

Development of a Mechanical Cleaning Machine for Photovoltaic Arrays Surface

SIAVASH KASAEIPOUR¹, MOHAMMADMEHDI MAHARLOOEI^{1*}, HAMID MORTEZAPOUR¹

1. Biosystems Engineering Dept., School of Agriculture, Shahid Bahonar University of Kerman, Kerman, Iran.

(Received: July 5, 2020- Revised: Nov. 22, 2020, Accepted: Dec. 14, 2020)

ABSTRACT

Dust deposition on the photovoltaic (PV) arrays surface may cause physical damages, weakens the sun's radiation, and increases the panel temperature that results in the reduction of the electrical efficiency of the panel. PV array cleaning is engaged with issues such as water and energy consumption, and long operating time. An efficient mechanical cleaner improves the cleaning operations compared to the manual operation. In this study, development of a mechanical cleaning machine for photovoltaic arrays surface was carried out. The machine was evaluated using two factors including: the equivalent speed ratio of the brush to the cleaning platform, and the type of detergent at three levels, respectively. The tests were arranged at completely randomized design with three replications. The results showed that the effect of equivalent speed ratio of the brush to the cleaning platform on dust removal was significant ($P < 0.05$). Also, the effect of all studied factors on output power was significant ($P < 0.05$). It was revealed that the cleaning machine can increase the amount of power in each 280-Watt panel by up to 40 Watt and the efficiency up to 4%.

Keywords: Dust Concentration, Detergent, Cylindrical Brush, Electrical Efficiency

ساخت و توسعه ماشین مکانیکی تمیزکننده‌ی سطح آرایه‌های فتوولتائیک

سیاوش کسائی پور^۱، محمدمهدی مهارلوئی^{۱*}، حمید مرتضی پور^۱

۱. گروه مهندسی مکانیک بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید باهنر کرمان، کرمان، ایران
(تاریخ دریافت: ۱۳۹۹/۴/۱۵ - تاریخ بازنگری: ۱۳۹۹/۹/۲ - تاریخ تصویب: ۱۳۹۹/۹/۲۴)

چکیده

گرد و غبار می‌تواند با ایجاد آسیب‌های فیزیکی، تضعیف تابش رسیده و افزایش درجه حرارت سبب کاهش بازده یک آرایه‌ی فتوولتائیک شود. تمیزکاری آرایه‌ها درگیر مسائلی مانند اتلاف آب، انرژی و زمان است. یک وسیله مکانیکی کارآمد می‌تواند محیط بزرگی را در زمانی به مراتب کمتر از نیروی انسانی تمیز نماید. در تحقیق حاضر ساخت و مطالعه‌ی عملکرد یک ماشین تمیزکننده مکانیکی بررسی شد. آزمایش‌هایی با دو عامل نسبت سرعت خطی معادل برس به سکوی تمیزکننده و نوع شوینده، هر کدام در سه سطح، در قالب طرح کامل تصادفی و سه تکرار انجام گردید. ارزیابی‌ها نشان داد اثر عامل نسبت سرعت بر حذف گرد و غبار پنل در سطح ۵ درصد معنی‌دار است؛ از طرفی اثر هر دو عامل آزمایش، در سطح ۵ درصد بر افزایش توان معنی‌دار بود. نتایج نشان داد ماشین تمیزکننده می‌تواند با کاهش غلظت گرد و غبار، توان هر پنل ۲۸۰ وات را تا ۴۰ وات و بازده را تا ۴ درصد افزایش دهد.

واژه‌های کلیدی: غلظت گرد و غبار، ماده شوینده، برس استوانه‌ای، بازده الکتریکی

مقدمه

بیشینه‌ی توان و عملکرد بهینه‌ی یک پنل فتوولتائیک به طور معمول تابعی از تابش خورشید، گستره طیف خورشید، شرایط محیطی و آب و هوایی، خواص ذاتی پنل و اجزای آن است. اگرچه برخی عامل‌های خارجی، مانند موقعیت جغرافیایی و شرایط محیطی، می‌تواند در شرایط خاص تاثیر بیشتری بر عملکرد پنل بگذارند. در این میان، خاک‌گرفتگی^۱ مشکلی است که در بیشتر مواقع نادیده گرفته می‌شود یا ارزیابی اثر آن انجام نمی‌شود (Sarver et al., 2013). گرد و غبار، اصطلاحی است که به طور کلی برای ذرات جامد با قطر کمتر از ۵۰۰ میکرومتر کاربرد دارد (Mani and Pillai, 2010). سایه‌افکنی^۲ ناشی از گرد و غبار به دو گروه تقسیم می‌شوند: (۱) سایه‌افکنی سخت^۳ (۲) سایه‌افکنی نرم^۴. سایه‌افکنی نرم ناشی از دوده در اتمسفر، یا ذرات ریز گرد و غبار است اما سایه‌افکنی سخت ناشی از انباشت گرد و غبار خشک شده یا فضولات پرندگان است. نتایج تحقیقات نشان می‌دهد که جریان الکتریکی آرایه‌های فتوولتائیک با سایه‌افکنی نرم کاهش می‌یابد و افت ولتاژ آرایه در سایه افکنی سخت مشاهده می‌شود (Maghami et al., 2016). در صورتی که غلظت گرد و غبار ۲۰

گرم بر متر مربع باشد، باعث کاهش ۲۱-۱۵ درصدی جریان اتصال کوتاه، ۶-۲ درصدی ولتاژ مدار باز و ۳۵-۱۵ درصدی بازده الکتریکی می‌شود (Zaihidee et al., 2016).
چهار روش اصلی برای تمیزکردن آرایه‌های فتوولتائیک وجود دارد (Fathi et al., 2017):

(۱) طبیعی: در روش طبیعی از قدرت باد، نیروی جاذبه و شستشوی باران برای حذف گرد و غبار از سطح پنل استفاده می‌شود اما اثر این روش مطلوب نیست (He et al., 2011). می‌توان آرایه‌ها را هنگام صبح زود، اواخر عصر، شب و روزهای بارانی به صورت عمودی یا مایل قرار داد تا گرد و غبار از سطح پنل حذف شوند. اگرچه این تغییر شیب برای مزرعه‌های خورشیدی با تعداد زیاد آرایه بسیار دشوار است (Gaier et al., 1991).

(۲) نانو پوشش‌های خودتمیزشونده: اگر سطح آرایه‌های فتوولتائیک با نانو فیلم‌های خودتمیزشونده پوشانده شود، این سطوح تمیز خواهند ماند. نانوفیلم‌های خودتمیزشونده از مواد آب دوست^۵ یا آب‌گریز^۶ ساخته شده‌اند. یکی از رایج‌ترین مواد آب-دوست دی اکسید تیتانیوم (TiO₂) است. سطوح آب‌گریز مثل برگ‌های گیاه نیلوفر آبی دارای خاصیت آب‌گریزی بسیار بالا و

* نویسنده مسئول: maharloo@uk.ac.ir

1 Soiling
2 Shading
3 Hard Shading
4 Soft Shading
5 Hydrophilicity
6 Hydrophobic

مزرعه‌های خورشیدی در ایران برای حذف گرد و غبار از نیروی انسانی استفاده کنند و خرید سامانه‌ای خاص برای انجام عملیات تمیزکاری مقرون به صرفه نباشد.

ماشین تمیزکننده خودکار گرد و غبار بدون آب^۳ (NOMADD) به طور خاص برای حذف گرد و غبار از سطح آرایه فتوولتائیک بدون استفاده از آب و در شرایط بیابانی طراحی شده است (Grando *et al.*, 2019). در تحقیقی از پهباد برای تمیز کردن و شستشو سطح پنل‌های فتوولتائیک استفاده شد. این پهباد شامل چهار پروانه و یک دنباله^۴ تمیزکننده است که مواد خاصی را برای عملیات تمیزکاری با خود همراه دارد. تنها بخشی که با صفحات فتوولتائیک در تماس است دنباله تمیزکننده آن است، به این صورت که با شناسایی پنل با سطح آلوده، این پهباد به مقصد مورد نظر می‌رود و با دنباله تمیزکننده خود که روی سطح پنل قرار می‌گیرد عملیات شستشو را انجام می‌دهد (Grando *et al.*, 2019).

