴۱ درصد و در پنل پلی‌کریستال ۴۵/۰۸ درصد برآورد شد. اصل سلیمانی و همکاران [۴] طی تحقیقات میدانی میزان کاهش راندمان پنل خورشیدی را در شرایط آلودگی هوای شهر تهران در حدود ۶۰ درصد گزارش داده‌اند که با نتایج حاصل از این پژوهش منطبق است. طبق نتایج حاصل شده تأثیرپذیری پنل نوع مونوکریستال در مقایسه با نوع پلی‌کریستال نسبت به شرایط آلودگی بیشتر است.

پارامتر ولتاژ بیشینه نیز با افزایش میزان آلودگی کاهش یافت. همان‌طور که از جدول (۴) مشخص است، با افزایش میزان آلودگی در سطوح مختلف آزمایش، ولتاژ بیشینه به‌صورت خطی کاهش نشان داد. به‌طور میانگین با افزایش غلظت آلودگی هوا در داخل محفظه آزمایش به ppm ۶۶۹/۳۶ در پنل مونوکریستال ۹/۷۳ درصد و در پنل پلی‌کریستال ۱۰/۳۳ درصد کاهش یافت. در شدت جریان بیشینه نیز به‌طور میانگین برای پنل نوع مونوکریستال ۴۸/۸۷ درصد و برای پنل نوع پلی‌کریستال ۳۹/۲۹ درصد کاهش مشاهده شد.



شکل (۶): منحنی توان-ولتاژ در سطوح مختلف آلودگی هوا، برای دو نوع پنل فتوولتائیک سیلیکونی مونو و پلی‌کریستال، (میزان آلودگی (ppm): تمیز، ۵۷۷، ۷۶۹/۴، ۹۶۱/۷)

### ۲.۳. نتایج تجزیه واریانس داده‌ها

نتایج تجزیه واریانس پارامترهای عملکردی پنل خورشیدی در جدول (۳) نشان می‌دهد که اثر نوع پنل، میزان غلظت آلودگی هوا و اثر متقابل آن‌ها بر همه پارامترهای عملکردی بسیار معنی‌دار ( $p < 0.01$ ) بود. در تحقیقات میدانی انجام شده توسط اصل سلیمانی [4] نشان داد که آلودگی هوا به‌طور قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد پنل خورشیدی تأثیر دارد. جدول (۴) نتایج مقایسه میانگین‌های مقادیر کلیه پارامترهای عملکردی پنل‌های مورد آزمایش به روش آزمون چند دامنه‌ای دانکن در سطح ۵ درصد را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش غلظت آلودگی هوا پارامتر ولتاژ مدار باز به‌شکل خطی کاهش می‌یابد.

جدول (۳): نتایج تجزیه واریانس داده‌های پارامترهای عملکردی پنل خورشیدی

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات			
		ولتاژ مدار باز	جریان اتصال کوتاه	توان بیشینه	ولتاژ بیشینه
نوع سلول (A)	۱	۴/۳۲۶**	۵۰/۱۷**	۴۰۱۸/۶۰۷**	۰/۱۰۶**
میزان آلودگی (B)	۳	۹/۳۲۷**	۵۴/۹۶۶**	۹۳۱۱/۶۱۶**	۴/۵۴۵**
A×B	۳	۰/۰۵*	۴/۱۷**	۶۰۵/۸۵۱**	۰/۲۳۳**
خطا	۱۶	۰/۰۰۴	۰/۰۳۵	۶/۲۸	۰/۰۰۲
ضریب تغییرات (C. V.) (درصد)		۰/۴۳	۲/۲۹	۲/۸۶	۰/۳۷

\*، \*\*، به ترتیب معنی‌دار در سطح ۵٪ و ۱٪



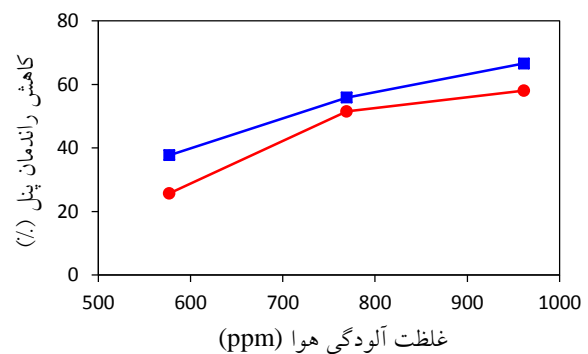
جدول (۴): نتایج مقایسه میانگین پارامترهای عملکردی پنل‌های خورشیدی در اثر آلودگی هوا

