DOR: 20.1001.1.24234931.1398.6.1.15.5

سال ششم، شماره اول، تابستان ۱۳۹۸، ص ۱۳۱ ص ۱۴۱
فصل‌نامه علمی – ترویجی انرژی‌های تجدیدپذیر و نو
Jrenew.ir

مقاله
تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۸/۹
تاریخ پذیرش: ۱۳۹۷/۹/۲۹

مروری بر مطالعات و تحقیقات انجام شده در زمینه تولید انرژی الکتریکی با سیستم‌های خورشیدی شناور در دنیا

پریسا رنجبران[۱]، حسین یوسفی[۲*]، گئورگ قره‌پتیان[۳]، فاطمه راضی آستارایی[۴]

۱ -دانشجوی ارشد، انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران
۲ -دانشیار، انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران
۳ -استاد، مهندسی برق، دانشگاه صنعتی امیر کبیر
۴ -استادیار، انرژی‌های نو و محیط زیست، دانشگاه تهران، تهران
* تهران، صندوق پستی ۱۴۳۹۹۵۷۱۳۱، Hosseinyousefi@ut.ac.ir

چکیده

افزایش چشمگیر تقاضای برق، کاهش سریع سوخت‌های فسیلی و همچنین نگرانی‌های زیست محیطی در سراسر جهان منجر به گسترش نیروگاه‌های خورشیدی در مقیاس وسیع شده‌است. سیستم خورشیدی شناور یک طراحی جدید برای نیروگاه‌های خورشیدی است. سیستم‌های خورشیدی شناور معمولا بر روی آبراهه‌ها، مانند دریاچه‌های طبیعی یا مخازن سدها نصب می‌شوند. این فن‌آوری از سال ۲۰۰۷ مورد توجه کشورهای مختلف قرار گرفته‌است. تا کنون نیروگاه‌های خورشیدی شناور متوسط و بزرگ در چندین کشور مانند ژاپن، کره‌ی جنوبی، هند و ایالات متحده نصب شده‌اند. با توجه به مزایای نصب این سیستم‌ها از جمله کاهش تبخیر، استفاده از آن‌ها در مناطق خشک و کم آب مانند ایران می‌تواند راه حلی برای کاهش بحران آب باشد. در این مقاله، به مرور مقالات انجام شده بر روی تولید انرژی این سیستم‌ها و کارایی آن‌ها پرداخته شده‌است. سپس، تاثیر استفاده از این سیستم بر روی کاهش تبخیر و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین بررسی مسائل اقتصادی این سیستم‌ها مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بررسی مطالعات انجام شده نشان می‌دهد که بازدهی سیستم‌های خورشیدی شناور حدود ۱۲ درصد بیش‌تر از سیستم‌های خورشیدی نصب شده بر روی زمین است. هم‌چنین این سیستم‌ها می‌توانند تا ۹۰ درصد تبخیر سطحی آب را کاهش دهند.

کلیدواژگان: نیروگاه‌های خورشیدی شناور، تولید انرژی، کاهش تبخیر، کاهش گازهای گلخانه‌ای

A review of studies and research on power generation using floating photovoltaic systems in the world

Parisa Ranjbaran[1], Hossein Yousefi[2*], Gevork B. Gharehpetian[3], Fatemeh Razi Astaraei[4]

1- Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
2- Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
3- Department of Electrical Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran
4- Department of Renewable Energies and Environment, Faculty of New Sciences & Technologies, University of Tehran, Tehran, Iran
* P.O.B. 1439957131, Tehran, Iran, Hosseinyousefi@ut.ac.ir

Received: ?? October 2016 Accepted: ?? November 2017

Abstract

The increase in electricity demand, the rapid reduction of fossil fuels, as well as environmental concerns around the world, have led to the expansion of large-scale photovoltaic power plants. Floating solar system is a new design for photovoltaic power plants which are usually installed on freshwaters such as natural lakes or dams. This technology has

www.SID.ir

attracted the wide attention since 2007. Medium and large-scale floating photovoltaic power plants are installed in several countries, such as Japan, South Korea, India and the United States. Considering the advantages of installing these systems, including reducing evaporation, using these systems in arid and semiarid areas can be a solution to reduce the water crisis. In this article, a review of the articles on the energy generation of floating photovoltaic systems and their efficiency has been presented. Then, the impact of using the system on reducing evaporation and reducing greenhouse gas emissions, as well as studying the economic issues of these systems has been studied. The results indicate that the efficiency of floating photovoltaic systems is about 12% higher than ground-mounted photovoltaic systems. Also, these floating systems can reduce surface water evaporation up to 90%.

Keywords: Floating photovoltaic, Energy generation, Reducing evaporation, Reducing greenhouse gases

www.SID.ir

۱- مقدمه

افزایش روزافزون مصرف انرژی و فناپذیر بودن سوخت‌های فسیلی و شرایط و موقعیت بد محیط زیست جهانی، سبب گرایش و تمایل به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر و دوستدار محیط زیست شده است. در میان اشکال مختلف انرژی، انرژی الکتریکی یکی از مهم‌ترین انواع انرژی مورد نیاز بشر است. از طرفی، به دلیل پیشرفت‌های صنعتی در بخش‌های مختلف مصرف، مصرف انرژی به صورت انرژی الکتریکی افزایش چشم گیری داشته است به طوری که در آمریکا در سال ۱۹۷۰، ۲۵٪ از مصرف انرژی، به‌صورت انرژی الکتریکی بوده‌است اما این مقدار در سال ۲۰۱۷ به ۴۰٪ رسیده‌است. برآوردها نشان می‌دهد که حدود ۶۵٪ مصرف انرژی در سال ۲۰۵۰ از نوع انرژی الکتریکی خواهد بود [۱]. از عوامل مؤثر در گرایش مصرف انرژی به سمت انرژی الکتریکی می‌توان به آلودگی بسیار ناچیز در محل مصرف، انتقال ساده‌تر نسبت به انواع دیگر انرژی با بازدهی بالاتر، قابلیت کنترل بالا در محل تولید و مصرف و انعطاف پذیری بسیار زیاد در تغییر شکل به انواع دیگر انرژی در محل اشاره کرد.

با توجه به نیاز روزافزون کشور به انرژی الکتریکی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌های زیست‌محیطی سوخت‌های فسیلی، استفاده از منابع انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر یکی از راه‌های تامین نیاز برق کشور به‌صورت پاک محسوب می‌شود. یکی از مناسب‌ترین روش‌های استفاده از منابع تجدیدپذیر انرژی، سیستم فتوولتائیک (PV) می‌باشد. از مزایای انرژی خورشیدی این است که در همه جا قابل دسترس است و هیچ گونه آلودگی در محیط زیست ایجاد نمی‌کند. از طرف دیگر، با توجه به وضعیت آب در کشور ایران، لزوم بررسی روش‌های کاهش تبخیر امری لازم و ضروری به نظر می‌رسد. روش‌های کاهش تبخیر می‌تواند به پنج دسته اصلی شامل روش‌های شیمیایی، فیزیکی، بیولوژیکی، بهره‌برداری، ساختاری و مکانیکی تقسیم شوند [۲]. بررسی این روش‌ها جهت فراهم نمودن نیاز در کشور امری ضروری بوده و دستیابی به توسعه پایدار را ممکن می‌سازد. یکی از راهکارهای پیش رو به منظور حل این مشکل کاهش میزان تبخیر از سطح مخازن و منابع آبی از جمله دریاچه‌های طبیعی و مصنوعی است.