سامانه‌های تمیزکننده متعددی با توجه به موقعیت جغرافیایی قرارگیری آرایه‌های فتوولتائیک در سطح جهان طراحی شده است. دلیل این تعدد در شیوه، تلاش برای انتخاب بهترین روش با توجه به شرایط محیطی و طوفان‌های گرد و غبار آن منطقه است. در ایران به دلیل قیمت بالای این سامانه‌ها، خریداری و استفاده‌ی نمونه‌های خارجی مقرون به صرفه نیست در نتیجه بیشتر مواقع از نیروی انسانی برای عملیات تمیزکاری استفاده می‌شود که هم تلفات آب زیادی دارد و هم انرژی زیادی صرف حذف گرد و غبار خواهد شد. سامانه‌های تمیزکننده سطح آرایه‌ها به طور معمول برای یک مزرعه با ابعاد مشخص سفارش داده می‌شوند. در تحقیق حاضر ساخت و ارزیابی یک ماشین تمیزکننده سطح پنل‌های فتوولتائیک با عرض کار قابل تغییر مد- نظر قرار گرفت. هدف از انجام این تحقیق ساخت ماشین تمیزکننده مکانیکی و همچنین بررسی اثر استفاده از آن بر غلظت گرد و غبار سطح و تغییرات خروجی پنل بود.

مواد و روش‌ها

مشخصات ماشین تمیزکننده سطح آرایه‌های فتوولتائیک

ماشین تمیزکننده سطح آرایه‌های فتوولتائیک ساخته شده شامل سه بخش اصلی است که اجزای اصلی آن در شکل (۱) مشخص شده است:

سکوی تمیزکننده که شامل بدنه فولادی، دو برس استوانه-ای، موتور محرک برس، موتور محرک سکو است.

رطوبت بسیار کم است. نانو ساختارهای این مواد می‌توانند زاویه تماس^۱ بالای ۱۵۰ درجه ایجاد کنند، به طوری که قطرات آبی که با سطح در تماس هستند به شکل کروی شده در می‌آیند و ذرات گرد و غبار همراه قطرات از روی سطح پنل حمل می‌شوند. اما این روش خود تمیزشوندگی نمی‌تواند برای آرایه‌های فتوولتائیک بکار گرفته شود چون اکثر این آرایه‌ها در مناطق بیابانی با بارش کم هستند (Niu *et al.*, 2009; Park *et al.*, 2010; Zhu *et al.*, 2011).

۳) روش الکترواستاتیک: روش الکتریکی به طور معمول برای محافظت از پنل‌های فتوولتائیک فضاپیماها برای اکتشافات روی سطح ماه و مریخ استفاده می‌شود (Calle *et al.*, 2011). سیمس و همکاران از یک سپر الکترودینامیکی^۲ برای جلوگیری از رسوب ذرات موجود در اتمسفر روی سطح پنل استفاده کردند (Sims *et al.*, 2003).

۴) روش مکانیکی: اگرچه مجموعه‌ای از روش‌های کنونی تمیزکاری سامانه‌های فتوولتائیک درگیر مسائلی نظیر مصرف زیاد آب و انرژی، اتلاف زمان و ناکارآمدی ماشین تمیزکننده خودکار است، یک ماشین مکانیکی کارآمد می‌تواند محیط بزرگی را تحت پوشش قرار دهد و عملیات تمیزکاری را در مقایسه با نیروی انسانی بهبود بخشد. با وجود رشد چشمگیر صنعت خورشیدی در چند سال گذشته، روش تمیزکاری و نگهداری آرایه‌های فتوولتائیک بدون تغییر بوده است. آرایه‌های کوچک هنوز با آب و صابون به صورت دستی تمیز می‌شوند. در بعضی از مزرعه‌های بزرگتر خورشیدی، عملیات تمیزکاری توسط یک ماشین آتش-نشانی با آب پرفشار انجام می‌گیرد (Deb and Brahmabhatt, 2018). بررسی‌ها نشان می‌دهد، به طور معمول ماشین‌های تمیزکننده موجود در بازار برای انجام عملیات تمیزکاری و حذف گرد و غبار، آب زیادی مصرف می‌کنند (۲/۵ تا ۱۲ لیتر بر متر مربع) و از نظر اقتصادی برای مزرعه‌های خورشیدی و صاحبان‌شان مقرون به صرفه نیستند (Radoi *et al.*, 2014). لذا لازم است یک بررسی جامع بر روی اقتصادی بودن و کارایی روش‌های توسعه-یافته برای کاهش اثر گرد و غبار و بهبود مشخصه آرایه‌ی فتوولتائیک با توجه به شرایط هر شهر یا روستایی که صفحه‌ها نصب می‌شوند، انجام شود تا بتوان بهترین روش مکانیکی را برای حفظ بازده آرایه‌های فتوولتائیک در سطح مطلوب انتخاب کرد (Mohammadizadeh., 2017). ماشین‌های تمیزکننده موجود در بازار به طور خاص برای مزرعه‌هایی با ابعاد مشخص آرایه‌ی مربوط به همان مزرعه طراحی می‌شوند و همین امر سبب شده است که

