10.22034/jrenew.2025.206117

سال دوازدهم، شماره اول، بهار و تابستان ۱۴۰۴، ص ص 173- 181

فصل‌نامه علمی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو

jrenew.ir

Online ISSN 2676-2994 Print ISSN 2423-4931

مقاله ترویجی

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۳/۰۶

تاریخ پذیرش: ۴۰۳/۰۵/۰۶

سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور: انتخاب اجزا، طراحی، نصب و نگهداری

درسا رازقی جهرمی[۱]، محمدمهدی گردعلی[۲]، اصلان غلامی[۳]، مجید زندی [۴*]

۱- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شریف، تهران، ایران

۲- دانشجوی کارشناسی، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۳- دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

۴- دانشیار، دانشکده مهندسی مکانیک و انرژی، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ایران

* تهران، صندوق پستی ۱۶۵۸۹۵۳۵۷۱، m_zandi@sbu.ac.ir

چکیده

نصب و توسعه پایدار سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور نیازمند شناختی دقیق از اجزای تشکیل‌دهنده آن‌ها، انواع طراحی‌های ممکن برای پیاده‌سازی، اطمینان از عملکرد مناسب آن‌ها از جنبه‌های انرژی، اقتصادی و زیست‌محیطی است. از یک‌سو، این نوع سامانه‌ها به در محیط عملیاتی متفاوتی مستقر می‌باشند. از این‌رو انتخاب اجزای این سامانه‌ها، مراحل طراحی و پیاده‌سازی ساختارهای مختلف آن‌ها چالش‌های خاص خود را دارد و به‌صورت مستقیم یا غیرمستقیم بر تولید توان خروجی، دوام، هزینه و آثار زیست‌محیطی آن‌ها تأثیر می‌گذارد. در حالی که سامانه‌های شناور بر روی سطح منابع آب و مخازن قرار دارند، لزوم بالا بودن کیفیت آب یا شرایط خاص محیطی می‌تواند کاربرد تکنیک‌های مختلف تمیز کردن را محدود کند. از این‌رو در مطالعه حاضر، با مرور پژوهش‌های مرتبط و طرح‌های اجرایی مختلف، یک راهنمای جامع برای انتخاب اجزا، طراحی و نصب سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک به‌صورت شناور، و هم‌چنین شرایط لازم برای نگه‌داری و روش‌های مختلف تمیز کردن این سامانه‌ها ارائه شد. در این پژوهش، با روش تحلیل مفهومی، پژوهش‌های پیشین بررسی و طبقه‌بندی و ارزیابی گردید و نتایج آن برای محققان و تصمیم‌گیران در این زمینه تنظیم شده است.

کلیدواژگان: انرژی خورشیدی، فتوولتاییک، سامانه‌های شناور، سکوی شناور، روش‌های تمیزکاری، زمان‌بندی تمیزکاری.

Floating photovoltaic solar systems: component selection, design, installation, operation, and maintenance

Dorsa Razeghi Jahromi[1], Mohammad Mahdi Gordali[2], Aslan Gholami[3], Majid Zandi [4*]

1- B.Sc., Faculty of Mechanical Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

2- B.Sc., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

3- Ph.D., Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

4- Associate Professor, Faculty of Mechanical and Energy Engineering, Shahid Beheshti University, Tehran, Iran

* P.O.B. 1658953571 Tehran, Iran, m_zandi@sbu.ac.ir

Received: 27 May 2023 Accepted: 27 July 2024

Abstract

For installation and the sustainable development of floating solar photovoltaic systems, it is essential to understand their components and possible designs for implementation. Moreover, their proper performance in terms of energy, economic, and environmental factors should be ensured as well as optimized. These types of systems operate in different environments. As a result, selecting components for these systems, and designing as well as implementing their various structures all have their own challenges that either directly or indirectly influence power output, durability, cost, and environmental impact. Even though floating systems are located on the surface of water sources and reservoirs, different cleaning techniques may not be applicable due to the need for high-quality water or certain environmental conditions. This study, therefore, provides a comprehensive guide to selecting components, designing and installing floating photovoltaic solar systems, as well as the necessary conditions for maintenance and different cleaning methods for these systems, by reviewing related research and various implementation plans. By using content analysis, previous studies in this field were reviewed, classified, and evaluated, and the results were prepared for researchers and decision-makers.

Keywords: Solar energy, Photovoltaic, Floating System, Floating Platform, Cleaning Methods, Cleaning Schedule.

Authors retain the copyright and full publishing rights. This article is an open access article licensed under the Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0)

۱- مقدمه

افزایش مصرف انرژی در کنار چالش‌های تامین پایدار سوخت‌های فسیلی و نگرانی‌های گرمایش جهانی، دولت‌ها را به سمت بهره‌برداری هر چه بیش‌تر از منابع تجدیدپذیر سوق داده است [۱]. افزایش سهم این منابع در ترکیب انرژی جهانی و توسعه آن‌ها برای توسعه پایدار و تامین امنیت انرژی هر کشور ضروری است [۲]. از آن‌جایی که انرژی خورشیدی فراوان و به‌عنوان سوختی بدون هزینه است، این منبع انرژی، توجه گسترده‌ای را از دیرباز به خود جلب کرده است، به‌عنوان مثال المان‌های غیرفعال متعددی هم‌چون سبات‌ها، ایوان و رواق، حیاط‌های مرکزی و بادگیرها در معماری ایرانی برای بهره‌مندی هدفمند از انرژی خورشیدی مورد استفاده قرار گرفته شده است [۳].

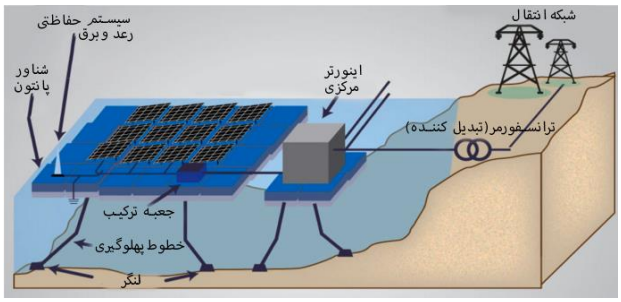
در سال‌های اخیر نیز انواع کاربردهای آن، از جمله استفاده از پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک برای تامین بخشی از انرژی الکتریکی مورد نیاز صنایع، و یا کاربردهای ترکیبی الکتریکی-حرارتی توسط سامانه‌های تولید هم‌زمان با هدف تامین نیاز بخش مسکونی، یا عمومی و تجاری، به شدت توسعه یافته است [۴]. یکی از برجسته‌ترین جنبه‌های بهره‌برداری از این سامانه‌ها سازگاری بالا با محیط‌زیست و انتشار کربن‌دی‌اکسید تقریبا صفر است. چشم‌انداز بلند مدت این سامانه‌ها نیز به دلیل بهبود مداوم کیفیت و کاهش هزینه آن‌ها بسیار امیدوار کننده است [۵].

برای استقرار سامانه‌های فتوولتاییک به مساحت وسیعی از زمین نیاز است. این موضوع اگر چه در برخی از مناطق چندان مهم نمی‌باشد اما می‌تواند تمایل استفاده از این سامانه‌ها را در بسیاری از کشورها کاهش دهد، زیرا زمین‌های مورد نیاز برای نصب سامانه‌های فتوولتاییک ممکن است گران باشند و یا کاربردهای مهم‌تری مثل کشاورزی داشته باشند. در برخی مناطق نیز چالش انرژی به‌صورت هم‌زمان با چالش آب به‌هم گره خورده است و محافظت از ذخایر آبی نیز از اهمیت بسیار بالایی برخوردار است [۶]. به‌عنوان مثال، به دلیل هزینه پایین سوخت‌های فسیلی در کشورهای نفت خیز، ممکن است استفاده از منابع تجدیدپذیر روش ارجح برای تولید انرژی نباشد، اگرچه محدودیت‌های زیست‌محیطی، این کشورها را نیز به سمت استفاده از منابع تجدیدپذیر و به‌ویژه انرژی خورشیدی سوق داده است [۷]. علاوه‌بر این، برای اکثر این کشورها که در مناطق خشک و نیمه خشک قرار دارند، امنیت آب یک اولویت بسیار مهم است [۸]. علاوه‌بر این، دسترسی به سرزمین‌های وسیع برای کشورهای خاورمیانه و شمال آفریقا مشکلی ندارد. برخی از اثرها پیش‌بینی شده تغییرات آب و هوایی در این کشورها، خشکسالی و امواج گرمای تقویت شده است که تبخیر منابع و مخازن آب آزاد را تسریع می‌کنند. بنابراین، اگر بتوان تلفات تبخیر سطحی را کاهش داد، می‌توان آب ذخیره شده در مخازن را بهتر مدیریت کرد. در چنین شرایطی، استفاده از سامانه‌های فتوولتاییک شناور به‌عنوان یکی از راه‌حل‌های پیشنهادی در سال‌های اخیر معرفی شده است. پوشاندن سطح آب با سامانه‌های فتوولتاییک شناور به این کشورها اجازه می دهد تا با کمبود فضا یا چالش‌های آب و انرژی خود مقابله کنند. بسته به سطح پوشش، سامانه‌های فتوولتاییک می‌توانند تبخیر آب را تا ۸۰ درصد کاهش دهند [۹].