سیستم‌های فتوولتائیک شناور (FPV[۱]) یکی از انواع پوشش‌های فیزیکی است که در کنار کاهش تبخیر مزایای بسیار دیگری را نیز فراهم می‌کند. سازه‌های سایه‌دار پوشش های معلقی هستند که روی حوضچه آب نصب می‌شوند. این سازه‌ها با کاهش میزان نور خورشید تابیده شده بر روی مخزن و کاهش سرعت باد روی سطح آب و افزایش میزان رطوبت هوا در زیر پوشش باعث کاهش تبخیر می‌شوند. حضور سازه‌های سایه‌دار باعث جلوگیری از رشد جلبک می‌شود. تا پیش از سال ۲۰۱۴ تنها سه نیروگاه خورشیدی شناور در جهان ساخته شده بود که این رقم در طول دو سال به بیش از هفتاد نیروگاه در دنیا رسیده‌است. دو کشور امریکا و ژاپن در زمینه نصب و راه‌اندازی نیروگاه‌های خورشیدی شناور، در جهان پیشتاز هستند. در کشور امریکا شش نیروگاه شناور با ظرفیت ۵۰ kWp تا ۶,۳ MWp نصب شده‌است [۴]. کشور ژاپن با نصب ۴۵ نیروگاه در این زمینه در رتبه اول قرار دارد [۴]. دلیل اصلی توسعه این سیستم در کشور ژاپن وجود سیاست تعرفه‌های تشویقی[۲] و کمبود زمین در این کشور است.

یکی از نخستین پروژه‌های FPV با هدف مطالعه و تحقیق، در سال ۲۰۰۷ در آیچی[۳] ژاپن با ظرفیت ۲۰ کیلووات نصب گردید. اودا[۴] و همکاران [۵] در مطالعه‌ای به بررسی این پروژه پرداخته‌اند. هدف این پژوهش، مقایسه توان تولیدی پنل‌ها در حالت خنک کاری با آب و هوا بود. در این پروژه سیستم‌های شناور توسط لنگر ثابت نگه داشته شده‌اند و کابل‌های DC به اینورتر که روی زمین قرار گرفته متصل شده‌اند. این سیستم متصل به شبکه است و خروجی‌ها در هر دقیقه نظارت می‌شوند. خنک‌سازی صفحات به وسیله‌ی سیستم آب‌رسانی نوبتی که روی یکی از سیستم‌های شناور قرار گرفته انجام می‌گیرد. در نتیجه استفاده از این سیستم خنک‌سازی افزایش دما را از ۱۷٪ به ۷,۴٪ در ماه آگوست ۲۰۰۷ کاهش داده‌است. فررگیسبرت[۵] و همکاران [۶] در سال ۲۰۱۳، به بررسی سیستم جدید فتوولتائیک شناور روی آب که توسط دو شرکت سلمین انرژی[۶] و دانشگاه پلی‌تکنیک والنسیا[۷] توسعه یافته است، پرداخته‌اند. این سیستم از ماژول‌های شناور پلی اتیلن که با استفاده از اجزای تولیدکننده تنش[۸] و اتصالات الاستیک قادر به انطباق با سطوح مختلف آب مخزن هستند، تشکیل شده‌است. یک نیروگاه کامل نزدیک شهر آلیکانته[۹] (اسپانیا) در یک منبع آب کشاورزی، برای مطالعه رفتار سیستم ساخته شده‌است. سطح این منبع ۴۷۰۰ m^2 مساحت دارد اما تنها ۷٪ آن به وسیله سیستم ثابت خورشیدی پوشش داده شده‌است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که این سیستم از نظر فنی امکان‌پذیر و از نظر اقتصادی مناسب است. در مقاله‌ی دیگری، تابوادا[۱۰] و همکاران [۷] در سال ۲۰۱۷، از سیستم‌های خورشیدی به عنوان راه حلی برای کمبود انرژی‌های فسیلی و منابع آب در منطقه شمالی کشور شیلی استفاده کرده‌اند. در این پژوهش از صفحات شناور خورشیدی برای کاهش تبخیر منابع آب و تولید انرژی استفاده شده‌است. سیستم ارائه شده شامل صفحات شناور خورشیدی برای تولید انرژی و سیستم گرمایش خورشیدی آب به منظور تامین آب گرم مورد نیاز معادن اطراف مخزن آب است. نتایج بررسی‌ها نشان‌دهنده رضایت‌بخش بودن عملکرد سیستم ارائه شده‌است.

---

[۱] Floating Photovoltaic

[۲] Feed in tariffs

[۳] Aichi

[۴] Yuzuru Ueda

[۵] Carlos Ferrer-Gisbert

[۶] CELEMIN ENERGY

[۷] Polytechnic university of Valencia

[۸] Tension Producing Elements

[۹] Alicante

[۱۰] M.E. Taboada

www.SID.ir

تراپانی[1] و سانتافه [۸] در مقاله‌ای به مرور پروژه‌های مختلفی که در طول سال‌های ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۳ احداث شده‌اند پرداخته‌اند. تمامی صفحات خورشیدی نصب شده در این پروژه‌ها بر روی یک ساختار پل شناور محکم قرار گرفته‌اند. از جمله پروژه‌های معرفی شده در این مطالعه می‌توان به این دو مورد اشاره کرد:

- در سال ۲۰۰۸ پروژه‌ای در مقیاس بزرگ‌تر و با ظرفیت ۱۷۵ کیلووات در کالیفرنیای آمریکا اجرا گردید. پروژه‌ی SPG[2] متشکل از پنل‌های خورشیدی کریستالی است که در زاویه بهینه محل نصب قرار گرفته‌اند.

- در سال ۲۰۰۹، سانتافه و همکارانش با هدف کاهش تبخیر آب، نمونه ای با ظرفیت ۲۴ کیلووات را در نگرت[3] اسپانیا نصب کرده‌اند. این سیستم بر روی مخزن آب کشاورزی نصب گردیده در حالی که تنها ۷٪ از سطح مخزن را می‌پوشاند.

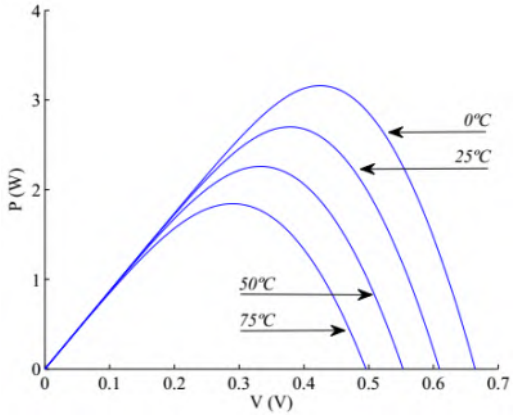
در سال ۲۰۱۶، ساهو[4] و همکاران [۹] در یک مقاله‌ی مروری ضمن مروری بر نیروگاه‌های فتوولتائیک شناور ساخته‌شده در دنیا مزایا و معایب این سیستم‌ها را نیز مشخص کرده و همچنین ساختار و اجزای تشکیل‌دهنده سیستم فتوولتائیک شناور و همچنین انواع آن‌را معرفی نموده‌اند. این مقاله یک دید کلی در مورد تکنولوژی سیستم‌های فتوولتائیک شناور، وضعیت کنونی و طراحی‌های مختلف آن را ارائه می‌دهد. کیم[5] و همکاران [۱۰] مروری بر تحقیقات اخیر در زمینه‌ی سیستم‌های خورشیدی شناور و نیروگاه‌های نصب در کشور کره‌ی جنوبی از ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۴ داشته‌اند. تا به امروز، ۱۳ نیروگاه خورشیدی شناور در کره‌ی جنوبی نصب شده‌است و چندین طرح از سوی بسیاری از سازمان‌های مختلف، از جمله شرکت های دولتی، برای نصب بیش‌تر نیروگاه‌های خورشیدی شناور در حال انجام هستند. در سال ۲۰۱۸، کاتزانیگا[6] و همکاران [۱۱] در یک مقاله مروری به بررسی نیروگاه‌های خورشیدی نصب شده بر روی سطح آب پرداخته‌اند. در این مطالعه طراحی‌های مختلف سیستم شناور خورشیدی با هدف افزایش بازدهی این سیستم ارائه شده‌است. به طور خاص، سیستم‌هایی که از امکاناتی مانند ردیابی، خنک کننده و متمرکز کننده استفاده می‌کنند، مورد بحث قرار گرفته‌است و نتایج آن نشان دهنده‌ی تاثیر قابل ملاحظه‌ی ردیابی و خنک سازی روی بازدهی سیستم است. در نهایت امکان بهره‌برداری از ساختار شناور در آب به منظور ایجاد یک سیستم ذخیره‌ساز یکپارچه ارائه شده‌است.