3 NO-water Mechanical Automated Dusting Device

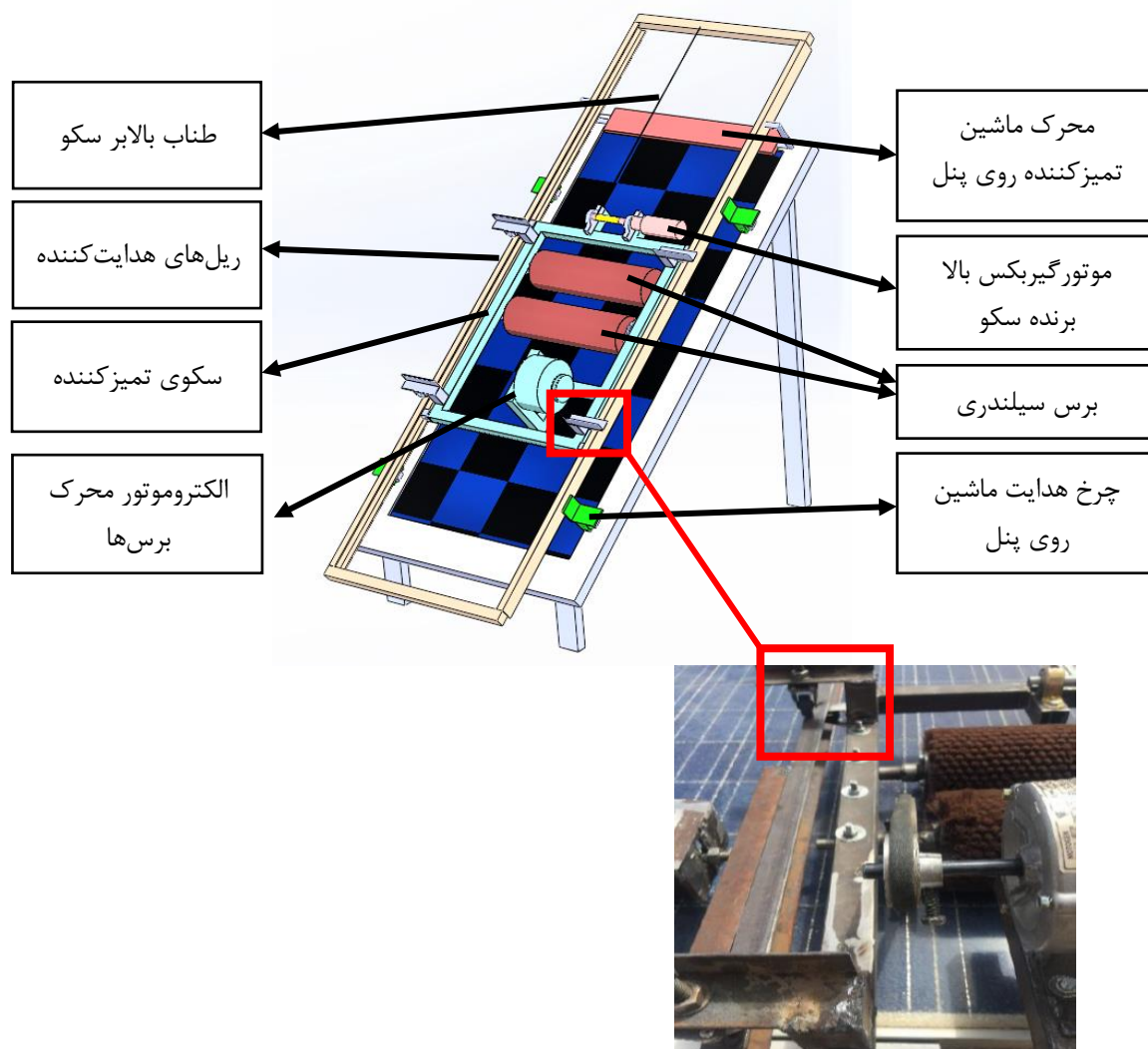
4 Tail

1 Contact Angle

2 Electrodynamic shield

محرك ماشين تميزكننده روي آرايه‌ها كه شامل بدنه، پولي و تسمه‌ي هدايت‌كننده و موتور محرك است.

ريل‌هاي هدايت‌كننده سكوي تميزكننده كه از ناوداني‌هاي فلزي ساخته شده است.



شکل ۱- طرح‌واره‌ای از ماشین مکانیکی تمیزکننده سطح آرایه‌ی فتوولتائیک شامل سکوی تمیزکننده و ریل‌های هدایت‌کننده به همراه اجزای اصلی تشکیل‌دهنده ماشین. در مستطیل قرمز، جزئیات چرخ‌های عمودی و جانبی حرکت سکو در ریل‌های هدایت‌کننده

سکوی تمیزکننده ماشین

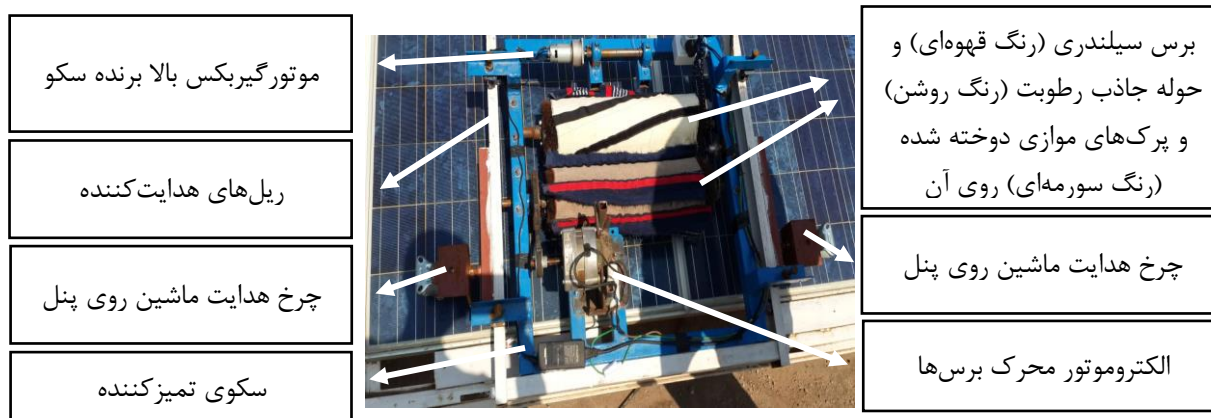
این صورت که برس اول (از بالای سکو) وظیفه‌ی حذف گرد و غبار را از سطح پنل دارد و برس دوم به کمک افشانه‌های پاشنده آب یا مایع شیشه‌شور، تمیزکاری تکمیلی پنل را انجام می‌دهد. بعد از انجام آزمایش‌های اولیه و مشاهده نتیجه کار، به منظور افزایش کارایی و سطح تماس برس‌ها با پنل، بدون افزایش زیاد اصطکاک با سطح پنل، از دو حوله جاذب رطوبت با پرک‌های موازی روی برس استفاده گردید. حوله‌های جاذب پنبه‌ای و پرک‌هایی از همان جنس به منظور افزایش عملکرد و کاهش احتمال آسیب برس سیلندری با نخ‌های پلی‌پروپیلین استفاده شد. حوله جاذب مستطیل شکل به مساحت معادل با محیط استوانه برس سیلندری تهیه شد و برای نصب آسان و سریع روی برس‌ها از جفت چسبک‌های خیاطی استفاده شد. این کار تعویض حوله‌ها را

سکوی تمیزکننده مهم‌ترین بخش از ماشین مورد نظر است و نقش اصلی عملیات تمیزکاری را برعهده دارد. بدنه‌ی سکو از چهار قوطی ۴×۴ سانتی‌متری و به طول ۷۸ سانتی‌متر ساخته شد که با جوش به هم متصل شده‌اند. چرخ‌های عمودی و چرخ‌های جانبی سکوی تمیزکننده به منظور حرکت در ریل‌های هدایت‌کننده به بدنه اصلی متصل شد. پژوهش‌ها نشان می‌دهد استفاده از برس با الیاف مناسب، در روش مکانیکی، باعث حذف ۸۰ درصد گرد و غبار از سطح پنل می‌شود (Jaradat et al., 2015). به همین منظور از برس سیلندری (ساخت شرکت برس صنعت پاسارگاد شیراز) به عنوان بخش اصلی ماشین برای تمیزکردن سطح پنل استفاده شد. برای انجام عملیات تمیزکاری از دو برس استفاده گردید به

اصطکاک جنبشی (بدون بعد)، F_y نیروی عمودی حاصل از جرم موثر برس (N) ، m جرم موثر برس (kg) ، g شتاب گرانش زمین (9.81 m/s^2) ، θ زاویه‌ی نصب پنل (30°) درجه) می‌باشند. با توجه به اینکه جرم موثر برس روی پنل برابر با $1/3$ کیلوگرم است، نیروی اصطکاک برابر با $6/62$ نیوتون می‌شود. با در نظر داشتن اینکه موتور مورد نظر، محرک دو برس است در نتیجه نیروی اصطکاک دو برابر شده و نیروی اصطکاک مجموعه روی سطح پنل برابر با $13/2$ نیوتون محاسبه گردید. سرعت دورانی برس 400 دور بر دقیقه در نظر گرفته شد در نتیجه سرعت زاویه‌ای برابر با 42 رادیان بر ثانیه (هر دور برابر 2π رادیان) می‌شود. با توجه به رابطه (۲) و دانستن شعاع برس که برابر 0.075 متر است، توان مورد نیاز برای غلبه بر نیروی اصطکاک برابر با $41/6$ می‌باشد (Halliday et al., 2013).

$$P = f_k \times r \times \omega \quad (\text{رابطه ۲})$$

که در این رابطه P توان (W) ، f_k نیروی اصطکاک (N) ، r شعاع برس (m) ، ω سرعت زاویه‌ای (rad/s) می‌باشند. در ادامه، با توجه به توان و محدوده سرعت کاری موتور، از بین انواع موجود در بازار، یک الکتروموتور 90 وات با سرعت دورانی 850 دور بر دقیقه (مدل PSC 80/4-6p، شرکت موتوزن، ایران) استفاده شد. شکل (۳) مجموعه سکوی تمیز کننده را نشان می‌دهد.