از دیگر چالش‌های سامانه‌های خورشیدی افت راندمان آن‌ها در شرایط عملیاتی و با افزایش دمای سلول است. برای حل این چالش نیز راه‌کارهای متعددی هم‌چون خنک‌کاری پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک در پژوهش‌های اخیر معرفی شده است [۱۰]. با این‌وجود این چالش، در سامانه‌های فتوولتاییک شناور با توجه به محیط کارکردی متفاوت به‌شدت کاهش می‌یابد که خود منجر به کاهش تلفات حرارتی و افزایش راندمان نهایی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک می‌شود [۱۱]. چنین مزایایی منجر به حرکت به سمت توسعه هر چه بیش‌تر این سامانه‌ها در سال‌های اخیر شده است. با این وجود، به دلیل تفاوت محیط و شرایط نصب سامانه‌های فتوولتاییک شناور نسبت به نوع مرسوم زمینی، طراحی و ساختار خاص سامانه‌های شناور بر تولید توان خروجی، دوام کار و هزینه سرمایه‌گذاری آن تاثیر می‌گذارد [۱۲]. بنابراین، در پژوهش حاضر با مروری جامع اهم پژوهش‌های انجام شده در این حوزه و سامانه‌های ساخته شده در نقاط مختلف دنیا، ابتدا اجزای اصلی تشکیل‌دهنده سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک به‌همراه فناوری پنل‌های زمینی و وضعیت فعلی پنل‌های شناور به‌صورت خلاصه مورد ارزیابی قرار گرفته شده است. در ادامه، انواع استراتژی‌های مختلف طراحی، ساخت و تعمیر و نگه‌داری از این‌سامانه‌ها نیز به تفصیل تشریح می‌گردد. در پایان با جمع‌بندی انجام شده، چالش‌ها و برخی از شکاف‌های اجرایی و پژوهشی نیز برای پیش‌برد پژوهش‌های آتی معرفی شده است.

۲- فناوری و اجزای اصلی تشکیل‌دهنده

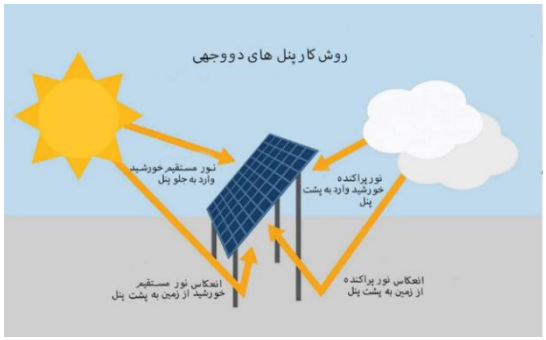
به‌صورت کلی، سامانه‌های فتوولتاییک شناور از اجزای مختلفی تشکیل شده‌اند که مهم‌ترین آن‌ها در شکل ۱ نشان داده شده است. در ادامه به تشریح بیش‌تر این اجزای اصلی و ارتباط آن‌ها با یک‌دیگر پرداخته می‌شود.



شکل ۱ اجزای اصلی یک سامانه خورشیدی فتوولتاییک شناور

۲-۱- پنل‌های فتوولتاییک خورشیدی

بخش اصلی نیروگاه فتوولتاییک شناور، پنل‌های خورشیدی هستند و مانند نیروگاه‌های فتوولتاییک نصب شده روی زمین، در بیش‌تر پروژه‌های حال حاضر جهان از پنل‌های پلی‌کریستال یا مونوکریستال در ساخت آن‌ها استفاده می‌شود [۱۳]. انتخاب نوع پنل در این شرایط تحت تاثیر مواردی هم‌چون فضا، هزینه، میزان رطوبت منطقه، دما و نوع سد می‌تواند متفاوت باشد. در برخی پروژه‌های کوچک‌تر، از پنل‌های فیلم نازک نیز استفاده کرده‌اند اما این نوع پنل‌ها بیش‌تر در مقیاس آزمایشگاهی مورد مطالعه قرار گرفته‌اند [۱۴]. در سال‌های اخیر توجه زیادی به استفاده از پنل‌های دو وجهی شده است و پیش‌بینی می‌شود که سهم این فناوری در بازار به حدود ۷۰ درصد تا سال ۲۰۳۰ برسد [۱۵]. در حالت کلی، در مقایسه با پنل‌های تک‌وجهی، پنل‌های دو وجهی که در جهت شمال و جنوب قرار گرفته‌اند تا ۵۵ درصد تابش خورشید بیش‌تر و پنل‌هایی که در جهت شرقی و غربی قرار گرفته اند تا ۳۳ درصد تابش بیش‌تری دریافت می‌کنند. از مزایای دیگر این نوع پنل‌ها می‌توان به اشغال مساحت کم‌تر و بازدهی بالاتر در مساحت ثابت اشاره کرد (شکل ۲). از آن‌جا که پنل‌های شناور به‌طور عمومی در زاویه‌ای کم‌تر و نزدیک آب نصب می‌شوند، در این روش نصب، رسیدن نور به پشت پنل سخت‌تر می‌شود. بنابراین برای بهره‌برداری از پنل‌های دو وجهی، پیشنهاد شده است که آینه‌هایی زیر پنل‌های شناور قرار داده شود [۱۶].



شکل ۲ طرزکار پنل‌های دووجهی

۲-۲- مبدل الکترونیک قدرت مستقیم به متناوب

توان مستقیم تولید شده توسط پنل‌ها از طریق یک سری جعبه ترکیبی[1] به مبدل الکترونیک قدرت مستقیم به متناوب با اینورتر منتقل می‌شود تا به توان متناوب تبدیل شود. بسته به مقیاس و فاصله از خشکی، اینورترها را می‌توان روی یک سکوی شناور جداگانه یا در خشکی قرار داد. به‌طور معمول برای سامانه‌های فتوولتاییک شناور با ظرفیت کم‌تر، اینورتر می‌تواند در خشکی قرار گیرد. برای نیروگاه‌هایی با ظرفیت بالا بهتر است اینورتر روی یک سکوی شناور جداگانه قرار گیرد تا از تلفات اهمی کاسته شود [۱۷].

۲-۳- کابل‌ها و اتصال‌ها

برق تولید شده توسط پنل‌ها به شبکه یا به باطری منتقل می‌شوند و این کار توسط کابل‌ها و اتصال‌ها صورت می‌گیرد. در اکثر پروژه‌های انجام شده، کابلی از زیر آب کشیده نشده است اما باید کابل‌هایی که استفاده می‌شوند ضد آب و به دمای بالا مقاوم باشند. این کابل‌ها باید قادر باشند که در مسافت زیاد و قابل اطمینان کار کنند [۱۷].

۲-۴- سکوی شناور

این بخش مهم‌ترین اجزای سامانه فتوولتاییک شناور و یکی از اصلی‌ترین وجه‌های تمایز طراحی و اجرایی این سامانه‌ها نسبت به سامانه‌های زمینی است که از تمام اجزای لازم مانند پنل‌ها در طول کل پروژه پشتیبانی می‌کند. از این‌رو، مناسب بودن جنس این سکو ضروری است. ساختار شناور به‌طور معمول از پلاستیک فیبری تقویت شده، پلی‌اتیلن متراکم یا با چگالی بالا و یا سازه‌های فلزی ساخته می‌شود [۱۷]. کل این سازه با کمک سامانه‌های لنگرگیری و پهلوگیری به منظور ثابت‌سازی شناور می‌شود (شکل ۱). پلی‌اتیلن متراکم رایج‌ترین جنس استفاده شده در بیش‌تر نیروگاه‌ها است. مواد دیگری مانند پلاسیتک فیبری تقویت شده یا سیم سیمان[2] نیز برای سکوهای شناور استفاده شده است [۱۷].

۳- مراحل طراحی سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور

سامانه‌های فتوولتاییک شناور نسبت به سامانه‌های زمینی، یک فناوری نو ظهورتر است، بنابراین توسعه دستورالعملی برای طراحی و اجرای این سامانه‌ها می‌تواند به طراحان این نوع نیروگاه‌ها کمک زیادی کند. محیط متفاوت این سامانه‌ها به تبع، ساختار طراحی و نصب متفاوتی را نیز به دنبال خواهد داشت. به‌عنوان مثال، برای طراحی سامانه‌های شناور باید نکاتی از قبیل متغیر بودن ارتفاع سطح آب و نوع ساختار سکوی شناور را نیز در نظر گرفت، که در سامانه‌های زمینی، این چالش‌ها وجود ندارند.

بررسی مطالعه‌ها و گزارش‌های منتشر شده، حاکی از آن است که حداقل عمق آب نباید کم‌تر از یک مقدار مناسب برای نصب و عملکرد روان پنل‌های فتوولتاییک شناور باشد. چنین محدودتی به‌ویژه هنگامی که سامانه شناور در مخزن پشت سد نصب شده است و سد در حال استفاده است و به مرور خالی می‌شود و یا در زمان‌هایی که تبخیر بالای آب و خطر خشک‌شدن فصلی مخزن وجود دارد، بسیار با اهمیت است. در این شرایط، خطر برخورد پنل‌ها با زمین و آسیب دیدنشان وجود دارد. بنابراین باید بتوان فناوری شناور را به شکلی پیاده‌سازی کرد که در هنگام خالی شدن سد، پنل‌ها آسیب نبینند.