با توجه به این که مقالات انجام شده بیش‌تر بر روی طراحی و ساختار سیستم‌های خورشیدی شناور و بررسی نیروگاه‌های احداث شده تمرکز داشته‌اند، در این مطالعه سعی شده‌است که جوانب دیگری از این سیستم‌ها مانند تولید توان و مسائل زیست محیطی این سیستم‌ها مورد بررسی قرار گیرد. هم‌چنین در این پژوهش به معرفی این سیستم‌ها، بررسی تولید توان، تاثیر استفاده از این سیستم‌ها بر کاهش تبخیر و انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین بررسی مسائل اقتصادی پرداخته شده‌است. در انتها خلاصه‌ی مقالات مرور شده در این پژوهش در جدول ۱ ارائه شده‌است.

۲- سیستم‌های خورشیدی شناور

روش‌های مختلفی جهت بهره‌برداری از انرژی آب، آب رودخانه‌ها (به صورت سیستم برق آبی) و آب دریا (استفاده از موج و یا جزر و مد)، وجود دارد. سیستم خورشیدی شناور روشی جدید و مقرون به صرفه است که علاوه بر تولید توان الکتریکی مزایای بسیار دیگری نیز به همراه دارد. از جمله مزایای این سیستم‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- افزایش بازدهی صفحات خورشیدی: یکی از مسائل مهم در بهره‌برداری از صفحات خورشیدی، افزایش دمای صفحات در اثر تابش زیاد خورشید و بالا بودن دمای محیط است که منجر به کاهش بازدهی سیستم می‌شود. در شکل ۱ رابطه‌ی بین توان (P) و ولتاژ (V) خروجی یک سلول خورشیدی در دماهای بین صفر و ۷۵ نشان داده شده‌است. همان‌طور که مشخص است توان خروجی بیشینه سلول‌های خورشیدی با افزایش دما کاهش می‌یابد. بنابراین، گرم شدن سلول‌های خورشیدی توان صفحات را کاهش می‌دهد.



شکل ۱ توان خروجی یک سلول خورشیدی ایده آل **[۱۲]**

- قرار گرفتن صفحات خورشیدی بر روی سطح آب موجب کاهش دمای آن و در نتیجه افزایش توان تولیدی و بازدهی سیستم می‌شود. انتظار می رود که صفحات خورشیدی شناور دارای خروجی بالاتر و نیازهای تعمیر و نگهداری کم‌تری نسبت به صفحات خورشیدی نصب شده روی زمین و یا پشت‌بام‌های ساختمان داشته‌باشند.

- کاهش نرخ تبخیر: اولین نکته‌ای که در زمان انتخاب مکان نصب نیروگاه‌های خورشیدی در نظر گرفته می‌شود، میزان تابش نور خورشید در منطقه است. از طرفی دیگر، بالا بودن تابش خورشید در این مناطق میزان تبخیر سطحی آب را به شدت افزایش می‌دهد. صفحات

[1] Kim Trapani
[2] Solar Power Group
[3] Negret
[4] Alok Sahu
[5] Kim
[6] Cazzaniga

www.SID.ir

خورشیدی شناور با ایجاد پوششی بر روی سطح آب از تابش خورشید به آب مخزن جلوگیری کرده و میزان تبخیر را کاهش می‌دهد. هم‌چنین، این صفحات با پوشش مقطعی سطح آب تاثیر باد بر تبخیر آب را کاهش می‌دهد [۱۳]. این سیستم با پوشش سطح آزاد آب، تاثیر باد بر تبخیر را کاهش می‌دهد. بنابراین، این سیستم علاوه بر تولید برق از تبخیر آب نیز جلوگیری می‌کند [۳].

- افزایش بهره‌وری زمین: انرژی خورشیدی یک منبع انرژی پاک و پایدار است. اما ساخت نیروگاه‌های خورشیدی به زمین‌هایی با وسعت زیاد نیاز دارد. این ویژگی باعث محدود شدن توسعه‌ی سیستم‌های خورشیدی در از کشورها چون ژاپن و سنگاپور شده‌است، که قیمت زمین به علت کمبود زمین و بالا بودن جمعیت زیاد است. با ساخت صفحات خورشیدی شناور بر روی سطح آب، می‌توان زمین‌های با ارزش را برای مقاصد دیگر به کار برد [۳].
- افزایش پتانسیل تولید سدهای برق آبی: اتصال نیروگاه‌های خورشیدی به نیروگاه‌های برق آبی ظرفیت تولید برق را بالا می‌برد. این سیستم این امکان را دارد که در زمان خشک سالی، هنگامی که از نیروگاه برق آبی بهره‌برداری نمی‌شود، نیروگاه خورشیدی شناور همچنان به تولید برق ادامه دهد [۱۵], [۱۴].
- تنوع زیستی مخزن: صفحات خورشیدی با ایجاد پوششی بر روی سطح مخزن از ورود نور خورشید به داخل آب جلوگیری کرده و مانع رشد جلبک‌ها می‌شود [۱۶]. به طور کلی صفحات خورشیدی بر روی تنوع زیستی مخزن تاثیرگذار بوده و لازم است که در مطالعات آینده با دقت مورد بررسی قرار گیرد.

از جمله معایب این سیستم‌ها می‌توان موارد زیر را نام برد [۹]:

- این سیستم در معرض خطراتی مانند مانند جزر و مد، طوفان، امواج دریا، سیکلون‌ها و سونامی است.
- خوردگی ساختار فلزی و اجزای سازنده که می‌تواند عمر سیستم را کاهش دهد.
- کاهش نفوذ نور خورشید به درون آب که ممکن است بر رشد حیوانات آبزی و جلبک‌های دریایی و غیره تاثیر بگذارد.
- فعالیت هایی مانند ماهیگیری و سیستم حمل و نقل آبی ممکن است تحت تاثیر قرار گیرند.

سیستم‌های خورشیدی با توجه به محل قرار گیری به طور کلی به پنج دسته زیر تقسیم می‌شوند [۹]:

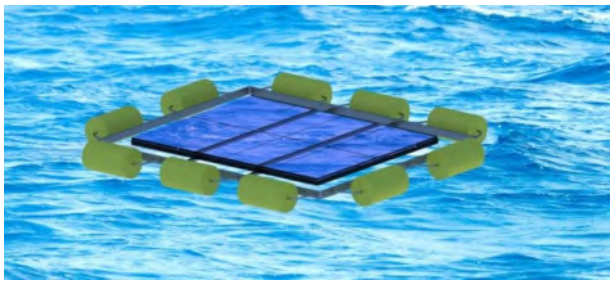
۱- نصب شده بر روی زمین (متداول‌ترین شکل)
۲- نصب شده بر روی کانال
۳- بر روی پشت بام
۴- دریایی[1] (ساحل دریا)
۵- سیستم شناور خورشیدی

۳- دسته بندی سیستم‌های خورشیدی شناور

سیستم‌های شناور خورشیدی را می‌توان بر سه اساس دسته بندی کرد [۱۱]:

۱- محل قرارگیری نسبت به سطح آب: روی سطح آب (سیستم شناور) و یا درون آب (غوطه ور[2])
۲- نوع آب: آب شیرین (دریاچه‌ها) و یا آب شور (دریا)
۳- نوع ماژول خورشیدی: سخت و یا منعطف

آب خالص جاذب قوی نور خورشید است، جذب به طور عمده به طول موج تابشی خورشیدی وابسته است. آب مانند فیلتر بالاگذر عمل می‌کند. طیف جذب نور خورشید توسط آب بین طول موج‌های ۳۵۰ تا ۵۵۰ نانومتر قرار دارد (در طیف قابل مشاهده)، که فن‌آوری‌های فتوولتائیک در این طیف کار می‌کنند. بنابراین امکان برای قرار دادن صفحات خورشیدی درون آب به صورت غوطه‌ور را فراهم می‌کند که علاوه بر تاثیرات زیست محیطی کمتر و ثابت نگه داشتن دمای صفحات خورشیدی به زیرساخت‌های کمتری نیاز دارد [۱۸], [۱۷]. اما در مقایسه با سیستم‌های غوطه‌ور سیستم‌های شناور دارای مزایایی مانند امکان ردیابی نور خورشید و همچنین امکان استفاده از حفره شناور به عنوان ذخیره‌ساز هوای فشرده هستند [۲۰], [۱۹] همچنین از نظر نوع آب، آب‌های شیرین به دلیل خوردگی کمتر، کمتر بودن اثرات امواج و باد و محدود بودن رشد جلبک‌ها همچنین دسترسی ساده‌تر به ساحل در اولویت استفاده قرار دارند. در مورد نوع ماژول PV، تقریبا تمام سیستم های موجود FPV از ماژول های مسطح سفت و سخت استفاده می کنند اما راه حل دیگری پیشنهاد شده است که از ماژول های انعطاف پذیر است که بر روی سطح آب قرار گرفته و حرکت امواج را دنبال می‌کند [۲۱]. در شکل ۲ یک نمونه صفحه‌ی خورشیدی شناور شفاف نشان داده شده‌است.



شکل ۲ صفحه‌ی خورشیدی شناور شفاف

۴- اجزای تشکیل دهنده‌ی سیستم‌های خورشیدی شناور

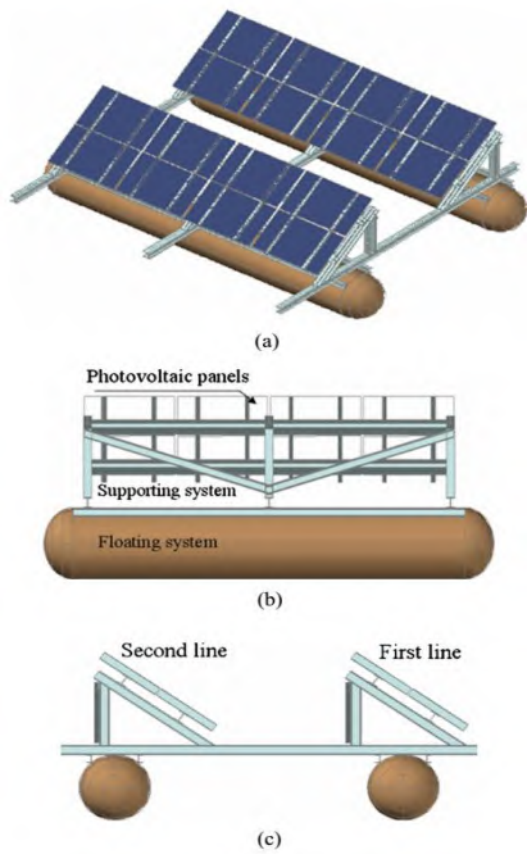
اجزای نیروگاه‌های خورشیدی شناور شامل پل‌های شناور یا جداکننده‌های شناور، سیستم مهار، صفحات خورشیدی و کابل هستند [۲۲].

[1] Offshore
[2] Submerged

www.SID.ir

- پل شناور: پل شناور وسیله‌ای است که برای نگـه داری تعـداد مناسـب ماژول‌های خورشیدی که به صورت سری و موازی بـا توجـه بـه نیـاز و فضای موجود، به هم وصل شده‌اند، به کار می‌رود.
- شناورها: شناورهای پلاستیکی با نیروی شـناوری مـوثر نسـبت بـه وزن خود که چندین بار با هم ترکیب شده‌انـد و یـک پـل شـناور بـزرگ را تشکیل داده‌اند. این شناورها معمولا از HDPE[1] ساخته شده‌انـد، کـه بـه دلیل قدرت تنش آن، مقاومت بالا، مقاومت در برابر UV و خـوردگی از آن استفاده می‌شود. الیاف شیشه تقویت شـده پلاسـتیکی (GRP) نیـز می‌تواند برای ساخت و ساز سکوی شناور استفاده شود.
- سیستم مهار: سیستم مهار به هر سـاختار دائمـی گفتـه مـی‌شـود کـه می‌تواند یک محتوا را امن نگه دارد. از جمله این سیستم‌ها می‌توان بـه اسکله‌ها، لنگرگاه‌ها، باراندازها، موج شکن‌هـا و مهارهـای شـناور اشـاره کرد. سیستم مهار صفحات خورشیدی را در جای خود نگه می‌دارد و از جابجایی و چرخش آن‌ها جلوگیری می‌کند.
- ماژول‌های PV خورشیدی: در سیستم‌های شناور معمولا از ماژول‌هـای خورشیدی کریستالی استاندارد برای سیستم هـای خورشـیدی شـناور استفاده می‌شود. با ساخت پروژه‌هایی بر روی آب های شور، اسـتفاده از ماژول‌هایی نیاز خواهد بود که توانایی مقاومت در برابـر قـرار گیـری در معرض غبار نمک در طولانی مدت را داشته باشند. تقریبا هر فلـزی بـا گذشت زمان دچار زنگ زدگی می شود در نتیجه جایگزین‌هـایی مثـل چهارچوب‌های آلومینیومی استانداردی مانند پلیمر مورد نیاز است.
- کابل ها و اتصالات: الکتریسیته تولید شده توسط آرایه‌های خورشـیدی، می‌تواند شبکه را تغذیه کرده و یا در باتری‌ها ذخیره شود. بیشتر کابـل کشـی در پـروژه‌هـای انجـام شـده تـاکنون از بـالای سـطح آب انجـام گرفته‌است. اگرچه هیچ کدام از قسمت‌های الکتریکـی در زیـر آب قـرار ندارند، اما کابل های مناسب و ارزیابی شده و جعبه‌هـای اتصـالات ضـد آب در پروژه‌های خورشیدی شناور مهم هستند. قسمت‌های الکتریکـی دیگر مانند اینورترها و باتری‌ها معمولا بر روی زمین قرار می‌گیرند و بـا آب تماس ندارند. بایستی در سیستم‌هایی که مدت طولانی مـورد بهـره برداری قرار می‌گیرند از کابل‌هایی مقاوم در برابر دمای بـالا، ضـد آب و محکم استفاده شود.

در شکل ۳ یک نمونه سیستم خورشیدی شناور نشان داده شده‌است.