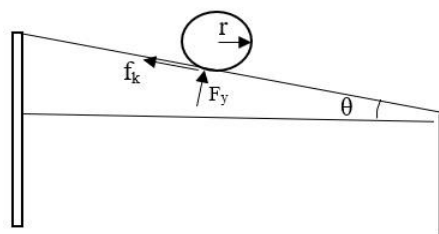


شکل ۳- ماشین تمیز کننده ساخته شده بر روی سطح آرایه‌های فتوولتائیک

گرفته است و با چرخش محور خود موجب جمع شدن طنابی می‌گردد که به بالای ماشین تمیز کننده متصل است و مجموعه سکوی تمیز کننده را داخل ریل‌های هدایت کننده حرکت می‌دهد.

راحت‌تر می‌کند. پرک‌های موازی به صورت مورب روی برس نصب می‌شوند. این پرک‌ها به دلیل افزایش سطح تماس با پنل برای برداشت بهتر خاک‌های سفت شده روی سطح پنل به کار گرفته شدند.

برای انتخاب موتور مناسب محرک برس‌ها، نیاز است توان مورد نظر برای غلبه بر نیروی اصطکاک، با سرعت دورانی مورد نظر فراهم شود. با توجه به اینکه ضریب اصطکاک جنبشی بین سطح شیشه‌ای روی پنل و برس (از الیاف پلی پرولین) برابر $0/6$ است (Truncyte et al., 2008)، نیروی مماسی از رابطه (۱) تعیین می‌شود. نمای جانبی برس استوانه‌ای روی سکو در شکل (۲) مشخص است:



شکل ۲- نمای طرح‌واره جانبی یک برس تمیز کننده روی پنل فتوولتائیک و نیروی‌های عمل کننده بر آن به منظور محاسبه گشتاور و توان موتور محرک

$$f_k = \mu_k \times F_y = \mu_k \times m \times g \times \cos\theta \quad (\text{رابطه ۱})$$

که در این رابطه f_k نیروی اصطکاک (N) ، μ_k ضریب

واحد محرک و روش اتصال ماشین تمیزکننده به آرایه‌ها برای حرکت ماشین روی پنل مکانیزمی شامل دو غلطک هدایت کننده که با تسمه با هم ارتباط دارند و چرخ‌های جانبی و عمودی روی حاشیه پنل تعبیه گردید (شکل ۴). برای نمونه کامل‌تر، یک موتور و چرخ اسکوتر برقی که وظیفه‌ی محرک ماشین روی پنل را دارد، در نظر گرفته شد. چرخ‌های اسکوتر برقی با توان ۲۵۰ وات و با سرعت خطی متوسط ۱/۴ متر بر ثانیه ماشین را از یک پنل به پنل دیگر جابجا می‌کند. مجموعه‌ی محرک نمونه اولیه می‌تواند به عنوان هدایت‌گر و نگه‌دارنده ماشین روی پنل باقی بماند.

مشخصات فنی ماشین تمیزکننده
شکل (۵) ماشین تمیزکننده نهایی را در حال انجام کار نشان می‌دهد.



شکل ۵- مجموعه ماشین تمیزکننده مکانیکی در حال کار روی سطح آرایه. ماشین تمیزکننده شامل سکوی تمیزکننده (قاب آبی رنگ)، ریل هدایت کننده (سفید رنگ) و حامل‌های چرخ روی پنل (قرمز رنگ)



شکل ۴- جزئیات نحوه اتصال ماشین تمیزکننده به آرایه‌های فتولتائیک و سامانه حرکت ماشین بر روی آرایه‌ها

سایر مشخصات فنی ماشین تمیزکننده مکانیکی سطح آرایه فتولتائیک در جدول (۱) آورده شده است.

جدول ۱- مشخصات عمومی ماشین تمیزکننده مکانیکی سطح آرایه فتولتائیک

پارامتر	مقدار
ابعاد سکو	طول ۷۸۰ میلی‌متر
	عرض ۷۸۰ میلی‌متر
	ارتفاع ۸۰ میلی‌متر
ابعاد برس	طول ۵۲۵ میلی‌متر
	قطر کل ۱۵۰ میلی‌متر
	قطر محور ۷۰ میلی‌متر
سرعت خطی سکوی تمیزکننده داخل ریل	۰/۰۴۲ تا ۰/۱۳۹ متر بر ثانیه
ابعاد ماشین	طول ۱۱۱۵ میلی‌متر (قابل تغییر)
	عرض ۸۰۰ میلی‌متر
کل ماشین	وزن ۳۰ کیلوگرم

جدول ۲- مشخصات اصلی پنل‌های مورد آزمایش

ابعاد سلول (cm×cm)	ابعاد پنل (cm×cm)	ولتاژ مدار باز (V)	جریان اتصال کوتاه (A)	بیشینه توان (W)
۱۵×۱۵	۱۹۵×۹۹	۴۴/۸	۸/۳۳	۲۸۰

بعد از آماده‌سازی ماشین تمیزکننده، مراحل انجام آزمایش به منظور ارزیابی ماشین انجام گردید. برای این کار آرایه‌ای با ۶ پنل که مشخصات فنی آن در جدول (۲) مشخص است، در نظر گرفته شد. پنل‌های مورد استفاده ساخت کشور چین و شرکت SUNTECH (مدل پنل STP280-24/VD) بوده است.

1333R، شرکت TES، ساخت تایوان) که شدت تابش را بر حسب وات بر متر مربع اندازه گیری می کند، استفاده شد. به منظور بررسی کاربردی خروجی پنل تغییرات بازده پنل به عنوان مشخصه اصلی، با استفاده از رابطه ی (۳)، محاسبه گردید (Furkan and Mehmet Emin, 2010):

$$\eta = \frac{P_{\max}}{E \times A} \times 100 \quad (\text{رابطه ۳})$$

که در این رابطه η بازده (%)، P_{\max} بیشینه توان خروجی (W)، E شدت تابش (W/m^2) و A مساحت پنل (m^2) می باشند. تحلیل داده های آزمایش با آزمون فاکتوریل در قالب طرح کاملاً تصادفی انجام گردید. صفت های مورد ارزیابی شامل تغییرات غلظت گرد و غبار روی سطح پنل، توان بیشینه و بازده الکتریکی پنل قبل و بعد از تمیز کردن با ماشین تمیز کننده بود. برای اندازه گیری غلظت گرد و غبار بر روی سطح پنل، چهار سلول قبل و بعد از انجام عملیات به صورت تصادفی از هر پنل در نظر گرفته شد و مقدار غلظت گرد و غبار موجود روی این چهار سلول به وسیله ترازوی دقیق (مدل MH، شرکت BalRama، دقت اندازه گیری ۰/۰۱) اندازه گیری گردید؛ روش اندازه گیری بدین صورت بود که قبل از انجام عملیات تمیزکاری، چهار سلول از سطح آرایه به صورت تصادفی انتخاب می شد و خاک روی آن برداشته و با تیغه لاستیکی و کاردک به طور کامل جمع آوری و وزن کشی می گردید پس از اتمام تمیزکاری خاک باقی مانده از چهار سلول دیگر مجدداً جمع آوری و وزن می شد و با توجه به میزان کاهش غلظت گرد و غبار بعد از انجام عملیات تمیزکاری نسبت به غلظت گرد و غبار قبل از شروع به کار ماشین، درصد کاهش غلظت گرد و غبار به کمک ماشین تمیز کننده محاسبه شد. در نهایت نتایج حاصل از آزمایش با نرم افزار SPSS 26 تحلیل و برای آزمون های مقایسه میانگین از آزمون چند دامنه ای دانکن استفاده گردید و نمودارهای حاصل از نتایج آماری در نرم افزار Excel 2016 رسم شد.