طراحی یک سامانه به صورت جهانی، کار دشواری است. زیرا هندسه داخلی مخازن و شرایط محیطی در مناطق مختلف بسیار متفاوت می‌باشد و محدودیت‌های خاص خود را دارد [۱۱]. با این‌وجود، در پژوهش حاضر، با مرور پژوهش‌های انجام شده در این زمینه اهم محدودیت‌ها و مراحل اصلی و اولیه پیش‌طراحی و طراحی سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور مشخص شده است. در ادامه به‌طور مختصر به این مراحل اشاره می‌شود.

۳-۱- مراحل پیش‌طراحی و پتانسیل‌سنجی

همانند سامانه‌های خورشیدی زمینی، پتانسیل‌سنجی و امکان‌سنجی نصب سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور از جمله اولین اقدام‌های لازم برای طراحی است که متاثر از عوامل متعددی فنی، زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی است [۱۸,۱۹].

۳-۱-۱- ارزیابی مکان اولیه

برای این منظور انواع روش‌های ارزیابی و پتانسیل‌سنجی در پژوهش‌های پیشین اشاره شده است که در تمامی موارد، ارزیابی اولیه مکان باید صورت بگیرد تا امکان نصب سامانه‌های فتوولتاییک شناور در آن مکان بررسی شود. این بررسی شامل قدم‌های زیر است [۱۷].

۳-۱-۱-۱- ارزیابی منطقه‌ای و جغرافیایی

ابتدایی‌ترین کار برای پتانسیل‌سنجی بررسی شرایط فنی محل است که این کار از طریق انواع نرم‌افزارهای ارزیابی امکان‌پذیر است. استفاده از مدل‌های و مسیرهای مختلف هم‌چون، سامانه اطلاعات جغرافیایی، مانند ArcGIS Pro و QGIS 3 بسیار رایج است [۲۰,۲۱]، که می‌توانند با توجه به پایگاه‌های داده‌ای و آنالیز داده‌های مربوط به سطح آب و تغیرات فصلی منطقه مورد نظر در سال‌های گذشته، یک تخمین منطقی از شرایط را ارائه دهند [۱۷].

۳-۱-۱-۲- ارزیابی میدانی

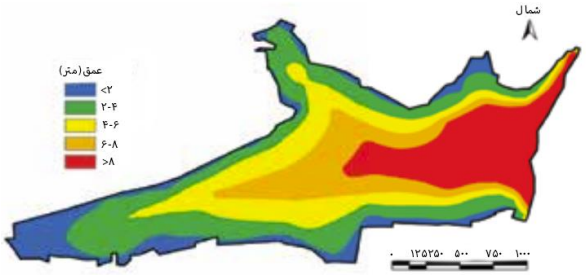
علاوه‌بر شبیه‌سازی و پتانسیل‌سنجی اولیه، یک بازدید اولیه از مکان نیز برای طراحی نیاز است تا موقعیت و شرایط زمین (سطح آب، دسترسی به موقعیت و محیط اطراف) به درستی درک شود. این کار به انتخاب محیط مناسب برای نصب فتوولتاییک‌های شناور بسیار کمک می‌کند. در برخی موارد، نیز مدل‌های ترکیبی پتانسیل‌سنجی، برای افزایش دقت و با بهره همزمان از اطلاعات دریافتی از پایگاه‌های داده‌ای و نیز داده‌های اندازه‌گیری شده میدانی استفاده می‌شوند [۲۲–۲۵].

۳-۱-۲- عمق‌سنجی ، هیدروگرافی و تست خاک

1. Combiner Box

2. Ferro-cement

بعد از ارزیابی اولیه، نیاز به مطالعه‌های تکمیلی عمق‌سنجی، هیدروگرافی و تست خاک است. عمق‌سنجی[1] در زمینه طراحی نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور، یک روش برای تخمین عمق آب و درک بهتر جغرافیای زیر آب است. هیدروگرافی[2]، اطلاعات و ویژگی‌های خاصی مانند موقعیت دقیق و موقعیت تپه‌های آن مخزن ارائه می‌دهد. این بررسی‌ها برای درک بهتر سطح زیر آب انجام می‌شوند و ناهمواری‌هایی مثل تخته سنگ‌ها و موانع این چنینی را شناسایی می‌کنند. از جمله این نرم‌افزارها می‌توان به HYPACK اشاره کرد. بررسی‌های عمق‌سنجی و هیدروگرافی که به‌طور تقریبی بین ۷ تا ۱۵ روز طول می‌کشد، شامل استفاده از ابزار و روش‌های دقیق است و اطلاعاتی را در مورد بستر آب در قالب یک نقشه کانتور شامل جزئیات مربوط به عمق بستر آب با اشاره به سطح مبدأ ارائه می‌دهد. نقشه کانتور، همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شده است، یک عامل تعیین کننده در شناسایی بهترین مکان‌های لنگر و پهلوگیری، نیازهای خاکبرداری و غیره است [۱۷].



شکل ۳ نمونه‌ای از عمق‌سنجی

نادیده گرفتن شرایط زیر آب و نتایج مطالعه‌های عمق‌سنجی می‌تواند منجر به در نظر نگرفتن محدودیت‌های مربوط به حداقل عمق قابل قبول برای نصب سامانه‌های خورشیدی شناور شود. این حداقل عمق متناسب با ساختار شناور و طراحی انجام شده می‌تواند متفاوت باشد. با این وجود، حداقل عمق مورد نیاز برای عملکرد مناسب سامانه‌های فوتوولتائیک شناور را می‌توان ۲ m در نظر گرفت [۱۶].

۳-۱-۳- ارزیابی تاثیرهای محیطی و اجتماعی

آثار بلند مدت اجرا و نصب سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور با توجه به نوظهور بودن آن‌ها، در بلند مدت هنوز کامل مشخص نیست. سامانه‌های فتوولتاییک شناور اجزای زیادی دارند که همواره با آب در ارتباط هستند. مخازن آبی ممکن است کاربردهای اجتماعی مانند ماهی‌گیری، کشاورزی، آشامیدنی داشته باشند که متغیرهای آب مانند اکسیژن محلول و غلظت جلبک‌ها نیز به دلیل پوشش این سامانه‌ها ممکن است تحت تأثیر قرار گیرند.

سامانه‌های شناور هم‌چنین می‌تواند بر متغیرهای دیگری مانند میزان اسیدی بودن آب[3]، قلیاییت[4] و مواد مغذی تأثیر گذارد، پس نیاز است یک ارزیابی دقیق از اثرات اجرای این طرح‌ها در بلند مدت و در مکان‌های مختلف صورت گیرد [۱۱]. البته استفاده از این سامانه‌ها با توجه به تاثیر در کاهش میزان تبخیر آب از سطح تا ۳۰ درصد و نیز افزایش جلوگیری از انتشار گازهای گلخانه‌ای تا ۱۸/۸ درصد بیش‌تر نسبت به سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک زمینی نیز از آثار زیست محیطی مثبت اجرای این طرح‌ها هست.

۳-۲- طراحی فنی اصلی مربوط به پروژه

پس از مطالعه‌های مربوط به فاز پیش‌طراحی، طراحی فنی و اصلی مربوط به پروژه انجام می‌گیرد. برای انجام طراحی دقیق، نیاز به دریافت اطلاعات متعددی است، که مهم‌ترین آن‌ها در ادامه آورده شده‌اند.

۳-۲-۱- اطلاعات هواشناسی

این اطلاعات برای درک بهتر منابع محلی و پارامترهای موثر بر رفتار پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک نیاز است. اهم این پارامترها به ترتیب اهمیت بر خروجی پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک شامل میزان تابش خورشیدی [۲۶]، دما [۲۷]، میزان گرد و غبار [۲۸]، سرعت و جهت باد [۲۹]، رطوبت و باران [۳۰]، و میزان ریز گردها و گرد و غبار می‌باشند. در فاز پیش طراحی این داده‌ها به صورت عمومی از پایگاه‌های داده‌ای استخراج می‌شوند اما در فاز طراحی، این داده‌ها می‌بایست علاوه‌بر پایگاه‌های داده‌ای با استفاده از اطلاعات دریافتی از ایستگاه‌های هواشناسی زمینی و نیز اندازه‌گیری‌های محلی اعتبارسنجی و تایید شوند و در صورت لزوم، به‌روز رسانی شوند.

۳-۲-۲- اطلاعات کیفیت آب

این اطلاعات برای انتخاب مواد مناسب لنگر و ثابت‌سازی سکوهای شناور، کابل‌ها و درک آثار بلند مدت آب روی سازه‌ها بسیار مهم هستند و باید شامل مواردی مثل خواص فیزیکی و شیمیایی، میزان اسیدی و قلیایی بودن، میزان و انواع نمک‌های محلول، اکسیژن موجود در آب و دمای آن باشد [۱۷].