شکل ۳ سیستم تولید انرژی خورشیدی شناور. (a) واحد ماژول؛ (b) دید عقب و (c) نمای جانبی **[۲۳]**

۵- تولید توان با استفاده از صفحات خورشیدی شناور

یکی از عواملی که عملکرد صفحات خورشیدی را محدود می‌کند، افزایش دمای صفحات ناشی از تابش بیش از حد خورشید و بالا بـودن دمـای محـیط است [۲۴]. یک درجه‌ی سلسـیوس افـزایش دمـا در سـلول‌هـای خورشـیدی سیلیکون منیزیم (c-Si) و پلی کریستالین (pc-Si) حـدودا ۰٫۴۵٪ بـازدهی را در سلول‌های خورشـیدی سـیلیکون منیـزیم و ۰٫۲۵٪ در پلـی کریسـتالین کاهش می‌دهد [۲۵]. امروزه، روش‌های مختلفی برای کاهش دمـای صـفحات خورشیدی وجود دارد، از جمله سیستم حرارتی خورشیدی (PVT)، استفاده از جریان آب یا هوا، با استفاده از مواد تغییر فـاز دهنـده (PCM) و غیـره –[۲۶] [۲۸]. سیستم تولید انرژی خورشیدی شناور یک سیستم تولید انرژی جدید و در حال توسعه است که به دلیل اثر خنـک کننـده‌ی آب، بهـره‌وری بـالاتری نسبت به سیستم‌های خورشیدی معمولی دارد.

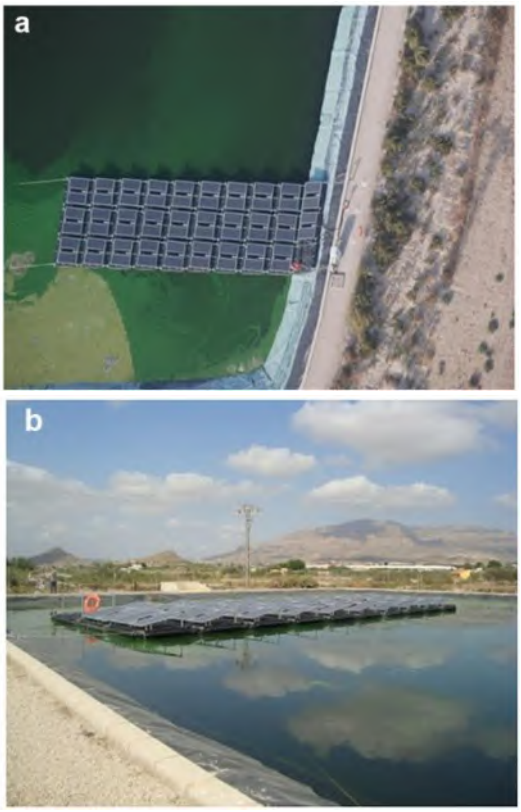
به منظور ارزیابی پتانسیل نصب صفحات خورشیدی شناور بر روی سطح آب، تراپانی و میلر[2] [۲۹] یک مطالعه امکان‌سنجی بر روی دریای جزایر مالـت ارائه کرده‌اند که نشان می‌دهد این منطقه پتانسیل نصـب ایـن سیسـتم‌هـا را دارد. در مطالعه‌ی دیگری، مشخصات اصلی طراحی و اجزای مختلف نیروگـاه خورشیدی شناور، با هدف کاهش تبخیر آب، ارائه شده‌است. همچنـین، یـک

[1] High density poly-ethylene

[2] Trapani and Miller

www.SID.ir

نمونه نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت ۲۰kWp با موفقیت بر روی یک مخزن آب آبیاری در آلیکانته در اسپانیا نصب شد که در شکل ۴ نشان داده شده است [۳۰].



شکل ۴ نمونه نصب شده بر روی دریاچه‌ی آلیکانته a) نمای هوایی b) نمای جانبی **[30]**

در سال ۲۰۱۶، ارزیابی ظرفیت نصب سیستم‌های خورشیدی شناور بر روی یک دریاچه‌ی معدن واقع در کشور کره‌ی جنوبی و شبیه‌سازی تولید انرژی با استفاده از نرم افزار مدل مشاور سیستم (SAM) ارائه شده است [۳۱]. نتایج این مطالعه نشان داد که سیستم پیشنهادی قابلیت تولید ۹۷۱,۵۷ مگاوات ساعت در سال، با پوشش ۸۷,۶۵۰ متر مربع سطح آب را دارد. در تحقیق دیگری، مزایا و معایب استفاده از صفحات خورشیدی فیلم نازک[۱](a-Si) در سیستم‌های شناور در مقایسه با صفحات خورشیدی کریستالی در سیستم‌های شناور ارائه شده‌است [۳۲]. سولانکی[۲] و همکاران [۳۳] تابش افقی متوسط جهانی و تولید برق سیستم‌های خورشیدی شناور در مناطق مختلف هند را مورد بررسی قرار دادند. رزا کلوت[۳] و همکاران [۱۳] امکان استفاده از صفحات خورشیدی در حوضچه‌های فاضلاب استرالیا را ارزیابی کردند و نتیجه گرفتند که برای حوضچه‌های فاضلاب صفحات ثابت در مقایسه با نوع دارای ردیابی مناسب‌تر هستند. در یک مطالعه‌ی امکان‌سنجی، میتال[۴] و همکاران [۳۴] نصب سیستم خورشیدی شناور ۱ مگاوات در دو مکان مختلف در هند را مورد بررسی قرار دادند. نتایج نشان داده‌است که ظرفیت تولید توان در بندر کوتا[۵] ۱۸۳۸۵۱۹ کیلووات ساعت در سال و ۱۸۵۸۹۵۹ کیلووات ساعت در سال در دریاچه کیشور ساغر[۶] بوده‌است.

باد یا سایر عوامل محیطی باعث حرکت صفحات شناور و در نتیجه موجب انحراف در زاویه می‌شود، بنابراین خروجی سیستم کاهش می‌یابد. هدف استفاده از سیستم ردیابی در سیستم شناور خورشیدی این است که تولید برق صفحات خورشیدی را به حداکثر برسانیم [۳۵]. در سال ۲۰۱۲، کاتزانیگا و همکاران [۳۶] یک سیستم خورشیدی شناور دارای ردیابی که مجهز به خنک کننده است (FTCC)[۷] را معرفی کردند که در مقایسه با سیستم‌های خورشیدی شناور معمولی کارآمدتر بود. چویی و لی[۸] [۳۷] مفاهیم اصلی طراحی و ساختار اولین نوع دارای ردیابی سیستم خورشیدی شناور را ارائه کردند. در مطالعه‌ی دیگیری، جوانب مختلف طراحی صفحات خورشیدی دارای ردیابی و استفاده از گیرنده‌ی GPS و حسگر مگنتیت زمینی در سیستم ردیابی و الگوریتم ردیابی برای کاهش خطا ناشی از تغییرات در عوامل محیطی بررسی شده است [۳۸]. یک سیستم کنترل شامل یک شبکه‌ی زیگبی[۹] ۲,۴۵ گیگاهرتز و حسگر ردیابی خورشیدی برای کنترل و یک سیستم خورشیدی شناور ۱۰۰kW توسط لی و همکاران [۲۰] پیشنهاد شده‌است. نتایج مطالعه‌ی تینا و همکاران [۳۹] نشان می‌دهد که با پوشش تنها ۱٪ از مخازن طبیعی آب برای نصب نیروگاه‌های FPV، حدود ۲۵٪ از تقاضای جهانی انرژی الکتریکی (در سال ۲۰۱۴) می‌تواند تامین شود.

بررسی مطالعات انجام گرفته نشان می‌دهد که سیستم‌های شناور خورشیدی به عنوان یک فن‌آوری جدید بسیار مورد توجه قرار گرفته‌است و با توجه به مزایای بسیار آن انتظار می‌رود که در آینده‌ای نزدیک کشورهای بیشتری از این سیستم جهت تولید توان استفاده کنند.