نوع پنل سیلیکونی	غلظت آلودگی (ppm)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (mA)	توان بیشینه (mW)	ولتاژ بیشینه (V)	جریان بیشینه (mA)
مونوکریستال	۰	۱۶/۸۷ <sup>a</sup>	۱۴/۹ <sup>a</sup>	۱۶۷/۸۵ <sup>a</sup>	۱۳/۷۲ <sup>a</sup>	۱۲/۲۲ <sup>a</sup>
	۵۷۷/۰۲	۱۵/۸۲ <sup>b</sup>	۹/۷ <sup>b</sup>	۱۰۴/۴۹ <sup>c</sup>	۱۳/۱ <sup>b</sup>	۷/۹۷ <sup>b</sup>
	۷۶۹/۳۶	۱۴/۸۵ <sup>d</sup>	۷/۶۵ <sup>c</sup>	۷۴/۰۶ <sup>e</sup>	۱۲/۳۴ <sup>d</sup>	۶ <sup>c</sup>
	۹۶۱/۷۰	۱۳/۹۶ <sup>e</sup>	۶/۲۱ <sup>d</sup>	۵۶/۰۳ <sup>f</sup>	۱۱/۷۲ <sup>f</sup>	۴/۷۷ <sup>d</sup>
پلی کریستال	۰	۱۵/۹۳ <sup>b</sup>	۹/۵۳ <sup>b</sup>	۱۱۲/۹ <sup>b</sup>	۱۳/۶۴ <sup>a</sup>	۸/۲۷ <sup>b</sup>
	۵۷۷/۰۲	۱۵/۱۷ <sup>c</sup>	۷/۵۹ <sup>c</sup>	۸۳/۸۸ <sup>d</sup>	۱۲/۹۴ <sup>c</sup>	۶/۴۷ <sup>c</sup>
	۷۶۹/۳۶	۱۳/۷۹ <sup>e</sup>	۵/۳۴ <sup>e</sup>	۵۴/۷۶ <sup>g</sup>	۱۲/۰۱ <sup>e</sup>	۴/۵۵ <sup>d</sup>
	۹۶۱/۷۰	۱۳/۲ <sup>f</sup>	۴/۴۴ <sup>f</sup>	۴۷/۳۵ <sup>g</sup>	۱۱/۷۵ <sup>f</sup>	۴/۰۳ <sup>e</sup>

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

### ۳.۳. نتایج درصد کاهش راندمان پنل

شکل (۷) درصد کاهش راندمان پنل با توجه به میزان کاهش توان الکتریکی خروجی پنل خورشیدی در اثر آلودگی هوا نسبت به شرایط تمیز و بدون آلودگی محاسبه شده از رابطه (۲) را نشان می‌دهد. مشاهده می‌شود که در هر دو نوع پنل سیلیکونی در اثر حضور آلودگی در هوا راندمان توان تولیدی کاهش یافت. نتایج نشان می‌دهد که افزایش آلودگی هوا از ۵۷۷/۰۲ ppm تا ۹۶۱/۷ ppm موجب می‌گردد کاهش راندمان پنل مونوکریستال از ۲۵/۷ درصد تا ۶۶/۶۱ درصد افزایش یابد. مقادیر متناظر برای پنل نوع پلی کریستال از ۲۵/۷۱ تا ۵۸/۰۶ درصد برآورد شده است. نتایج تحقیق گزارش شده در مرجع [۴] نشان داد میزان کاهش توان پنل خورشیدی در آلوده‌ترین روز تهران حدود ۶۰ درصد تعیین شد.



شکل (۷): تغییرات میزان کاهش راندمان پنل‌های خورشیدی سیلیکونی با

میزان غلظت آلودگی هوا، (مونوکریستال ■، و پلی کریستال ●)

### ۴. نتیجه گیری

در این تحقیق اثر آلودگی هوا ناشی از سوختن نفت‌گاز بر خصوصیات عملکردی دو نوع پنل خورشیدی سیلیکونی مونوکریستال و پلی کریستال به صورت آزمایشگاهی مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصل از تحقیق را می‌توان به صورت زیر خلاصه کرد:

با توجه به افزایش گازهای معلق ناشی از احتراق مواد سوختن افزایش میزان غلظت آلودگی جوی اختلاف پتانسیل مدار باز ( $V_{oc}$ ) و اختلاف پتانسیل بیشینه ( $V_{max}$ ) به صورت خطی کاهش یافت. شدت جریان اتصال کوتاه ( $I_{sc}$ ) و شدت جریان بیشینه ( $I_{sc}$ ) و نیز توان الکتریکی بیشینه ( $P_{max}$ ) به صورت لگاریتمی کاهش یافت. اختلاف پتانسیل مدار باز در غلظت آلودگی هوای متوسط ۶۶۹/۳۶ ppm برای پنل نوع مونوکریستال در حدود ۱۱/۸۱ درصد و برای پنل نوع پلی کریستال ۱۱/۷۵ درصد کاهش یافت. همچنین مشاهده شد که شدت جریان اتصال کوتاه برای پنل مونوکریستال و پلی کریستال به ترتیب ۴۷/۲۷ درصد و ۳۹/۲۴ درصد کاهش نشان داد. توان الکتریکی بیشینه برای هر یک از انواع پنل‌ها به ترتیب ۵۳/۴۱ درصد و ۴۵/۰۸ درصد برآورد گردید. اختلاف پتانسیل بیشینه و شدت جریان بیشینه برای پنل نوع مونوکریستال به ترتیب ۹/۷۳ درصد و ۴۸/۸۷ درصد و برای پنل نوع پلی کریستال به ترتیب ۱۰/۳۳ درصد و ۳۹/۲۹ درصد کاهش یافت.

### مراجع

[1] Jager-Waldau, A. "Photovoltaic and Renewable Energies in Europe", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 11, No. 7, pp. 1414-1437, 2007.

[2] Torres-Lobera, D., and Valkealahti, S. "Inclusive Dynamic Thermal and Electric Simulation Model of Solar PV Systems Under Varying Atmospheric Conditions", Solar

- Energy, Vol. 105, pp. 632–647, 2014.
- [۳] شاهادی، عباس، شکوفکی، مجید. «انرژی خورشیدی»، مجموعه مقالات سومین همایش رؤسا و مدیران بیمارستان‌های نیروهای مسلح، ۱۳۹۱.
- [4] Asl-Soleimani, E., Farhangi, S., and Zabihi, M. "The Effect of Tilt Angle, air Pollution on Performance of Photovoltaic Systems in Tehran", Renewable Energy, Vol. 24, pp.459–68, 2001.
- [5] Maghami, M., Hizam, H., Gomes, C., Hajjighorbani, S., Rezaei, N. "Evaluation of the 2013 Southeast Asian Haze on Solar Generation Performance", PloS One, Vol. 10, No. 8, e0135118, 2015.
- [6] Al-Hasan, A. Y., and Ghoneim, A. A. "A New Correlation between Photovoltaic Panel's Efficiency and Amount of Sand Dust Accumulated on Their Surface", International Journal of Sustainable Energy, Vol. 24, No. 4, pp. 187–197, 2005.
- [7] Darwish, Z. A., Kazem, H. A., Sopian, K., Al-Goul, M., Alawadhi, H. "Effect of Dust Pollutant Type on Photovoltaic Performance", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 41, pp. 735–44, 2015.
- [8] Bethea, R. M., Collier, E. G. and Reichert, J. D. "Dust Storm Simulation for Accelerated Life Testing of Solar Collector Mirrors", Solar Energy Engineering Vol. 105, pp. 329–335, 1983.
- [9] Elminir, H. K., and Ghitas, A. E. "Effect of Dust on the Transparent Cover of Solar Collectors", Energy Conversion and Management, Vol. 47, No. 18-19, pp. 3192-3203, 2006.
- [10] Sulaiman, S. A., Singh, A. K., Mokhtar, M. M., and Bou-Rabee, M. A. "Influence of Dirt Accumulation on Performance of PV Panels", Energy Procedia, Vol. 50, pp. 50-56, 2014.
- [11] Monto, M., and Pillai, R. "Impact of Dust on Solar Photovoltaic Panels", Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, No. 9, pp. 3124-3131, 2010.
- [12] Dietz, A. G. H. "Introduction to the Utilization of Solar Energy", In Diathermassous Material and Properties of Materials, Zarem A. M. and Erway D. D. (Eds), McGraw Hill, New York.
- [۱۳] «آینده گردوغبار در ایران»، پایگاه خبری الف. سازمان حفاظت محیط‌زیست ایران. ۱۳۹۳.
- [14] Pidwirny, M. "Atmospheric Effects on Incoming Solar Radiation", Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. Date Viewed. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7f.html>, 2006.
- [15] Kohraku, S., and Kurokawa, K. "A Fundamental Experiment for Discrete-wavelength LED Solar Simulator", Solar Energy Materials and Solar Cells Vol. 90, No. 18, pp. 3364-3370, 2006.
- [۱۶] فتادی، الهام، منصور، نبی‌الله، خانی، محمدرضا، عبدی، اسد، واعظی، مهناز. «برآورد میزان ضریب انتشار آلاینده‌های شاخص هوا در بخش حمل و نقل شهر تهران»، اولین همایش ملی حفاظت و برنامه‌ریزی محیط‌زیست، دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان، همدان، ایران، ۱۳۹۱.
- [17] Ndiaye, A., Kébé, C. M. F., Ndiaye, P. A., Charki, A., Kobi A., and Sambou V. "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, pp. 1166-1173, 2013.