۳-۲-۳- طراحی ساختار کلی نصب پنل‌های شناور

متناسب با اطلاعات دریافت شده، ساختارهای مختلفی برای یک سامانه خورشیدی فتوولتاییک شناور می‌توان در نظر گرفت. مرور پژوهش‌های انجام شده حاکی از آن است که برای طراحی یک سامانه فتوولتاییک شناور سه ساختار اصلی ارائه شده است [۳۱]. از جمله فاکتورهای مهم در انتخاب نوع ساختار، میزان قیمت، میزان آلوده کردن آب و آثار محیطی، داشتن قابلیت تطبیق سیستم با شرایط محلی، سادگی ثابت‌سازی و لنگر اندازی است [۱۱].

۳-۲-۳-۱- ساختار اول

این نوع ساختار از لوله‌های شناور پلی‌اتیلن با چگالی بالا و ترکیب آنان با ساختارهای آلمینیومی یا فلزی برای نگه داشتن پنل‌ها در زاویه مناسب ساخته شده‌اند. نصب ساختار نوع اول راحت است و شناوری و تعادل بالایی را ارائه می‌دهد. اما سطح کم‌تری از آب را پوشش می‌دهد و در نتیجه کاهش تبخیر آب نیز کم‌تر می‌شود. سطح تماس بین آب و لوله‌ها در این حالت به‌طور معمول فقط ۲۰ درصد از مساحت کل نیروگاه است.

۳-۲-۳-۲- ساختار دوم

این نوع طراحی به‌طور مستقیم پنل‌ها را نگه می‌دارد. کل سامانه به‌صورت ماژولار ساخته شده و قابلیت اتصال یک ساختار گسترده با پیچ و مهره را دارد. به‌طور معمول در هر واحد از این سامانه یک سکوی اولیه و یک سکوی ثانویه وجود دارد. اصلی‌ترین کاربرد سکوی ثانویه فراهم کردن یک راهرو شناور اضافی است. هم‌چنین شناور از فوم پلی‌استر پر می‌شود که خطر غرق شدن سامانه را در صورت آسیب دیدن کاهش می‌دهد.

۳-۲-۳-۳- ساختار سوم

1. Bathymetry
2. Hydrography
3. pH
4. Alkalinity

نوع سوم راه‌حلی برای معایب ساختار شناور دوم ارائه می‌دهد. در این ساختار، با پیشرفت در طراحی، ساختارها بسیار بزرگ که بسیار قوی هستند و قادر به پشتیبانی از چندین پنل می‌باشند. این نوع در اصل پانتون‌های شناوری هستند که به هم متصل شده‌اند و یک سازه بزرگ واحد را تشکیل داده‌اند.

۳-۲-۴- انتخاب اجزای اصلی سامانه

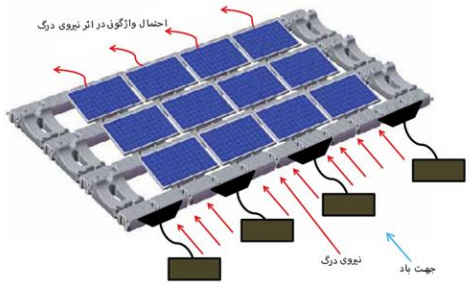
پس از مشخص شدن ساختار اصلی شناورها و متناسب با داده‌های مربوط به فاز طراحی و پیش‌طراحی، اجزای اصلی سامانه انتخاب و طراحی می‌شوند. انتخاب اجزایی مانند پنل‌های خورشیدی، اینورترها و کابل‌ها و اتصال‌ها در این بخش، به‌صورت کلی مشابه طراحی و انتخاب اجزا برای سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک زمینی است. برای فراهم کردن فضای پیاده عملیات و جلوگیری از سایه‌اندازی، اندازه پنل‌های شناور با در نظر گرفتن فاصله بین قاب‌ها محاسبه می‌شود و مسیرهای دسترسی حداقل ۰/۵ m توصیه می‌شود [۱۶].

۳-۳- شبیه‌سازی و ارزیابی سامانه طراحی شده

برای این منظور، با استفاده از نرم افزارهای شبیه‌سازی متعددی مانند PVsyst، PVsol، RETScreen، Helioscope، ANSYS، OrcaFlex و سایر نرم‌افزارهای رایج در این زمینه می‌توان برای طراحی سازه، زاویه نصب پنل‌ها، طراحی سامانه پهلوگیری، محل و ابعاد اینورترها، ظرفیت نیروگاه و تخمین انرژی تولیدی و عملکرد کوتاه مدت و بلندمدت نیروگاه در شرایط مختلف استفاده کرد [۳۲]. به‌عنوان مثال جهت و سرعت باد غالب می‌تواند نقش قابل توجهی در نیروی درگی[1] که بر پنل وارد می‌شود داشته باشد و اگر زاویه نصب و قرارگیری پنل و سازه به درستی انتخاب نشود، می‌تواند منجر به واژگونی و یا تخریب سامانه و تحمیل خسارت زیادی به آن شود (جدول ۱) (شکل۴). اثر متقابل سرعت باد و سایر پارامترهای محیطی شامل، دمای هوا، میزان تابش، رطوبت هوا، میزان گرد و غبار در مطالعه جامعی توسط غلامی و همکاران بررسی و روابط نیمه‌تجربی مربوط به چهار سال داده برداری، برای تخمین آثار این پارامترها ارائه شده است [۳۳–۳۸].

جدول ۱ زاویه شیب پیشنهادی برای پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور با توجه به سرعت باد غالب در منطقه.

زاویه	میانگین سرعت باد ($m.s^{-1}$)
۵	۳۵<
۱۰	۲۵-۳۵
۱۵	۲۵>



شکل۴ شماتیک نیروی درگ وارد بر پنل‌های شناور

به‌عنوان یک مثال موردی از مسیر طراحی اشاره شده می‌توان به پتانسیل‌سنجی فنی برای نصب سامانه فتوولتاییک شناور در سد راجگهات هند اشاره کرد [۳۹]، که در آن طراحی بر اساس خشک‌ترین ماه سال که در آن آب در عمق کافی در دسترس است و با در نظر گرفتن محدودیت‌های توپوگرافی و محیطی (بدترین شرایط طراحی) تخمین زده شد. برای ارزیابی تولید انرژی، طرح در نرم‌افزار PVsyst و برای تخمین پتانسیل جغرافیایی، مساحت سطح موجود در اتوکد با استفاده از پنل‌های ۳۵۰Wp با راندمان ۱۷/۷٪ مدل‌سازی شد. هم‌چنین ملاحظاتی برای توسعه زیرساخت‌های دیگر در سطح آب مانند قایق، اسکله در نظر گرفته شد. در طرح نهایی با سطح پوشش ۲۵٪ از کل مساحت آب پشت سد، تنها ۱۴/۲۵٪ به سامانه خورشیدی اختصاص داده شد و ۱۰/۷۵٪ مساحت باقیمانده برای زیرساخت لازم تعمیر و نگهداری و فاصله لازم برای جلوگیری از سایه‌اندازی در نظر گرفته شد.

۴- نصب و راه‌اندازی سامانه خورشیدی فتوولتاییک شناور

بر خلاف سامانه‌های زمینی، سامانه‌های شناور نصب آسان‌تری دارند و به ساخت سازه‌های سنگین نیاز ندارند [۴۴]. در چنین شرایطی، اولین گام آماده‌سازی محل است که می‌تواند شامل کارهای عمرانی برای هم‌سطح‌سازی، حفاری برای نصب و اجرای سامانه لنگراندازی و پهلوگیری، ساخت سکو برای رهاسازی سکوی شناور به سطح آب و ساخت محل قرارگیری اینورترها باشد. بعد از آماده‌سازی محل، نصب اجزای مختلف شروع می‌شود.

در این مرحله ابتدا سکوهای شناور به هم‌دیگر وصل می‌شوند، پنل‌ها روی سکوها قرار می‌گیرند و کابل‌ها و اینورترهای مربوطه وصل می‌شوند. برای کاهش آثار منفی زیست‌محیطی، قبل از نصب و راه‌اندازی نیروگاه نیاز است که نکاتی در نظر گرفته شوند [۱۷]. در طول نصب و راه‌اندازی، تمامی وسایل استفاده شده در سکوهای شناور باید در برابر اشعه فرابنفش مقاوم باشند و حداقل کارایی ۲۵ سال را داشته باشند. هم‌چنین مواد استفاده شده در این سکوها باید از لحاظ شیمیایی به اسید، بنزین و مواد معدنی مقاوم باشند و نباید در هیچ شرایطی باعث آلودگی آب شوند. سکوهای شناور باید طوری طراحی شوند که فرایند تبادل شیمیایی هوا و آب را محدود نکنند. به‌همین علت است که باید اندازه مناسبی باید برای آن‌ها در نظر گرفته شود. سامانه پهلوگیری باید طوری طراحی شود که تغیرات سطح آب را تحمل کند. پنل‌ها، سکوها و سامانه‌های پهلوگیری باید با در نظر گرفتن بدترین شرایط طراحی شوند و قادر به تحمل دمای هوا در حداقل بازه منفی ۱۰ تا ۵۰ درجه سانتی‌گراد باشند. هم‌چنین سکوی شناور باید در انتهای عمر مفیدش قابل بازیافت باشد. تمامی کابل‌ها و اتصالات استفاده شده در نیروگاه نیز باید مطابق استاندارد تحمل شرایط سخت آب و هوایی تا ۲۵ سال را داشته باشند. با وجود پژوهش‌های تجربی محدود بر سامانه‌های شناور، آثار بلندمدت زیست‌محیطی نصب و راه‌اندازی آن‌ها نیازمند مطالعه بیش‌تر است [۴۰].