۶- کاهش تبخیر

با توجه به افزایش نگرانی در مورد بحران کمبود آب، کاهش میزان تبخیر آب از مخازن، به عنوان راه حلی برای کاهش اتلاف آب مورد توجه قرار گرفته است. با توجه به این که استفاده از سیستم پوشش خورشیدی شناور به کاهش تبخیر آب مخازن آب کمک می‌کند، بسیاری از مقالات به ارزیابی تاثیر این سیستم‌ها بر کاهش تبخیر آب پرداخته‌اند [۴۰] ,[۳۰]. در این راستا، فرر گیسبرت و همکاران [۶] در یک مطالعه، ۷٪ از سطح یک مخزن کشاورزی را پوشش داده‌اند که منجر به کاهش تبخیر آب شد. در مطالعه‌ای دیگر، سانتافه و همکاران [۴۱] یک بررسی روی کاهش تبخیر آب یک مخزن

[۱] Thin film
[۲] Solanki
[۳] Rosa-Clot
[۴] Mittal
[۵] Kota
[۶] Kishore Sagar
[۷] Floating tracking cooling concentrating
[۸] Choi and Lee
[۹] Zigbee

www.SID.ir

ارائه کرده‌اند که این مخزن کاملا توسط صفحات خورشیدی شناور ($۴۴۹۰ m^2$) پوشیده شده‌بود. این پوشش توانایی ذخیره‌ی ۵۰۰۰ متر مکعب آب (٪۲۵ ظرفیت ذخیره مخزن) را دارد. برآورد اثر استفاده از پوشش خورشیدی بر کاهش تبخیر آب در منطقه‌ی استرالیای جنوبی با استفاده از روش پنمان-مانتیث[۱] ارائه و نشان داده‌شده است که پوشش خورشیدی می‌تواند تبخیر آب را تا ٪۹۰ کاهش دهد [۱۳]. در برآورد دیگری که در کشور چین انجام شده‌است نشان می دهد که ظرفیت نصب نیروگاه‌های خورشیدی شناور در این کشور حدود ۱۶۰ گیگا وات است که این میزان تولید تولید نیازمند پوشش حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع از سطح آب است و این پوشش می‌تواند در این کشور تبخیر آب را سالانه 2×10^{27} متر مکعب کاهش دهد [۴۲]. تخمین زده می شود که یک نیروگاه خورشیدی شناور ۱ مگاواتی توانایی کاهش ۳۷ میلیون لیتر آب در هند را دارد [۳۴].

نتایج مطالعات انجام شده پتانسیل بالای سیستم‌های خورشیدی شناور را در کاهش تبخیر نشان می‌دهد. بنابراین با توجه به بحران آب در کشور، می‌توان از این سیستم به عنوان راه حلی برای کاهش تبخیر در مناطق خشک و کم آب استفاده کرد. نصب این سیستم‌ها بر روی مخازن آب کشاورزی و آشامیدنی علاوه بر کاهش تبخیر، با کاهش رشد جلبک‌ها کیفیت آب را نیز بالا می‌برد.

۷- کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای

امروزه، ثابت شده است که سیستم‌های خورشیدی می‌توانند به کاهش انتشار CO_2 کمک کند. در یک مطالعه نشان داده‌است که سیستم‌های خورشیدی شناور قادر به کاهش انتشار کربن به میزان ٪۲۵ برای یک کارخانه ۲۵۰ مگاواتی هستند [۲۹]. محاسبه‌ی انتشار CO_2 از سیستم‌های شناور خورشیدی نشان داده‌است که کل ردپای کربن ناشی از نصب سیستم‌های خورشیدی شناور حدود $۱۳۷,۷۳ \ kg\,CO_2/m^2$ است [۳۰]. در یک پژوهش دیگر، کاهش سالانه ناشی انتشار CO_2 ناشی از نصب سیستم خورشیدی شناور در یک دریاچه‌ی معدن محاسبه شده و نتایج نشان داده‌است که این سیستم می‌تواند از انتشار ۴۷۱,۲۱ تن کربن دی‌اکسید جلوگیری کند [۳۱]. یک بررسی در هند نشان داده‌است که سیستم‌های شناور خورشیدی می‌تواند حدود ۱,۷ تن انتشار CO_2 را در سال کاهش دهد [۳۴].

با توجه به افزایش آلودگی‌های ناشی از سوختن سوخت‌های فسیلی در کشور، سیستم‌های شناور خورشیدی می‌توانند جایگزینی برای منابع تولید انرژی بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی باشند.

۸- بررسی مسائل اقتصادی سیستم‌های خورشیدی شناور

تراپانی و همکاران [۴۳] ارزیابی فنی و اقتصادی مختلف سیستم‌های تولید انرژی دریایی از قبیل بادی فراساحلی، خورشیدی شناور، فن آوری‌های موج و انرژی جزر و مدی را ارائه کرده‌اند. از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که سیستم‌های خورشیدی شناور تشکیل شده از صفحات فیلم نازک می‌توانند از نظر اقتصادی با سیستم‌های انرژی بادی فراساحلی رقابت کنند. در مطالعات دیگر، یک مقایسه اقتصادی بین فیلم نازک و صفحات خورشیدی بلوری ارائه شده است که نشان می دهد که به دلیل این که سیستم تشکیل شده از فیلم نازک به زیرساخت‌های کمتری نیاز دارد، هزینه این سیستم‌ها کمتر است [۳۲] ,[۲۹]. سونگ و چویی[۲] [۳۱] جنبه های اقتصادی نصب صفحات خورشیدی روی سطح یک دریاچه معدن را ارزیابی کرده‌اند که نشان می‌دهد ارزش فعلی خالص ۸۹۷۰۰۰ دلار آمریکا بوده‌است و دوره بازپرداخت ۱۲,۳ سال است. هزینه نصب یک نیروگاه ۱ مگاواتی خورشیدی شناور، شامل ۳۲۰۰ صفحه‌ی خورشیدی (۳۲۰ وات) در کشور استرالیا، ارزیابی و ارائه شده‌است [۱۳].

سازه‌های شناور معمولا ٪۲۵ کل هزینه‌های ساخت نیروگاه‌های شناور را تشکیل می‌دهند اما این مقدار معمولا کمتر از هزینه‌های خرید و تهیه‌ی یک زمین معادل در منطقه است. برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی زمینی هزینه‌های نسبتا بالای زمین، کارهای عمرانی و نصب پایه‌های پایدار در تاسیسات زمینی مورد نیاز است [۹]. هزینه‌های عملیاتی و نگهداری در سیستم‌های شناور نیز اغلب در مقایسه با سیستم‌های نصب شده بر زمین کم‌تر است، زیرا آب مورد نیاز برای تمیز کردن در دسترس است و اجزای این سیستم‌ها حرارت کم‌تری دارند. خوردگی آب شور نیز به طور معمول یک مشکل تلقی نمی‌شود، زیرا اکثر سیستم‌های شناور بر روی آب‌های شیرین مانند دریاچه‌ها و مخازن قرار دارند. علاوه بر این، قرار گرفتن صفحات خورشیدی شناور در نزدیکی ساحل دسترسی به این سیستم‌ها را ساده می‌کند.