تحلیل اقتصادی استفاده از ماشین تمیز کننده مکانیکی

به منظور بررسی اقتصادی استفاده از ماشین بجای نیروی انسانی برای تمیز کردن آرایه های خوشیدی، تحلیل اقتصادی براساس هزینه اولیه ساخت و راه اندازی و همچنین هزینه های جاری بهره برداری از ماشین به جای نیروی انسانی و درآمد ناشی از کاهش هزینه های نیروی کارگری انجام شد و دور بازگشت سرمایه محاسبه گردید.

با توجه به تحقیقات لو و زائو در سال ۲۰۱۸ مبنی بر اثرات اندازه ذرات و زاویه پنل های فتوولتائیک و ارتباط آن بر تجمع گرد و غبار روی سطح پنل، بیشترین نرخ تجمع گرد و غبار روی سطح با ذرات ۱۵۰ میکرومتر مشاهده شد (Lu and Zhao, 2018). قبل از هر آزمایش، مخلوط آب و خاک رس الک شده (الک با شماره مش ۱۰۰) با قطر ۱۵۰ میکرومتر آماده گردید و با غلظت مشخص (براساس غلظت خاک طبیعی انباشته بر روی پنل در مدت یک ماه)، به کمک سمپاش روی سطح پنل ها پاشیده شد. به این صورت که ابتدا مخلوط آب و خاک با غلظت مشخص آماده شد و از سمپاش به منظور پاشش یکنواخت روی سطح پنل استفاده می گردید. آزمایش ها پس از خشک شدن کامل مخلوط خاک و آب روی سطح پنل ها، انجام شدند.

آزمایش های مربوط به ارزیابی ماشین تمیز کننده سطح پنل های فتوولتائیک در آزمایشگاه انرژی خورشیدی بخش مهندسی مکانیک بیوسیستم دانشگاه شهید باهنر کرمان از تاریخ ۹۸/۹/۹ تا ۹۸/۱۰/۳ انجام شد. برای این منظور، عامل های آزمایش شامل نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکوی تمیز کننده (در سه سطح ۱۸، ۵۸ و ۷۵) و نوع ماده شوینده (آب، مایع شیشه شور و بدون آب و مایع شیشه شور (خشک)) بودند. انتخاب سطح های مختلف برای عامل نسبت سرعت خطی برس به سرعت سکوی تمیز کننده، با توجه به آزمایش های اولیه و براساس حداقل گرد و غبار ایجاد شده و ارتعاش ماشین بر روی سطح پنل بود. تنظیم نسبت سرعت معادل خطی برس به سرعت سکو با تغییر پولی محرک متصل به الکتروموتور از قطر ۵۵ به ۷۱ میلی متر انجام شد. با توجه به اینکه سطح رویه آرایه های فتوولتائیک از شیشه است، اثر مایع شیشه شور تجاری به عنوان ماده شوینده دوم بررسی گردید. برای این منظور از شیشه شور صنعتی خودرو استفاده شد. ترکیبات شیمیایی این شیشه شور شامل سدیم لوریل اتر سولفات^۱، آب یون زدایی شده^۲ و اتانول است. در نهایت تاثیر عدم استفاده از ماده شوینده بر عملکرد ماشین نیز به عنوان فاکتور مقایسه ای در مقابل استفاده از ماده شوینده در نظر گرفته شد. توان بیشینه پنل به وسیله سولار آنالایزر^۳ (مدل ۲۰۰، شرکت PROVA، ساخت تایوان) اندازه گیری شد. همچنین تغییرات لحظه ای شدت تابش که روی پنل اتفاق می افتد موجب تغییرات تمام مشخصه های پنل فتوولتائیک می شود. در نتیجه برای دستیابی به نتیجه گیری قابل اعتماد، شدت تابش قبل و بعد از انجام آزمایش اندازه گیری گردید. برای اندازه گیری شدت تابش از یک تابش سنج^۴ (مدل TES-

نتایج و بحث

در این بخش نمودارهای حاصل از نتایج آماری بعد از انجام عملیات تمیزکاری توسط ماشین تمیزکننده بررسی و تحلیل شد و نتایج با تحقیقات دیگران مقایسه گردید. تغییرات غلظت گرد و غبار روی سطح پنل، توان خروجی و بازده الکتریکی مورد بررسی قرار گرفت و در نهایت حالت بهینه کار ماشین تمیزکننده تعیین گردید.

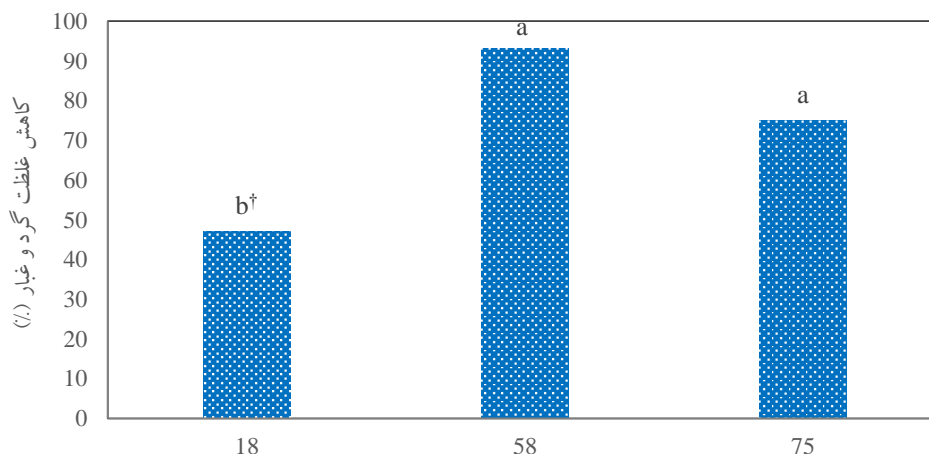
بررسی تغییرات غلظت گرد و غبار روی سطح پنل پس از استفاده از ماشین تمیز کننده

جدول (۳) نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از ارزیابی ماشین تمیزکننده فتوولتائیک را بر کاهش غلظت گرد و غبار نشان می‌دهد. در این جدول، A نسبت سرعت خطی معادل برس به سکو و B نوع ماده شوینده در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به جدول

جدول ۳- تجزیه‌ی واریانس اثر عامل‌های آزمایش بر کاهش گرد و غبار روی سطح پنل

F	میانگین مربعات	درجه آزادی	منبع تغییرات
۶/۳۸۵*	۱۵/۳۵۱	۲	A
۳/۲۸۸ ^{ns}	۱/۲۹۶	۲	B
۱/۹۷۹ ^{ns}	۴/۷۵۸	۴	A×B
	۲/۴۰۴	۱۸	خطاها
		۲۶	کل

ns: تفاوت غیر معنی‌دار و *: تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد



نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکو (بی بعد)

شکل ۶- بررسی اثر نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکو بر روی درصد کاهش غلظت گرد و غبار صفحات فتوولتائیک † میانگین‌های با حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد را نشان می‌دهد.

(۳)، تنها اثر نسبت سرعت خطی معادل برس به سکو تمیزکننده در حذف گرد و غبار پنل در سطح ۵ درصد دارای اختلاف معنی‌دار بود.

شکل (۶) نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر ساده نسبت سرعت خطی معادل برس به سکو بر کاهش غلظت گرد و غبار را نشان می‌دهد. همانطور که از شکل (۶) مشخص است، ماشین تمیزکننده توانست ۹۳ درصد از غلظت گرد و غبار اولیه را در نسبت سرعت ۵۸ از سطح پنل حذف کند. ماشین تمیزکننده NOMADD می‌تواند تا حدود ۹۹/۶ درصد از گرد و غبار سطح را کاهش دهد (www.nomaddesertsolar.com). همچنین مازومدر (۲۰۱۱) که اثر حذف الکتروپینامیکی گرد و غبار و اثرات غلظت گرد و غبار روی سطح پنل را مطالعه می‌کرد دریافت که با این روش می‌توان ۹۰ درصد از گرد و غبار سطح را حذف کرد.