۵- ارزیابی عملکرد، تعمیر و نگهداری سامانه‌های فتوولتاییک شناور

پس از نصب و راه‌اندازی سامانه فتوولتاییک شناور نیز مانند زمینی، عملکرد آن‌ها باید مورد رصد و ارزیابی قرار گیرد و در صورت لزوم برای جلوگیری از کاهش عملکرد و یا بهبود آن، اقدام‌های لازم تعمیر و نگهداری انجام گیرد. برای ارزیابی عملکرد سامانه‌های فتوولتاییک، نسبت عملکرد[2] از رایج‌ترین معیارها است. ارزیابی‌ها نشان می‌دهند که فناوری‌های کریستالی عملکرد ضعیف‌تری روی سطح آب دارند. از طرفی دیگر، فناوری فیلم نازک مثل CdTe عملکرد

1. Drag Force

2. Performance Ratio

بهتری روی سطح آب نسبت به زمین داشته است [۴۱]. علت این رفتار آن است که پنل‌های سیلیکون کریستالی به‌طور عمده تحت نور مرئی و فروسرخ فعالیت می‌کنند، در حالی‌که پنل‌های فیلم نازک، به‌طور عمومی در طیف نور مرئی فعال هستند. بنابراین، در سامانه‌های شناور که محیط مرطوب‌تر است، رطوبت بالا با جلوگیری از رسیدن نور فروسرخ به پنل سیلیکون کریستالی موجب عملکرد ضعیف‌تر آن می‌شود [۴۲].

تجمع گرد و غبار نیز تأثیر منفی قابل‌توجهی بر عملکرد پنل‌های خورشیدی دارد [۴۳]. در مناطق خشک که تابش مطلوبی نیز دارند، گرد و غبار فراگیر، طوفان شن و باران ناکافی باعث رسوب گرد و غبار روی سطح پنل می‌شود، که همگی بر عملکرد پنل تأثیر می‌گذارند [۴۴]. در بسیاری از موارد، رسوب گرد و غبار بر روی سطح پنل در مدت کوتاهی منجر به کاهش ضریب عبور نور و تلفات خروجی پنل بین ۲۵ الی ۳۵ درصد می‌شود [۴۵–۴۷]. حتی ممکن است با ایجاد نقاط داغ به پنل‌ها نیز آسیب جدی برساند و باعث کاهش طول عمر سامانه شود [۴۸]. برای کاهش آثار نامطلوب کثیفی، تکنیک‌های زیادی بر پایه آب و بدون آب برای تمیز کردن سطح پنل‌ها وجود دارد [۴۹]. اگرچه مطالعه‌های زیادی برای تمیزکاری سامانه‌های زمینی وجود دارد، اما در ارتباط با سامانه‌های شناور پژوهش‌ها بسیار محدود است.

۵-۱- انواع روش‌های تمیزکاری پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک

به‌صورت کلی، دو تکنیک مبتنی بر آب و بدون استفاده از آب برای تمیزکاری سطح پنل‌های خورشیدی فتوولتاییک مورد استفاده قرار می‌گیرد.

۵-۱-۱- تکنیک‌های بر پایه آب

اولین روش برای تمیز کردن یک سامانه فتوولتاییک در سطح یک مخزن آب، رویکرد مبتنی بر آب است. شیب پنل‌ها در سامانه‌های شناور کم‌تر از زمینی است. بنابراین، گرد و غبار تمایل بیش‌تری دارد که روی آن‌ها بنشیند و میزان کثیفی این سامانه‌ها بیش‌تر از مدل زمینی است. در صورت استفاده از آب، برای جلوگیری از شوک حرارتی، بهتر است دمای سیال تمیزکننده نزدیک به دمای سطح پنل‌ها باشد [۴۹]. بسیاری از سامانه‌های شناور روی سطح آب شیرین هستند. در نتیجه دمای سطح پنل و آب به‌خصوص در صبح نزدیک است. از این آب می‌توان به سادگی برای تمیز کردن استفاده کرد. همچنین با توجه به برگشت آب مصرفی به مخزن، تلفات آب در حین پاکسازی به‌خصوص در صبح و شب بسیار کم است [۵۰].

۵-۱-۱-۱- بارندگی

بارندگی می‌تواند به‌عنوان یک عامل طبیعی و مبتنی بر آب، در نظر گرفته شود. چالش اصلی این روش تمیزکاری آن است که به‌طور دقیق قابل پیش‌بینی نیست و ممکن است در زمان نیاز و وجود گرد و غبار بارشی رخ ندهد. علاوه‌بر این، بارندگی نمی‌تواند خاک انباشته شده را به‌طور کامل حذف کند و حتی ممکن است لکه‌هایی را نیز از خود به‌جای گذارد، که در چنین شرایطی یک مرحله شستشوی دستی هم لازم است [۵۱].

۵-۱-۱-۲- شست و شوی دستی

مهم‌ترین دلیل استفاده از نظافت دستی، سادگی کاربرد آن است. اما نیروی انسانی شاغل در این کار به دلیل خطرات و نیاز به انتخاب مواد مناسب، باید حرفه‌ای باشند [۵۰]. طیف گسترده‌ای از دستگاه‌های متنوع برای کمک به تمیز کردن دستی در دسترس است [۵۲].

۵-۱-۱-۳- شست و شوی با پاشش خودکار آب

استفاده از اسپرینکلرها برای پاشش خودکار آب، روشی مبتنی بر آب است که اگر چه در برخی موارد از این روش استفاده شده است، اما روشی بهینه برای تمیزکاری نمی‌باشد. در این روش، کل سطح پنل‌ها را اسپری می‌شود و هدر رفت آب و تبخیر سطحی قابل توجهی دارد. البته در برخی موارد با استفاده از سامانه‌های برگشت و بازیافت آب می‌توان بخشی از آب استفاده شده را جبران کرد که خود هزینه استفاده از این روش را بالا می‌برد. این روش بیش‌تر در فاز مطالعاتی و در مقیاس آزمایشگاهی مطالعه شده است [۵۳].

۵-۱-۱-۴- استفاده از ربات‌های تمیزکاری

تکنیک‌های رباتیک را می‌توان به‌صورت مبتنی بر آب یا بدون آب طبقه‌بندی کرد. این روش‌ها در سامانه‌های خورشیدی فتوولتایک زمینی بسیار رایج است اما در سامانه‌های شناور، هزینه نگهداری بالایی دارند، اگرچه می‌توانند هدر رفت آب را کاهش دهند. در سامانه‌های خورشیدی شناور، استفاده از ربات‌ها تحت تاثیر نیروی شناوری و امواج منظم و نامنظم وارد بر پنل‌ها، ممکن است احتمال آسیب‌دیدگی به سطح پنل را افزایش دهد [۵۴].

۵-۱-۲- تکنیک‌های بدون آب

برخی از سامانه‌های فتوولتاییک شناور بر روی مخازن آب غیر شیرین شناور هستند. از این‌رو استفاده از آب موجود در مخزن، برای تمیزکاری ممکن نخواهد بود. از طرفی دیگر، یکی از جذابیت‌های استفاده از سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور، اثر آن‌ها در کاهش نرخ تبخیر در مناطقی با محدودیت منابع آبی است. تکنیک‌های بدون آب می‌توانند، در چنین شرایطی می‌توانند برای حل چالش حذف گرد و غبار میسر باشند [۵۰].

۵-۱-۲-۱- وزش باد و جریان هوا

وزش باد و جریان هوا، در عین حال که می‌تواند خود عامل انتقال ذرات گرد و غبار به سایت و نشستن آن‌ها بر سطح پنل‌ها باشد، می‌تواند در حذف گرد و غبار از سطح پنل‌ها نیز نقش داشته باشد. سرعت و جهت باد غالب در این شرایط بسیار تاثیرگذار است و بر میزان نشست و اندازه ذرات گرد و غبار و یا میزان حذف آن‌ها از سطح اثر می‌گذارد [۲۵]. هم‌چنین بادهای با سرعت بالا ممکن است در صورت حمل ذرات گرد و غبار، سطح پنل را خراشیده و در نتیجه کارایی سامانه را کاهش دهند [۵۰]. هم‌چنین وزش باد، ممکن است سازه نصب پنل را نیز تحت تاثیر قرار دهد، و برای این موضوع راه‌کارهای مختلفی در نظر گرفته می‌شود. به‌عنوان مثال، نصب بادشکن می‌تواند فشار روی پنل‌ها را ۵۰ تا ۶۸ درصد کاهش دهد [۵۵]. وزش باد نیز مانند بارش باران، قابلیت اطمینان کافی را ندارد و خود می‌تواند چالش تلقی شود.