[۱] Penman-Monteith

[۲] Song and Choi

www.SID.ir

جدول ۱ خلاصه‌ی مقالات مرور شده

نویسندگان	نکات برجسته	منبع
کاتزانیکا و همکاران (۲۰۱۲)	معرفی یک سیستم خورشیدی شناور دارای ردیابی مجهز به خنک کننده که در مقایسه با سیستم‌های خورشیدی شناور معمولی کارآمدتر است.	[۳۶]
تراپانی و میلر (۲۰۱۳)	انجام یک مطالعه امکان‌سنجی که نشان می‌دهد این منطقه پتانسیل نصب سیستم‌های خورشیدی شناور را دارد.	[۲۹]
فر گیسبرت و همکاران (۲۰۱۳)	پوشاندن ۷٪ از سطح یک مخزن کشاورزی را که منجر به کاهش تبخیر آب شد.	[۶]
سانتافه و همکاران (۲۰۱۴)	ارائه‌ی مشخصات اصلی طراحی و اجزای مختلف نیروگاه خورشیدی شناور، با هدف کاهش تبخیر آب، همچنین نصب یک نمونه نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت ۲۰ kWp بر روی یک مخزن آب آبیاری در آلیکانته در اسپانیا و محاسبه کاهش تبخیر	[۳۰]
چویی و لی (۲۰۱۴)	ارائه‌ی مفاهیم اصلی طراحی و ساختار اولین نوع دارای ردیابی سیستم خورشیدی شناور	[۳۷]
چویی و همکاران (۲۰۱۴)	بررسی جوانب مختلف طراحی صفحات خورشیدی دارای ردیابی و استفاده از گیرنده‌ی GPS و حسگر مگنتیت زمینی در سیستم ردیابی	[۳۸]
لی و همکاران (۲۰۱۴)	پیشنهاد یک سیستم کنترل شامل یک شبکه‌ی زیگبی ۲٫۴۵ گیگاهرتز و حسگر ردیابی خورشیدی برای کنترل و یک سیستم خورشیدی شناور ۱۰۰ kW	[۲۰]
سونگ و چویی (۲۰۱۶)	شبیه‌سازی و ارزیابی ظرفیت نصب و تولید انرژی سیستم‌های خورشیدی شناور بر روی یک دریاچه‌ی معدن واقع در کره‌ی جنوبی با استفاده از نرم افزار SAM	[۳۱]
تراپانی و میلر (۲۰۱۶)	ارائه‌ی مزایا و معایب استفاده از صفحات خورشیدی فیلم نازک (a-Si) در سیستم‌های شناور در مقایسه با صفحات خورشیدی کریستالی در سیستم‌های شناور	[۳۲]
سولانکی و همکاران (۲۰۱۷)	بررسی تابش افقی متوسط جهانی و تولید برق سیستم‌های خورشیدی شناور در مناطق مختلف هند	[۳۳]
رزا کلوت و همکاران (۲۰۱۷)	ارزیابی امکان استفاده از صفحات خورشیدی در حوضچه‌های فاضلاب استرالیا و نشان دادن این صفحات ثابت در مقایسه با نوع دارای ردیابی که برای حوضچه‌های فاضلاب مناسب‌تر هستند.	[۱۳]
میتال و همکاران (۲۰۱۷)	بررسی امکان نصب سیستم خورشیدی شناور ۱ مگاوات در دو مکان مختلف در هند	[۳۴]
لیو و همکاران (۲۰۱۷)	برآورد ظرفیت نصب نیروگاه‌های خورشیدی شناور در این کشور چین که حدودا ۱۶۰ گیگا وات تخمین زده شده‌است و این میزان تولید نیازمند پوشش حدود ۲۵۰۰ کیلومتر مربع از سطح آب است که می‌تواند تبخیر آب را سالانه 2×10^{27} متر مکعب کاهش دهد.	[۴۲]
تینا و همکاران (۲۰۱۸)	نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که با پوشش تنها ۱٪ از مخازن طبیعی آب برای نصب نیروگاه‌های FPV، حدود ۲۵٪ از تقاضای جهانی انرژی الکتریکی (در سال ۲۰۱۴) می‌تواند تامین شود.	[۳۹]

www.SID.ir

۹- نتیجه‌گیری

سیستم شناور خورشیدی سیستمی جدید است که علاوه بر تولید انرژی مزایای دیگری مانند کاهش تبخیر سطحی، کاهش تولید گازهای گلخانه‌ای، عدم اشغال زمین و بسیاری مزایای دیگر را به همراه دارد. با توجه به افزایش تقاضای برق و همچنین کمبود منابع آب و مشکلات آلودگی هوا در کشور، نیروگاه‌های خورشیدی شناور می‌توانند راه حلی برای این مشکلات باشد. احداث این نیروگاه‌ها در مقیاس بزرگ می‌تواند جایگزینی برای نیروگاه‌های بر پایه‌ی سوخت‌های فسیلی باشند. این سیستم را می‌توان بر روی مخازن آب آبیاری، دریاچه‌های معدن، سدها، مخازن آب آشامیدنی و ... نصب کرد. در این مقاله به مرور مطالعات انجام گرفته در زمینه تولید توان سیستم‌های خورشیدی شناور پرداخته شد، علاوه بر آن تاثیر استفاده از این سیستم‌ها بر روی کاهش تبخیر سطحی و انتشار گازهای گلخانه‌ای و همچنین مسائل اقتصادی این سیستم مورد بررسی قرار گرفت.

نتایج بررسی نشان می‌دهد که قرارگیری صفحات خورشیدی بر روی آب حدود ۱۲٪ بازدهی سیستم را افزایش می‌دهد. هم‌چنین سیستم‌های خورشیدی شناور قابلیت کاهش تبخیر سطحی آب تا ۹۰٪ را دارا می‌باشند.

با مطالعه‌ی مقالات انجام شده می‌توان پیشنهادات زیر را برای مطالعات آینده مطرح کرد:

- تحقیق در مورد طراحی و تقویت سیستم شناور که پایداری و مقاومت بیشتری را در برابر امواج دریایی داشته باشد تا بتوان نصب این سیستم‌ها بر روی دریا را گسترش داد.
- تاثیر آب شور بر ساختار و عملکرد صفحه‌ی خورشیدی باید مورد بررسی قرار گیرد.
- بیش‌تر پروژه‌های انجام شده شامل صفحات خورشیدی سفت و سخت کریستالی هستند که مقاومت کمی در برابر شرایط سخت آبی دارند، بنابراین تحقیقات در زمینه فن‌آوری صفحات خورشیدی فیلم نازک انعطاف پذیر برای چنین شرایط سخت ضروری است.
- اقدامات ایمنی مناسب برای انتقال توان از آب به زمین باید مورد مطالعه قرار گیرد.
- تاثیر نصب سیستم‌های خورشیدی شناور بر روی محیط زیست و کیفیت آب باید با دقت مورد بررسی قرار گیرد.

۱۰- منابع

[1] eia, “Electricity in the United States,” *U.S. Energy Information Administration*, 2017 .

[2] I. Craig, A. Green, M. Scobie, and E. Schmidt, *Controlling Evaporation Loss from Water Storages*, no. 1000580/1. 2005, p. 207.

[3] G. K. X. Melvin, “Experimental study of the effect of floating solar panels on reducing evaporation in Singapore reservoirs,” NATIONAL UNIVERSITY OF SINGAPORE, 2015.

[4] S. Minamino, “floating solar plants: niche rising to the surface?,” *Solarplaza*, 2016 .

[5] Y. Ueda, T. Sakurai, S. Tatebe, A. Itoh, and K. Kurokawa, “Performance Analysis of Pv Systems on the Water,” in *23rd European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, 2008, no. September, pp. 1–5.

[6] C. Ferrer-Gisbert, J. J. Ferrán-Gozálvez, M. Redón-Santafé, P. Ferrer-Gisbert, F. J. Sánchez-Romero, and J. B. Torregrosa-Soler, “A new photovoltaic floating cover system for water reservoirs,” *Renew. Energy*, vol. 60, pp. 63–70, Dec. 2013.

[7] M. E. Taboada, L. Cáceres, T. A. Graber, H. R. Galleguillos, L. F. Cabeza, and R. Rojas, “Solar water heating system and photovoltaic floating cover to reduce evaporation: Experimental results and modeling,” *Renew. Energy*, vol. 105, pp. 601–615, May 2017.

[8] K. Trapani and M. Redón Santafé, “A review of floating photovoltaic installations: 2007-2013,” *Prog. Photovoltaics Res. Appl.*, vol. 23, no. 4, pp. 524–532, Apr. 2015.

[9] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, “Floating photovoltaic power plant: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 66, pp. 815–824, Dec. 2016.