سکو) باشد به طوری که در این حالت کمترین زمان درگیری برس با سطح رخ می‌دهد. از طرفی در نسبت سرعت بالاتر از ۵۸، تمیزکنندگی اندکی کاهش پیدا کرده است که می‌تواند ناشی از عدم پرداخت مناسب برس روی سطح پنل باشد به گونه‌ای که

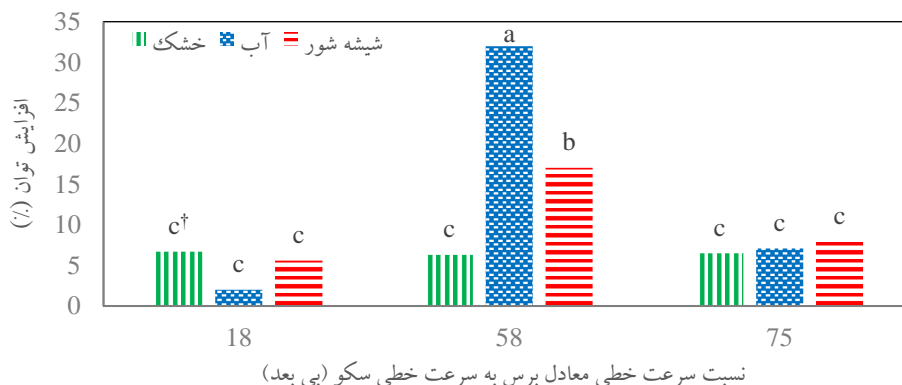
مقایسه سطوح نسبت سرعت نشان می‌دهد که کمترین موفقیت در نسبت سرعت ۱۸ انجام گرفته است. این عدم موفقیت در نسبت سرعت پائین می‌تواند ناشی از کاهش زمان کار سکو تمیزکننده بر روی سطح پنل (به علت زیاد بودن سرعت خطی

(۷)، در نسبت سرعت‌های پائین و بالا، استفاده از شوینده یا آب، تأثیر چندانی بر افزایش توان خروجی آرایه‌های فتوولتائیک نداشته است.

جدول ۴- تجزیه‌ی واریانس اثر عامل‌های آزمایش بر افزایش توان پنل

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
A	۲	۳۹۳۸/۷۰۱	۱۸/۱۲۶*
B	۲	۹۹۰/۷۸۵	۴/۵۶۰*
A×B	۴	۱۶۷۶/۵۴۴	۷/۷۱۶*
خطاها	۱۸	۲۱۷/۲۹۲	
کل	۲۶		

* تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد



شکل ۷- بررسی اثر متقابل عامل‌های نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکو و نوع ماده شوینده بر روی افزایش توان خروجی آرایه فتوولتائیک † میانگین‌های با حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد را نشان می‌دهد.

افزایش توان آرایه فتوولتائیک، حدود ۳۲ درصد بود که در نسبت سرعت ۵۸ و با شوینده آب مشاهده گردید. جاوال و همکاران (۲۰۱۶) بر روی یک سامانه هوشمند تمیزکننده مطالعه کردند و دریافتند که بعد از انجام عملیات تمیزکاری، توان خروجی پنل حدود ۳۳ درصد افزایش یافته است. همچنین اسلام و همکاران (۲۰۱۶) که بر ساخت سامانه خودکار و البته کم هزینه برای تمیزکردن سطح آرایه فتوولتائیک تحقیق می‌کردند، توانستند توان خرجی را ۲۲ درصد افزایش دهند.

بررسی تغییرات بازده آرایه‌های فتوولتائیک با استفاده از ماشین تمیز کننده

جدول (۵) نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از ارزیابی ماشین تمیزکننده فتوولتائیک را در افزایش بازده نشان می‌دهد. در این جدول، A نسبت سرعت خطی معادل برس به سکو و B نوع ماده شوینده در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به جدول (۵)، اثر تمام

پره‌های برس تنها به سرعت با پنل تماس می‌گیرند و نیروی گریز از مرکز بالای پره‌ها موجب می‌شود تنها به پنل ضربه بزند و پردازش مناسب روی سطح انجام نگیرد. بررسی تغییرات توان خروجی آرایه‌ها با استفاده از ماشین تمیز کننده

جدول (۴) نتایج تجزیه واریانس داده‌های حاصل از ارزیابی ماشین تمیزکننده فتوولتائیک را در افزایش توان نشان می‌دهد. در این جدول، A نسبت سرعت خطی معادل برس به سکو و B نوع ماده شوینده در نظر گرفته شده‌اند. با توجه به جدول (۴)، اثر تمام عامل‌های مورد بررسی، در سطح ۵ درصد در افزایش توان پنل اختلاف معنی‌دار دارند.

شکل (۷) نتایج حاصل از مقایسه میانگین اثر متقابل نسبت سرعت خطی برس به سرعت خطی سکو و نوع ماده شوینده بر افزایش توان آرایه فتوولتائیک را نشان می‌دهد. با توجه به شکل

اما، در نسبت سرعت ۵۸، بیشترین افزایش توان مشاهده گردید. دلیل این امر آن است که با توجه به شکل (۶)، بیشترین کاهش غلظت گرد و غبار در نسبت سرعت ۵۸ اتفاق افتاده است در نتیجه این افزایش توان منطقی به نظر می‌رسد. از طرفی اختلاف بین افزایش توان در نسبت سرعت ۵۸ هنگام استفاده از آب و شیشه شور به دلیل خاصیت شیشه‌شور رخ می‌دهد. مواد شوینده نیروی پیوستگی^۱ آب را کم و نیروی چسبندگی^۲ بین ماده شوینده و ذرات گرد و غبار را زیاد می‌کند در نتیجه ذرات گرد و غبار در حضور شیشه‌شور در مقایسه با آب، اگر به طور کامل از سطح پاک نشود، روی سطح باقی خواهند ماند به همین دلیل این اختلاف بین آب و شیشه‌شور رخ می‌دهد. همچنین می‌توان گفت، به طور میانگین بیشترین افزایش توان در نسبت سرعت ۵۸ و با کمک آب که بالاترین وضعیت تمیزکنندگی ماشین مشاهده شد، حاصل گردید. در مجموع بالاترین مقدار

تمیزکننده مکانیکی توانست با حذف گرد و غبار، بازده پنل را تا ۴ درصد در نسبت سرعت ۵۸ افزایش دهد. کمترین کاهش بازده در نسبت سرعت ۱۸ اتفاق افتاده است که روند تغییرات بازده با الگوی تغییرات توان بیشینه (شکل ۷) مطابقت دارد. ماورودیدیس و همکاران (۲۰۰۹) که سامانه‌ای را برای انجام عملیات تمیزکاری آرایه‌های فتوولتائیک به همراه پاشش آب روی سطح پنل طراحی کرده بودند؛ نتیجه گرفتند که این سامانه می‌تواند با حذف گرد و غبار در حین اسپری آب، بازده الکتریکی پنل را تا ۱۵ درصد افزایش دهد. همچنین مورنو و همکاران (۲۰۰۶) که روی یک ربات تمیزکننده برای پنل‌های کاوشگر MSL1 مطالعه می‌کردند، توانستند با حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها، بازده الکتریکی را ۷ درصد افزایش دهند.

عامل‌های مورد بررسی، در سطح ۵ درصد در افزایش توان پنل اختلاف معنی‌دار دارند.

جدول ۵- تجزیه‌ی واریانس اثر عامل‌های آزمایش بر افزایش بازده پنل

منبع تغییرات	درجه آزادی	میانگین مربعات	F
A	۲	۰/۰۰۱۱	۱۰۷/۶۷۳*
B	۲	۰/۰۰۰۲	۲۱/۳۳۵*
A×B	۴	۰/۰۰۰۴	۳۶/۵۲۲*
خطاها	۱۸	۱/۰۰۷E-۵	
کل	۲۶		

*: تفاوت معنی‌دار در سطح پنج درصد

شکل (۸) اثر متقابل نسبت سرعت خطی برس به سکو و نوع ماده شوینده پنل روی افزایش بازده را نشان می‌دهد. ماشین



شکل ۸- بررسی اثر متقابل عامل‌های نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکو و نوع ماده شوینده پنل بر روی افزایش بازده پنل † میانگین‌های با حروف متفاوت تفاوت معنی‌دار در سطح احتمال ۵ درصد را نشان می‌دهد.