۵-۱-۲-۲- استفاده از مکانیزم‌های ارتعاش پنل

اگرچه در این روش، برای راه‌اندازی سامانه ارتعاشی به صورت دوره‌ای، باید انرژی مصرف شود اما مقدار انرژی مصرفی برای استفاده در سامانه‌های فتوولتاییک شناور امکان‌پذیر است [۵۰]. به‌عنوان مثال، در پژوهش [۵۶] یک ویبراتور و برف پاک‌کن پیزوالکتریک خطی برای تمیز کردن یک لایه خاک از روی پنل استفاده شد و نتایج نشان داد که سیستم ارتعاشی در طول ۱۵ ثانیه کارکرد ۳۲ وات برق مصرف کرد. به‌علت وجود سامانه‌های اضافی تمیزکاری، هزینه‌ها و چالش‌های تعمیر و نگهداری مربوط به این روش وجود دارد.

۵-۱-۲-۳- استفاده از نانوپوشش‌های خودتمیزشونده

یکی از اصلی‌ترین روش‌های توسعه یافته برای کاهش مشکل گرد و غبار، استفاده از نانوپوشش‌های خودتمیزشونده به‌صورت آب‌دوست و یا به‌صورت آب‌گریز است. اگرچه در حالت کلی در این روش‌ها، برای حذف گرد و غبار از سطح به آب نیاز است، حتی در سامانه‌های زمینی و در محیط‌های با رطوبت بسیار پایین نیز، استفاده از نانوپوشش‌ها تا حد قابل توجهی از چسبیدن ذرات گرد و غبار به سطح پنل جلوگیری می‌کند [۳۴]. با این‌وجود، در محیط‌هایی با میزان رطوبت بالاتر، این روش بسیار کارا می‌باشد و بدون نیاز به هزینه تعمیر و نگهداری، به راحتی می‌تواند به کمک رطوبت موجود در هوا و شبنم صبحگاهی گرد و غبار را حذف کند [۵۷،۵۸]. علاوه‌بر این، سطوح پوشش می‌توانند ویژگی‌های دیگری مانند خواص ضد یخی، پایداری در اثر بارندگی شدید، ضد انعکاسی، فوتوکاتالیستی و ضد مه‌ای را فراهم کنند [۵۰].

۵-۱-۲-۴- استفاده از صفحه نمایش الکترودینامیکی

یک صفحه نمایش الکترودینامیکی از نیروی الکترودینامیک تولید شده توسط الکترودهای موازی برای تمیز کردن سامانه‌های فتوولتاییک شناور استفاده می‌کند. یک ولتاژ تک فاز یا چند فاز به الکترودها اعمال می‌شود تا موجی ایجاد شود. چنین امواجی یک میدان الکتریکی ایجاد و نیروی عمودی حاصل از این میدان می‌تواند ذرات باردار را بلند کرده و آن‌ها را به لبه صفحه ببرد. برای یک سطح صاف، این روش می‌تواند بیش از ۹۰ درصد از خاک رسوب کرده را در طی دو دقیقه حذف کند.

۵-۲- بازه تمیزکاری

دوره تناوب بهینه تمیز کردن اقتصادی و عملکردی به شرایط محیطی محل نصب مانند میزان بارندگی و رطوبت، سرعت باد، نوع ذره‌ها، منبع ذره‌ها و میزان کثیفی بستگی دارد [۵۹]. برخی از بازه‌های تمیزکاری در پژوهش‌های پیشین[۵۰]، در مناطق مختلف به‌طور خلاصه در جدول۲ آورده شده است.

جدول۲ دوره زمانی تمیزکردن پنل‌ها در مناطق مختلف

منطقه	بازه تمیزکاری
مناطق کویری [۶۰]	۲۰ روز
منطقه مینیا، وسط مصر[۶۱]	هفتگی
منطقه منا [۶۲]	۱۵-۱۲ روز
منطقه مینیا، وسط مصر [۶۱]	هفتگی
اردن[۶۲]	۱۴ روز
ایران [۶۳]	حد نصاب ۳ گرم بر متر مربع

۵-۳- ارزیابی اقتصادی تمیزکاری

هزینه تمیز کردن سامانه‌های فتوولتاییک خورشیدی به دفعات تمیز کردن در یک دوره خاص، روش تمیزکاری، نوع و میزان آلودگی موجود در سایت بستگی دارد. به‌عنوان مثال، در لس‌آنجلس، ایالات متحده، تمیز کردن دستی دو بار در طول دوره تابستان خشک (بدون بارش باران در طول دوره)، کل هزینه یک سامانه خورشیدی فتوولتاییک را به میزان $15\ \$.kW^{-1}$ افزایش می‌دهد[۶۴]. در عربستان سعودی، پنل‌های خورشیدی را می‌توان با استفاده از روش‌های تمیز کردن دستی با هزینه‌ای در حدود $3/68\ \$.kW^{-1}$ در سال و با استفاده از تمیز کردن توسط ماشین‌های تمیزکاری با هزینه‌ای در حدود $1/5\ \$.kW^{-1}$ در سال تمیز کرد [۶۵]. استفاده از نانوپوشش‌ها نیز چالش‌های مربوط به گرد و غبار و هزینه تمیز کردن را $20/94\ \$.MW^{-1}$ در سال کاهش می‌دهد [۶۶]. هزینه‌های تمیزکاری در مناطق مختلف به‌طور خلاصه در جدول۳ آورده شده است.

جدول۳ میزان هزینه تمیزکاری در مناطق مختلف

منطقه	روش مورد مطالعه	میزان هزینه $(\$.(kW.y)^{-1})$
عربستان صعودی [۶۸]	دستی	۳/۶۸
	ماشین‌های شستشو	۱/۵
کشورهای منا [۶۶]	نانو پوشش	۲۰/۹۴
اردن [۶۹]	دستی	۷۷/۳۸
مناطق کویری [۶۷]	میانگین	۲۱/۰۷

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

در این پژوهش، ضمن مرور اصلی‌ترین پژوهش‌های انجام شده در ارتباط با نیروگاه‌های فتوولتاییک شناور، به بررسی فناوری‌های رایج مورد استفاده برای این نیروگاه‌ها، اجزای اصلی تشکیل‌دهنده آن‌ها، روش طراحی و اجرای این سامانه‌ها بررسی و دسته‌بندی شده است. بررسی‌ها نشان داد که عملکرد نیروگاه‌های شناور با توجه به نوع فناوری پنل‌ها و محیط‌های استقرار و عملکردی متفاوت، رفتار متفاوتی را نسبت به سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک شناور از خود نشان می‌دهند. به‌عنوان مثال، اگرچه در حال حاضر، فناوری‌های کریستالی در سراسر جهان به دلیل هزینه کم و در دسترس بودن بیش‌تر مورد استفاده قرار می‌گیرند، این فناوری‌ها در محیط‌های مرطوب افت عملکردی قابل توجهی دارند، در حالی که فناوری‌های لایه نازک عملکرد بالایی در شرایط مرطوب دارند. بنابراین، انتخاب فناوری پنل مناسب برای استقرار در مقیاس بزرگ یک نیروگاه شناور ضروری است. متانسب با شرایط نصب و استقرار، این سامانه‌ها نیازمند روش‌های نگهداری خاص و مرتبط با چالش‌های خود می‌باشند. علاوه‌بر تامین انرژی پاک و تجدیدپذیر، این سامانه‌ها منجر به کاهش نرخ تبخیر در مخزن مستقر شده می‌شوند که یکی از مزیت‌های دیگر این سامانه‌ها هست. مرور پژوهش‌های انجام شده در این زمینه نشان داد که میزان کاهش نرخ تبخیر، به نوع ساخت و طراحی آن بستگی دارد. به‌عنوان مثال، پوشش کامل سطح آب توسط این سامانه‌ها می‌تواند تبخیر را تا ۴۹ درصد کاهش دهد در حالی که پنل‌هایی که در ارتفاع ثابت نصب شده‌اند تا تابش پراکنده بر روی سطح آب را دریافت کنند، می‌توانند تبخیر را تا ۳۰ درصد کاهش دهند. در حال حاضر، یکی از موانع اصلی توسعه و استقرار سامانه‌های شناور در مقیاس بزرگ، هزینه سرمایه است که ممکن است تا ۲۵ الی ۳۰ درصد بیش‌تر از سامانه‌های معمولی روی زمین باشد، که البته با نصب این سامانه‌ها بر روی مخازن آب پشت سدها و در کنار نیروگاه‌های برقابی، که از پیش، زیرساخت‌های انتقال برق به‌صورت کامل تعبیه شده است، جذابیت اقتصادی این سامانه‌ها به شدت افزایش می‌یابد. عوامل اصلی در هزینه ساختار سامانه‌های فتوولتاییک شناور است که شامل شناورها، سامانه پهلوگیری و لنگر است که با طراحی مناسب و انتخاب مواد، هزینه ساختار را می‌توان به حداقل رساند. روش‌های نگهداری این سامانه‌ها نیز به دلیل نصب در محیط متفاوت قابل توجه است، که به بررسی انواع تکنیک‌های قابل استفاده از دیدگاه فنی و اقتصادی پرداخته شد. اگرچه، از نظر عملکرد تمیزکاری در شرایط زمینی، روش‌های مبتنی بر آب، راندمان تمیزکاری بالاتری را ارائه می‌دهند، چالش‌های مربوط به در دسترس بودن آب و مخزن ممکن است وجود داشته باشد. به‌صورت کلی، برای سامانه‌های شناور که برای تامین انرژی در کنار کاهش تبخیر آب توسعه یافته‌اند، استفاده از روش لایه‌نشانی نانوپوشش‌های خودتمیز شونده

ترجیح داده می‌شود. بررسی‌های انجام شده نشان می‌دهد که این سامانه‌ها جذابیت بسیار بالایی برای استقرار در کشور ایران را دارند. از این‌رو در پژوهش‌های آتی مقایسه جامع از عملکرد این سامانه‌ها با سامانه‌های خورشیدی فتوولتاییک زمینی، به ویژه در اقلیم ایران، برای اولویت‌بندی و استفاده بهینه از منابع، توصیه می‌شود. استقرار سامانه‌های شناور در مقیاس‌های مختلف و بررسی تجربی عملکرد آن‌ها نیز در اقلیم ایران، به‌شدت برای توسعه هدفمند این سامانه‌ها ضروری است.