[10] S.-H. Kim, S.-J. Yoon, W. Choi, and K.-B. Choi, “Application of Floating Photovoltaic Energy Generation Systems in South Korea,” *Sustainability*, vol. 8, no. 12, p. 1333, Dec. 2016.

[11] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, “Floating photovoltaic plants: Performance analysis and design solutions,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 81, pp. 1730–1741, Jan. 2018.

[12] E. M. G. Rodrigues, R. Melício, V. M. F. Mendes, and J. P. S. Catalão, “Simulation of a solar cell considering single-diode equivalent circuit mode,” *Renew. Energy Power Qual. J.*, pp. 369–373, May 2011.

[13] M. Rosa-Clot, G. M. Tina, and S. Nizetic, “Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project,” *Energy Procedia*, vol. 134, pp. 664–674, Oct. 2017.

[14] T. S. Hartzell, “Evaluating potential for floating solar installations on Arizona water management infrastructure,” The University of Arizona, 2016.

[15] B. Prouvost, “Creating the ultimate hybrid system by mixing solar energy and hydroelectricity,” *renewableenergyfocus*, 2017. .

[16] T. WOODY, “Solar on the Water,” *Retrieved from The New York Times*, 2011. .

[17] K. Trapani, S. Martens, K. Challagulla, S. Yong, D. Millar, and S. Maloney, “Water absorption characterisation, electrical reliability and mechanical testing of a submerged laminated a-Si thin film photovoltaic (PV) cells,” *Microelectron. Reliab.*, vol. 54, no. 11, pp. 2456–2462, Nov. 2014.

[18] M. Rosa-Clot and G. M. Tina, “Submerged PV Systems,” in *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, Elsevier, 2018, pp. 65–87.

[19] R. Cazzaniga, M. Cicu, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, G. M. Tina, and C. Ventura, “Compressed air energy storage integrated with floating photovoltaic plant,” *J. Energy Storage*, vol. 13, pp. 48–57, Oct. 2017.

[20] A. Lee, G. Shin, S. Hong, and Y. Choi, “A study on development of ICT convergence technology for tracking-type floating photovoltaic systems,” *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 80–87, 2014.

www.SID.ir

"Floating tracking cooling concentrating (FTCC) systems," in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, 2012, pp. 000514–000519.

[37] Y.-K. Choi and Y.-G. Lee, "A study on development of rotary structure for tracking-type floating photovoltaic system," *Int. J. Precis. Eng. Manuf.*, vol. 15, no. 11, pp. 2453–2460, Nov. 2014.

[38] Y.-K. Choi, I.-S. Kim, S.-T. Hong, and H. Lee, "A study on development of azimuth angle tracking algorithm for tracking-type floating photovoltaic system," *Adv. Sci. Technol. Lett.*, vol. 51, no. 45, pp. 197–202, 2014.

[39] G. Tina, R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, and P. Rosa-Clot, "Geographic and technical floating photovoltaic potential," *Therm. Sci.*, vol. 22, no. Suppl. 3, pp. 831–841, 2018.

[40] G. D. Pimentel Da Silva and D. A. C. Branco, "Is floating photovoltaic better than conventional photovoltaic? Assessing environmental impacts," *Impact Assess. Proj. Apprais.*, vol. 36, no. 5, pp. 390–400, Sep. 2018.

[41] M. R. Santafé *et al.*, "Implementation of a photovoltaic floating cover for irrigation reservoirs," *J. Clean. Prod.*, vol. 66, no. 1, pp. 568–570, Mar. 2014.

[42] L. Liu, Q. Wang, H. Lin, H. Li, Q. Sun, and R. Wennersten, "Power Generation Efficiency and Prospects of Floating Photovoltaic Systems," *Energy Procedia*, vol. 105, pp. 1136–1142, May 2017.

[43] K. Trapani, D. L. Millar, and H. C. M. Smith, "Novel offshore application of photovoltaics in comparison to conventional marine renewable energy technologies," *Renew. Energy*, vol. 50, pp. 879–888, Feb. 2013.

[21] K. Trapani and D. L. Millar, "The thin film flexible floating PV (T3F-PV) array: The concept and development of the prototype," *Renew. Energy*, vol. 71, pp. 43–50, Nov. 2014.

[22] Y. Choi, N.-H. Lee, A. Lee, and K. Kim, "A study on major design elements of tracking-type floating photovoltaic systems," *Int. J. Smart Grid Clean Energy*, vol. 3, no. 1, pp. 70–74, 2014.

[23] Y.-G. Lee, H.-J. Joo, and S.-J. Yoon, "Design and installation of floating type photovoltaic energy generation system using FRP members," *Sol. Energy*, vol. 108, pp. 13–27, Oct. 2014.

[24] A. Akbarzadeh and T. Wadowski, "Heat pipe-based cooling systems for photovoltaic cells under concentrated solar radiation," *Appl. Therm. Eng.*, vol. 16, no. 1, pp. 81–87, Jan. 1996.

[25] S. A. A. Kalogirou and Y. Tripanagnostopoulos, "Hybrid PV/T solar systems for domestic hot water and electricity production," *Energy Convers. Manag.*, vol. 47, no. 18–19, pp. 3368–3382, Nov. 2006.

[26] K. A. Moharram, M. S. Abd-Elhady, H. A. Kandil, and H. El-Sherif, "Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling," *Ain Shams Eng. J.*, vol. 4, no. 4, pp. 869–877, Dec. 2013.

[27] A. Hasan, S. McCormack, M. Huang, and B. Norton, "Energy and Cost Saving of a Photovoltaic-Phase Change Materials (PV-PCM) System through Temperature Regulation and Performance Enhancement of Photovoltaics," *Energies*, vol. 7, no. 3, pp. 1318–1331, Mar. 2014.

[28] P. Hysek, "Methods to Reduce the Operating Temperature of Photovoltaic Cells," *Appl. Mech. Mater.*, vol. 820, pp. 224–229, Jan. 2016.

[29] K. Trapani and D. L. Millar, "Proposing offshore photovoltaic (PV) technology to the energy mix of the Maltese islands," *Energy Conversion and Management*, vol. 67. pp. 18–26, 2013.

[30] M. Redón Santafé, J. B. Torregrosa Soler, F. J. Sánchez Romero, P. S. Ferrer Gisbert, J. J. Ferrán Gozálvez, and C. M. Ferrer Gisbert, "Theoretical and experimental analysis of a floating photovoltaic cover for water irrigation reservoirs," *Energy*, vol. 67, pp. 246–255, Apr. 2014.

[31] J. Song and Y. Choi, "Analysis of the Potential for Use of Floating Photovoltaic Systems on Mine Pit Lakes: Case Study at the Ssangyong Open-Pit Limestone Mine in Korea," *Energies*, vol. 9, no. 2, p. 102, Feb. 2016.

[32] K. Trapani and D. L. Millar, "Floating photovoltaic arrays to power the mining industry: A case study for the McFaulds lake (Ring of Fire)," *Environ. Prog. Sustain. Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 898–905, May 2016.

[33] C. Solanki, G. Nagababu, and S. S. Kachhwaha, "Assessment of offshore solar energy along the coast of India," *Energy Procedia*, vol. 138, pp. 530–535, Oct. 2017.

[34] D. Mittal, B. K. Saxena, and K. V. S. Rao, "Floating solar photovoltaic systems: An overview and their feasibility at Kota in Rajasthan," in *2017 International Conference on Circuit ,Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, 2017, pp. 1–7.

[35] M. Rosa-Clot and G. M. Tina, "The Floating PV Plant," in *Submerged and Floating Photovoltaic Systems*, Elsevier, 2018, pp. 89–136.

[36] R. Cazzaniga, M. Rosa-Clot, P. Rosa-Clot, and G. M. Tina,

www.SID.ir