جدول ۶- هزینه‌های تمام‌شده برای خرید مواد اولیه برای ساخت ماشین تمیزکننده آرایه‌های فتوولتائیک

بخش‌های اصلی ماشین تمیزکننده	اجزا	هزینه (هزار ریال)
سکوی تمیزکننده	بدنه‌ی آهنی و اتصالات	۱۳۰۰
	برس استوانه‌ای و متعلقات	۶۵۰۰
	موتور محرک برس	۲۱۰۰
ریل‌های هدایت کننده	موتور محرک سکو	۳۴۰۰
	آداپتور و برق کشی مجموعه	۱۳۰۰
محرک ماشین تمیزکننده روی آرایه‌ها	ناودانی و اتصالات	۱۰۰۰
	بدنه‌ی آهنی و عملیات ساخت	۲۰۰۰
	تسمه و پولی‌ها	۹۰۰
سایر	موتور محرک ماشین (موتور اسکوتر)	۷۵۰۰
	چرخ‌ها، یاتاقان‌ها، نبشی، شافت آهنی، پیچ و مهره‌ها و غیره	۴۰۰۰
هزینه‌های تراشکاری و جوشکاری		۲۰۰۰۰
جمع کل		۵۰۰۰۰

تحلیل اقتصادی ماشین تمیزکننده مکانیکی

برای سرمایه‌گذاری موفق در هر پروژه، بر خورداری از یک رویکرد مناسب برای برآورد و کنترل هزینه‌های مربوط به سامانه‌های کاربرد در آن پروژه اهمیت ویژه‌ای دارد (Petronijević et al., 2012). تعیین زمان بازگشت سرمایه یکی از اطلاعات مهمی است که به سرمایه‌گذار این امکان را می‌دهد تا هزینه اولیه و جاری را برای تولید یا ارائه خدمات و با توجه به بودجه خود برنامه‌ریزی کند (Kampf et al., 2016).

هزینه اولیه

هزینه اولیه برای ورود به یک فعالیت اقتصادی، شامل هزینه‌های لازم برای ایجاد آن قبل از تولید محصول یا ارائه خدمت می‌باشد. در تحقیق حاضر، هزینه‌های اولیه مربوط به سامانه شامل تأمین قطعات و هزینه ساخت هستند. در جدول (۶) هزینه‌های تمام‌شده برای خرید مواد اولیه و ساخت ماشین درج شده است. در نهایت هزینه تمام شده برای این ماشین تمیزکننده مکانیکی برابر ۵۰ میلیون ریال است.

هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ماشین تمیز کننده

با توجه به اعلام وزارت امور اقتصادی و دارائی هزینه تعمیر و نگهداری برای سامانه‌های مکانیکی را ۱۰ درصد هزینه اولیه در نظر می‌گیرند.

درآمد حاصل از استفاده از ماشین تمیز کننده

ماشین تمیزکننده مکانیکی مورد نظر به طور میانگین در یک ساعت ۳۰ متر مربع کار می‌کند، در نتیجه در یک روز کاری (۸ ساعت) قادر است ۲۴۰ مترمربع از سطح پنل را تمیز کند. در صورتی که عملیات تمیزکاری توسط نیروی انسانی انجام پذیرد این عملیات کاری به ۸۰ مترمربع بر روز کاهش می‌یابد.

اگر یک مزرعه خورشیدی ۱۰۰ کیلوواتی در نظر گرفته شود، سطح کل پنل‌ها به طور میانگین برابر ۹۰۰ متر مربع است در نتیجه این ماشین می‌تواند در کمتر از ۴ روز کاری عملیات تمیزکردن سطح پنل را انجام دهد. این عملیات اگر توسط نیروی کار انسانی صورت گیرد با توجه به ظرفیت این روش کمی بیشتر از ۱۱ روز کاری به طول می‌انجامد. در صورتی که هزینه خدماتی یک نیروی انسانی در روز ۲ میلیون ریال باشد و هر مزرعه خورشیدی نیاز باشد که چهار مرحله در سال عملیات تمیزکاری انجام شود، میزان صرفه‌جویی در هزینه عملیات تمیزکاری سالانه و درآمد حاصل از استفاده‌ی ماشین تمیزکننده مکانیکی در مقایسه با نیروی انسانی در جدول (۷) مشخص شده است.

جدول ۷- مقایسه هزینه انجام عملیات تمیزکاری سطح آرایه‌ها به کمک ماشین تمیزکننده مکانیکی

نوع هزینه	مقدار هزینه (هزار ریال)
هزینه اولیه	تهیه مواد اولیه و ساخت ۵۰۰۰۰
	هزینه‌ی انرژی مصرفی ۲۵
	استهلاک ۱۱۲۵۰
هزینه جاری	هزینه‌ی نیروی انسانی ۵۲۸۰۰
	هزینه‌ی تعمیر و نگهداری ۵۰۰۰
	جمع هزینه‌های جاری ۶۹۰۷۵
درآمد	۸۸۰۰۰

دوره بازگشت سرمایه استفاده از ماشین تمیز کننده

به مدت‌زمانی گفته می‌شود که هزینه کلی و درآمد کلی با هم برابر می‌شوند و از آن نقطه به بعد، می‌توان به سوددهی رسید. این دوره با رابطه (۵) به دست می‌آید (Gutierrez and Dalsted, 1990).

$$\text{(رابطه ۵)} \quad \text{دوره بازگشت سرمایه} = \frac{\text{هزینه اولیه}}{\text{درآمد} - \text{هزینه جاری}}$$

هزینه‌های جاری استفاده از ماشین تمیز کننده

هزینه‌های جاری به دو صورت ثابت و متغیر با میزان تولید محاسبه می‌شود. این هزینه‌ها می‌تواند شامل هزینه استهلاک، هزینه‌های مربوط به نیروی انسانی، تامین انرژی ماشین (سوخت) و تعمیر و نگهداری باشد (Gutierrez and Dalsted, 1990).

استهلاک

استهلاک یک سامانه مکانیکی نشان‌دهنده کاهش ارزش مادی آن سامانه در طی زمان است که به دلیل آسیب‌های فیزیکی و همچنین قدیمی شدن نحوه عملکرد سامانه صورت می‌گیرد (Petronijević et al., 2012). استهلاک از رابطه (۴) به روش خط مستقیم^۱ محاسبه می‌شود (Alizadeh et al., 2007).

$$\text{(رابطه ۴)} \quad \text{هزینه اسقاط} - \text{هزینه اولیه} = \frac{\text{دوره بازگشت سرمایه}}{\text{طول عمر}}$$

به طور معمول هزینه اسقاط یک ماشین، ۱۰ درصد هزینه اولیه در نظر گرفته می‌شود (Alizadeh, 2011). همچنین طول عمر یک سامانه ویژه‌ی نظافت با توجه به جدول استهلاک‌های اعلام شده از طرف وزارت امور اقتصادی و دارائی ایران ۴ سال لحاظ شد در نتیجه هزینه استهلاک این ماشین تمیزکننده از طریق رابطه (۴) محاسبه شد و برابر با ۱۲۳۷۵ هزار ریال می‌باشد.

هزینه‌ی نیروی انسانی

شامل دستمزد فرد یا افرادی است که عملیات نصب ماشین بر روی پنل‌ها و کنترل آن را انجام می‌دهند. با توجه به اینکه برای انجام عملیات با دستگاه تنها یک نفر تکنسین برق (یا با مهارت کافی در خصوص نحوه سیم کشی) کافی است، با احتساب دستمزدی حدود ۳۳۰۰ هزار ریال در روز، هزینه نیروی انسانی سالانه (با در نظر گرفتن ۱۶ روز کاری در سال) برابر ۵۲۸۰۰ هزار ریال خواهد بود.