۷- مراجع

[1] A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, and M. Zandi, Multicriteria wind potential assessment using fuzzy logic in decision making: A case study of Iran, *Wind Energy*, No. February, p. we.2640, 2021.

[2] A. Aryanfar et al., Multi-criteria prioritization of the renewable power plants in Australia using the fuzzy logic in decision-making method (FMCDM), *Clean Energy*, Vol. 6, No. 1, pp. 16–34, 2022.

[3] Y. Gholami, A. Gholami, M. Ameri, and M. Zandi, Investigation of Applied Methods of Using Passive Energy In Iranian Traditional Urban Design, Case Study of Kashan, *in 4th International Conference on Advances In Mechanical Engineering: ICAME 2018*, 2018, pp. 3–12.

[4] E. Akrami, I. Khazaee, and A. Gholami, Comprehensive analysis of a multi-generation energy system by using an energy-exergy methodology for hot water, cooling, power and hydrogen production, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 129, pp. 995–1001, 2018.

[5] A. Minoofar et al., Renewable energy system opportunities: A sustainable solution toward cleaner production and reducing carbon footprint of large-scale dairy farms, *Energy Conversion and Management*, Vol. 293, p. 117554, 2023.

[6] A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, S. Shahroozi, M. Zandi, and A. Khosravi, Multi-criteria photovoltaic potential assessment using fuzzy logic in decision-making: A case study of Iran, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 42, No. April, p. 100877, 2020.

[7] S. Eslami, A. Gholami, A. Bakhtiari, M. Zandi, and Y. Noorollahi, Experimental investigation of a multi-generation energy system for a nearly zero-energy park: A solution toward sustainable future, *Energy Conversion and Management*, Vol. 200, No. May, p. 112107, 2019.

[8] A. Pasandideh, F. Nezakati Rezapour, M. Gholami, and A. Gholami, Analysis of the Discourse of Renewable Electricity Generation in Iran, *Global Media Journal-Persian Edition*, Vol. 16, No. 1, pp. 101–122, 2022. (in Persian)

[9] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 81, pp. 1730–1741, 2018.

[10] M. T. Chaichan, H. A. Kazem, N. W. Alnaser, A. Gholami, A. H. A. A. Al-Waeli, and W. E. Alnaser, Assessment Cooling of Photovoltaic Modules Using Underground Water, *Arab Gulf Journal of Scientific Research*, Vol. 39, No. 2, pp. 151–169, 2021.

[11] M. Kumar, H. Mohammed Niyaz, and R. Gupta, Challenges and opportunities towards the development of floating photovoltaic systems, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 233, p. 111408, 2021.

[12] M. Kumar, A. Kumar, and R. Gupta, Comparative degradation analysis of different photovoltaic technologies on experimentally simulated water bodies and estimation of evaporation loss reduction, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, Vol. 29, No. 3, pp. 357–378, 2021.

[13] M. Ameri, A. Minoofar, A. Gholami, A. Gholami, S. Eslami, and M. Zandi, Energy Efficiency and Solar Energy Implementation Opportunities for Dairy Farms, *in 11th Global Conference on Global Warming (GCGW-2023)*, 2023, pp. 1–4.

[14] F. Bella, A. Lamberti, S. Bianco, E. Tresso, C. Gerbaldi, and C. F. Pirri, Floating, Flexible Polymeric Dye-Sensitized Solar-Cell Architecture: The Way of Near-Future Photovoltaics, *Advanced Materials Technologies*, Vol. 1, No. 2, 2016.

[15] W. Huang, K. Zhou, K. Sun, and Z. He, Effects of wind flow structure, particle flow and deposition pattern on photovoltaic energy harvest around a block, *Applied Energy*, Vol. 253, No. June, p. 113523, 2019.

[16] H. Rauf, M. S. Gull, and N. Arshad, Integrating Floating Solar PV with Hydroelectric Power Plant: Analysis of Ghazi Barotha Reservoir in Pakistan, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 816–821, 2019.

[17] M. Acharya and S. Devraj, Floating solar photovoltaic (FSPV): a third pillar to solar PV sector, *The Energy and Resources Institute (TERI)*, 2019.

[18] A. Aryanfar, A. Gholami, M. Pourgholi, M. Zandi, and A. Khosravi, A Type-2 Fuzzy-based Multi-criteria Decision-making Method for Sustainable Development of Wind Power Plants in Iran, *Renewable Energy Research and Application*, Vol. 2, No. 2, pp. 147–155, 2021.

[19] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. G. Ghoachani, S. Eslami, and S. Pierfederici, Photovoltaic Potential Assessment and Dust Impacts on Photovoltaic Systems in Iran: Review Paper, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 10, No. 3, pp. 824–837, 2020.

[20] K. Wanghe et al., FRESF model: An ArcGIS toolbox for rapid assessment of the supply, demand, and flow of flood regulation ecosystem services, *Ecological Indicators*, Vol. 143, p. 109264, 2022.

[21] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, and A. Gholami, A systematic review of solar photovoltaic energy systems design modelling, algorithms, and software, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 44, No. 3, pp. 6709–6736, 2022.

[22] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. Gavagsaz Ghoachani, and H. A. Kazem, Predicting solar photovoltaic electrical output under variable environmental conditions: Modified semi-empirical correlations for dust, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 71, pp. 389–405, 2022.

[23] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, and R. Gavagsaz Ghoachani, Electrical, thermal and optical modeling of photovoltaic systems: Step-by-step guide and comparative review study, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 49, p. 101711, 2022.

[24] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, and R. Gavagsaz Ghoachani, A single-diode model for photovoltaic panels in variable environmental conditions: Investigating dust impacts with experimental evaluation, *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 47, No. October, p. 101392, 2021.

[25] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, R. Gavagsaz Ghoachani, and M. Gholami, A Fast and Precise Double-Diode Model for Predicting Photovoltaic Panel Electrical Behavior in Variable Environmental Conditions, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 44, No. 1, 2022.

[26] S. Eslami, A. Gholami, H. Akhbari, M. Zandi, and Y. Noorollahi, Solar-based multi-generation hybrid energy system; simulation and experimental study, *International Journal of Ambient Energy*, Vol. 43, No. 1, pp. 2963–2975, 2022.

[27] A. Gholami et al., Impact of harsh weather conditions on solar photovoltaic cell temperature: Experimental analysis and thermal-optical modeling, *Solar Energy*, Vol. 252, pp. 176–194, 2023.

[28] A. Hoorsun, M. Gandomzadeh, A. Yaghoubi, A. Parsay, A. Gholami, and M. Zandi, Insights and Research Trends of Dust and Cleaning in Solar Energy: A Bibliometric Review Study, *in 9th International Conference on Technology and Energy Management (ICTEM 2024)*, 2024, pp. 1–5.

[29] S. A. Alenabi, A. Mansouri, A. Gholami, and R. Gavagsaz-Ghoachani, Simulation of wind flow effect on the cooling of solar panels (in Tehran), *in 11th Iranian Conference on Renewable Energy and Distribution Generation (ICREDG)*, 2024, pp. 1–4.

[30] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. A. Al-Waeli, R. Al-Badi, M. A. Fayad, and A. Gholami, Dust impact on photovoltaic/thermal system in harsh weather conditions, *Solar Energy*, Vol. 245, No. July, pp. 308–321, 2022.

[31] R. Cazzaniga, *Chapter 4 - Floating PV Structures*, in: M. Rosa-Clot and G. M. Tina (Eds.), *Floating PV Plants*, pp. 4.33–4.45, Academic Press, 2020.

[32] D. Chirwa, R. Goyal, and E. Mulenga, Floating solar photovoltaic (FSPV) potential in Zambia: Case studies on six hydropower power plant reservoirs, *Renewable Energy Focus*, Vol. 44, pp. 344–356, 2023.