هزینه‌ی انرژی مصرفی (سوخت) استفاده از ماشین تمیز کننده

هزینه برق مصرفی مورد نیاز برای کار ماشین تمیزکننده در طول یک سال به عنوان هزینه سوخت یا انرژی مصرفی دستگاه در نظر گرفته می‌شود. انرژی الکتریکی مصرفی ماشین در یک روز کاری برابر ۳ کیلووات-ساعت است و با توجه به اینکه ماشین ۱۶ روز در سال کار می‌کند، انرژی الکتریکی مصرفی ماشین در یک سال برابر با ۴۸ کیلووات-ساعت خواهد بود. بنا بر اعلام وزارت نیرو، قیمت پایه هر کیلووات-ساعت برای متوسط انرژی مصرفی ماهانه ۰ تا ۱۵۰۰ کیلووات-ساعت برابر ۵۲۴ ریال است در نتیجه انرژی مصرفی یک سال ماشین برابر ۲۵ هزار ریال پیش‌بینی می‌شود.

مورد استفاده به منظور حذف گرد و غبار از سطح آرایه‌ها در نظر گرفته شد. نتایج بدست آمده از ارزیابی شامل تغییرات غلظت گرد و غبار روی سطح آرایه، تغییرات توان بیشینه و بازده پنل بعد از انجام عملیات تمیزکاری مورد تحلیل قرار گرفت. نتایج نشان داد بیشترین افزایش توان و بازده پنل تحت تاثیر ماشین تمیزکننده با نسبت سرعت ۵۸ و با کمک آب رخ می‌دهد و همچنین کمترین افزایش توان و بازده پنل تحت تاثیر ماشین تمیزکننده با نسبت سرعت ۱۸ و به همراه آب اتفاق می‌افتد. نتایج نشان داد ماشین تمیزکننده می‌تواند با کاهش غلظت گرد و غبار، توان هر پنل ۲۸۰ وات را تا ۴۰ وات و بازده را تا ۴ درصد افزایش دهد. هیچگونه تعارض منافع بین نویسندگان وجود دارد.

با توجه به رابطه (۵) دوره بازگشت سرمایه ماشین تمیزکننده به طور تقریبی برابر با ۲/۶ سال خواهد بود در نتیجه بعد از طی شدن این زمان کارفرما یا سرمایه‌گذار به سوددهی می‌رسد که نشان‌دهنده توجیه اقتصادی مناسب استفاده از تمیزکننده می‌باشد.

نتیجه‌گیری

در تحقیق حاضر مراحل طراحی و ساخت ماشین تمیزکننده سطح آرایه فتوولتائیک انجام شد و عملکرد آن مورد بررسی قرار گرفت. عوامل موثر بر عملکرد ماشین شامل نسبت سرعت خطی معادل برس به سرعت خطی سکوی تمیزکننده و نوع ماده شوینده

REFERENCES

- Alizadeh, M. R. (2011). Field performance evaluation of mechanical weeders in the paddy field. *Scientific Research and Essays*, 6(25), 5427–5434.
- Alizadeh, M. R., Bagheri, I., Payman, M. H. (2007). Evaluation of a rice reaper used for rapeseed harvesting. *American-Eurasian Journal of Agricultural & Environmental Science*, 2(4), 388–397.
- Calle, C. I., Buhler, C. R., Johansen, M. R., Hogue, M. D., Snyder, S. J. (2011). Active dust control and mitigation technology for lunar and Martian exploration. *Acta Astronautica*, 69(11–12), 1082–1088.
- Deb, D., Brahmabhatt, N. L. (2018). Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 82, 3306–3313.
- Fathi, M., Abderrezek, M., Friedrich, M. (2017). Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 19(2), 577–585.
- Furkan, D., Mehmet Emin, M. (2010). Critical factors that affecting efficiency of solar cells. *Smart Grid and Renewable Energy*, 2010.
- Gaier, J. R., Perez-Davis, M. E., Marabito, M. (1991). Aeolian removal of dust types from photovoltaic surfaces on Mars. In *16th Space Simulation Conference: Confirming Spaceworthiness into the Next Millennium* (Vol. 3096, p. 379).
- Grando, M. T., Maletz, E. R., Martins, D., Simas, H., Simoni, R. (2019). Robots for Cleaning Photovoltaic Panels: State of the Art and Future Prospects. *Revista Tecnología y Ciencia*, (35), 137–150.
- Gutierrez, P. H., Dalsted, N. L. (1990). Break-even method of investment analysis. *Farm and Ranch Series. Economics*; No. 3.759.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J. (2013). *Fundamentals of physics*. John Wiley & Sons.
- He, G., Zhou, C., Li, Z. (2011). Review of self-cleaning method for solar cell array. *Procedia Engineering*, 16, 640–645.
- Jaradat, M. A., Tauseef, M., Altaf, Y., Saab, R., Adel, H., Yousuf, N., Zurigat, Y. H. (2015). A fully portable robot system for cleaning solar panels. In *2015 10th International Symposium on Mechatronics and its Applications (ISMA)* (pp. 1–6). IEEE.
- Kampf, R., Majercák, P., Svagr, P. (2016). Application of Break-Even Point Analysis/Primjena Break-Even Point analize. *Nase More*, 63(3), 126.
- Lu, H., Zhao, W. (2018). Effects of particle sizes and tilt angles on dust deposition characteristics of a ground-mounted solar photovoltaic system. *Applied Energy*, 220, 514–526.
- Maghami, M. R., Hizam, H., Gomes, C., Radzi, M. A., Rezadad, M. I., Hajighorbani, S. (2016). Power loss due to soiling on solar panel: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 59, 1307–1316.
- Mani, M., Pillai, R. (2010). Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 14(9), 3124–3131.
- Niu, J. J., Wang, J. N., Xu, Q. F. (2009). Synthesis of superhydrophobic silicon oxide nanowires surface on silicon wafer. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, 9(3), 1819–1824.
- Park, Y.-B., Im, H., Im, M., Choi, Y.-K. (2011). Self-cleaning effect of highly water-repellent microshell structures for solar cell applications. *Journal of Materials Chemistry*, 21(3), 633–636.
- Petronijević, P., Ivanišević, N., Rakočević, M., Arizanović, D. (2012). Methods of calculating depreciation expenses of construction machinery. *Journal of Applied Engineering Science*, 10(1), 43–48.
- Radoi, R., Blejan, M., Ilie, I. (2014). Mechatronic drive system for cleaning machine of photovoltaic panels. *Hidraulica*, (4), 22.
- Sarver, T., Al-Qaraghuli, A., Kazmerski, L. L. (2013). A comprehensive review of the impact of dust on the use of solar energy: History, investigations, results, literature, and mitigation approaches. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 22,

- 698-733.
- Sims, R. A., Biris, A. S., Wilson, J. D., Yurteri, C. U., Mazumder, M. K., Calle, C. I., Buhler, C. R. (2003). Development of a transparent self-cleaning dust shield for solar panels. In *Proceedings ESA-IEEE Joint Meeting on Electrostatics* (Vol. 814).
- Truncyte, D., Daukantiene, V., Gutauskas, M. (2008). The influence of triboelectricity on textile polymer friction parameters. *Fibres and Textiles in Eastern Europe*, (1 (66)), 50-53.
- Zaihidee, F. M., Mekhilef, S., Seyedmahmoudian, M., Horan, B. (2016). Dust as an unalterable deteriorative factor affecting PV panel's efficiency: Why and how. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 65, 1267-1278.
- Zhu, J., Hsu, C.-M., Yu, Z., Fan, S., Cui, Y. (2010). Nanodome solar cells with efficient light management and self-cleaning. *Nano Letters*, 10(6), 1979-1984.