[33] M. Rezvani, A. Gholami, R. Gavagsaz-Ghoachani, M. Phattanasak, and M. Zandi, A review of the factors affecting the utilization of solar photovoltaic panels, *in 2022 Research, Invention, and Innovation Congress: Innovative Electricals and Electronics (RI2C)*,

[52] M. G. Hudedmani, G. Joshi, R. M. Umayal, and A. Revankar, A Comparative Study of Dust Cleaning Methods for the Solar PV Panels, *Advanced Journal of Graduate Research*, Vol. 1, No. 1, pp. 24–29, 2017.
[53] A. Al-Otaibi, A. Al-Qattan, F. Fairouz, and A. Al-Mulla, Performance evaluation of photovoltaic systems on Kuwaiti schools' rooftop, *Energy Conversion and Management*, Vol. 95, pp. 110–119, 2015.
[54] A. Al Baloushi, M. Saeed, S. Marwan, S. AlGghafri, and Y. Moumouni, Portable robot for cleaning photovoltaic system: Ensuring consistent and optimal year-round photovoltaic panel performance, *in Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, 2018, pp. 1–4.
[55] N. Li, Z. Yang, Q. Zhang, R. Feng, and Y. Wu, Numerical Study on Windbreaks with Different Porosity in Photovoltaic Power Plants, *Energy Procedia*, Vol. 158, pp. 577–582, 2019.
[56] P. Vasiljev, S. Borodinas, R. Bareikis, and A. Struckas, Ultrasonic system for solar panel cleaning, *Sensors and Actuators, A: Physical*, Vol. 200, pp. 74–78, 2013.
[57] K. Rahbar, S. Eslami, R. Pouladian-Kari, and L. Kirchner, 3-D numerical simulation and experimental study of PV module self-cleaning based on dew formation and single axis tracking, *Applied Energy*, Vol. 316, No. March, p. 119119, 2022.
[58] A. Pouladian-Kari, S. Eslami, A. Tadjik, L. Kirchner, R. Pouladian-Kari, and A. Golshanfard, A novel solution for addressing the problem of soiling and improving performance of PV solar systems, *Solar Energy*, Vol. 241, pp. 315–326, 2022.
[59] A. Skomedal, H. Haug, and E. S. Marstein, Endogenous Soiling Rate Determination and Detection of Cleaning Events in Utility-Scale PV Plants, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 9, No. 3, pp. 858–863, 2019.
[60] S. Jiang, K. Wang, H. Zhang, Y. Ding, and Q. Yu, Encapsulation of PV Modules Using Ethylene Vinyl Acetate Copolymer as the Encapsulant, *Macromolecular Reaction Engineering*, Vol. 9, No. 5, pp. 522–529, 2015.
[61] A. A. Hegazy, Effect of dust accumulation on solar transmittance through glass covers of plate-type collectors, *Renewable Energy*, Vol. 22, No. 4, pp. 525–540, 2001.
[62] W. Al-Kouz, S. Al-Dahidi, B. Hammad, and M. Al-Abed, Modeling and Analysis Framework for Investigating the Impact of Dust and Temperature on PV Systems' Performance and Optimum Cleaning Frequency, *Applied Sciences*, Vol. 9, No. 7, p. 1397, 2019.
[63] A. A. Yaghoubi, M. Gandomzadeh, A. Gholami, R. Gavagsaz Ghoachani, M. Zandi, and H. A. Kazem, Optimize photovoltaic panels cleaning scheduling framework based on variations of hourly-based active electricity pricing in the market, *Solar Energy*, Vol. 275, No. May, p. 112633, 2024.
[64] A. Kimber, L. Mitchell, S. Nogradi, and H. Wenger, The Effect of Soiling on Large Grid-Connected Photovoltaic Systems in California and the Southwest Region of the United States, *in IEEE 4th World Conference on Photovoltaic Energy Conference*, 2006, pp. 2391–2395.
[65] N. F. Jones, L. Pejchar, and J. M. Kiesecker, The Energy Footprint: How Oil, Natural Gas, and Wind Energy Affect Land for Biodiversity and the Flow of Ecosystem Services, *BioScience*, Vol. 65, No. 3, pp. 290–301, 2015.
[66] M. Fathi, M. Abderrezek, and M. Friedrich, Reducing dust effects on photovoltaic panels by hydrophobic coating, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 19, No. 2, pp. 577–585, 2017.
[67] M. Al-Housani, Y. Bicer, and M. Koç, Experimental investigations on PV cleaning of large-scale solar power plants in desert climates: Comparison of cleaning techniques for drone retrofitting, *Energy Conversion and Management*, Vol. 185, No. September 2018, pp. 800–815, 2019.
[68] R. K. Jones et al., Optimized Cleaning Cost and Schedule Based on Observed Soiling Conditions for Photovoltaic Plants in Central Saudi Arabia, *IEEE Journal of Photovoltaics*, Vol. 6, No. 3, pp. 730–738, 2016.
[69] B. Hammad et al., Modeling and analysis of dust and temperature effects on photovoltaic systems' performance and optimal cleaning frequency: Jordan case study, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. April 2017, pp. 2218–2234, 2018.
2022, pp. 62–69.
[34] A. Gholami, A. A. Alemrajabi, and A. Saboonchi, Experimental study of self-cleaning property of titanium dioxide and nanospray coatings in solar applications, *Solar Energy*, Vol. 157, pp. 559–565, 2017.
[35] A. Gholami, S. Eslami, T. Aryan, M. Ameri, R. Gavagsaz-Ghoachani, and M. Zandi, A Review of the Effect of Dust on the Performance of Photovoltaic Panels, *Iranian Electric Industry Journal of Quality and Productivity*, Vol. 8, No. 15, pp. 93–102, 2019.
[36] A. Gholami, I. Khazaee, S. Eslami, M. Zandi, and E. Akrami, Experimental investigation of dust deposition effects on photo-voltaic output performance, *Solar Energy*, Vol. 159, pp. 346–352, 2018.
[37] A. Gholami, A. Saboonchi, and A. A. Alemrajabi, Experimental study of factors affecting dust accumulation and their effects on the transmission coefficient of glass for solar applications, *Renewable Energy*, Vol. 112, pp. 466–473, 2017.
[38] A. Gholami, M. Ameri, M. Zandi, and R. Gavagsaz-Ghoachani, A Review on Dust Activities in Iran and Parameters Affecting Dust Accumulation on Photovoltaic Panels, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 8, No. 2, pp. 146–158, 2021.
[39] K. K. Agrawal, S. K. Jha, R. K. Mittal, and S. Vashishtha, Assessment of floating solar PV (FSPV) potential and water conservation: Case study on Rajghat Dam in Uttar Pradesh, India, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 66, pp. 287–295, 2022.
[40] D. Razeghi Jahromi, A. Minoofar, G. Ghorbani, A. Gholami, M. Ameri, and M. Zandi, Harnessing Sunlight on Water: A Comprehensive Analysis of Floating Photovoltaic Systems and their Implications Compared to Terrestrial, *Journal of Renewable Energy and Environment*, 2023.
[41] D. Dirnberger, G. Blackburn, B. Müller, and C. Reise, On the impact of solar spectral irradiance on the yield of different PV technologies, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 132, pp. 431–442, 2015.
[42] R. Rüther and J. Livingstone, Seasonal variations in amorphous silicon solar module outputs and thin film characteristics, *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Vol. 36, No. 1, pp. 29–43, 1995.
[43] M. Rezvani, A. Gholami, R. Gavagsaz-Ghoachani, and M. Zandi, A Review on The Effect of Dust Properties on Photovoltaic Solar Panels' Performance, *Journal of Renewable and New Energy*, Vol. 10, No. 1, pp. 198–211, 2023.
[44] H. A. Kazem, A. H. A. Al-Waeli, M. T. Chaichan, K. Sopian, A. Gholami, and W. E. Alnaser, Dust and cleaning impact on the performance of photovoltaic: an outdoor experimental study, *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, Vol. 45, No. 1, pp. 3107–3124, 2023.
[45] S. C. S. Costa, A. S. A. C. Diniz, and L. L. Kazmerski, Solar energy dust and soiling R&D progress: Literature review update for 2016, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. September, pp. 2504–2536, 2018.
[46] D. Deb and N. L. Brahmbhatt, Review of yield increase of solar panels through soiling prevention, and a proposed water-free automated cleaning solution, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 82, No. October, pp. 3306–3313, 2018.
[47] A. Gholami et al., Dust Accumulation On Photovoltaic Modules: A Review On The Effective Parameters, *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences*, Vol. 39, No. 1, pp. 45–57, 2021.
[48] J. L. Gómez-Amo, M. D. Freile-Aranda, J. Camarasa, V. Estellés, M. P. Utrillas, and J. A. Martínez-Lozano, Empirical estimates of the radiative impact of an unusually extreme dust and wildfire episode on the performance of a photovoltaic plant in Western Mediterranean, *Applied Energy*, Vol. 235, pp. 1226–1234, 2019.
[49] S. Cai et al., Parameters optimization of the dust absorbing structure for photovoltaic panel cleaning robot based on orthogonal experiment method, *Journal of Cleaner Production*, Vol. 217, pp. 724–731, 2019.
[50] R. Zahedi, P. Ranjbaran, G. B. Gharehpetian, F. Mohammadi, and R. Ahmadiahangar, Cleaning of Floating Photovoltaic Systems: A Critical Review on Approaches from Technical and Economic Perspectives, *Energies*, Vol. 14, No. 7, p. 2018, 2021.
[51] A. Gholami, S. H. Eslami, A. Tajik, M. Ameri, R. Gavagsaz Ghoachani, and M. Zandi, A review of dust removal methods from the surface of photovoltaic panels, *Mechanical Engineering, Sharif Journal*, Vol. 35, No. 2, pp. 117–127, 2019. (in Persian)