

تاریخ دریافت: ۲۴ آبان ۱۴۰۱ | تاریخ پذیرش: ۱۶ بهمن ۱۴۰۱ | صفحات ۳۰ الی ۵۴

## شیوه سازی یک نیروگاه خورشیدی شناور بروی حوضچه تصفیه فاضلاب مورد مطالعه: تصفیه فاضلاب شماره ۱ شیراز

### اسماعیل ارجمند

دانشجوی کارشناسی ارشد، گروه مهندسی انرژی تجدید پذیر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران

Arjmand.esmaeil@gmail.com

### سامان تشك

استادیار، گروه مهندسی انرژی تجدید پذیر، واحد شیراز، دانشگاه آزاد اسلامی، شیراز، ایران (نویسنده مسئول)  
saman.tashakor@yahoo.com

**چکیده:** رشد و توسعه جوامع بشری همواره با افزایش تولید و مصرف انرژی همراه بوده است. توسعه سریع و پایدار در هر کشوری نیازمند برقراری تعادلی پویا و پایا بین مقوله های فنی، اقتصادی، اجتماعی و زیست محیطی همزمان با درنظر گرفتن شرایطی است که موجب مخاطره یا کاهش فرصت های پیش رو برای پیشرفت نگردد. در این پژوهش از یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور جهت تأمین توان تصفیه خانه فاضلاب واقع در شهر شیراز استفاده گردیده است. اثر سرمایشی آب باعث افزایش راندمان نیروگاه در حدود ۵ الی ۱۵ درصد می گردد و نیروگاه فتوولتائیک شناور با ایجاد پوشش سطحی آب، از تبخیر سطحی آب تا حدود ۹۰ درصد جلوگیری می کند.

**واژه‌های کلیدی:** نیروگاه خورشیدی شناور، آب خاکستری، نرم افزار PVsyst، افزایش بازده نیروگاه خورشیدی

## ۱. مقدمه

سوخت‌های فسیلی به این دلیل که روزی به پایان خواهند رسید و با دارا بودن آلایندگی فراوان نمی‌تواند به عنوان یک منبع پایدار و مطمئن انرژی قلمداد شود. در حال حاضر برای رشد و توسعه پایدار جوامع بشری، تأمین انرژی مورد نیاز از منابع متنوعی صورت می‌گیرد که بخشی از این انرژی مورد نیاز از محل انرژی‌های نو و تجدیدپذیر تأمین می‌گردد. در این پژوهش بمنظور تصفیه آب خاکستری و پساب فاضلاب تصفیه خانه در شهر شیراز از یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور استفاده می‌گردد که علاوه بر جلوگیری از تبخیر آب، راندمان نیروگاه نیز افزایش می‌یابد. با توجه به اینکه برخی پارامترهای محیطی تاثیرگذار بر توان تولیدی پنل‌های فتوولتائیک برای نیروگاه‌های نصب شده در خشکی و بر روی سطح آب متفاوت از یکدیگر می‌باشند بمنظور اثرگذاری این پارامترها در این طراحی از تیم طراح نرم افزار pvsyst واقع در دانشگاه ژنو سوئیس کمک‌های لازم گرفته شده است. پارامترهای محیطی مانند دمای محیط و میزان تابش منطقه‌ای بیشترین تاثیر را بر روی راندمان نیروگاه فتوولتائیک دارند.

ایران با داشتن بیش از ۳۰۰ روز افتابی در سال و میانگین تابش ۱۸۰۰ الی ۲۲۰۰ کیلووات ساعت در سال دارای تابشی بالاتر از میانگین جهانی است که از نظر میزان تابش سالانه خورشیدی یک منطقه ایده‌آل برای نصب نیروگاه‌های خورشیدی می‌باشد. شیراز به دلیل قرار گرفتن در رشته کوه های زاگرس دارای آب و هوای معتدل می‌باشد. میانگین دمای هوای شهر شیراز در تیرماه (گرم ترین ماه سال) ۳۰ درجه سانتی گراد و در دی ماه (سرد ترین ماه سال) ۵ درجه سانتی گراد می‌باشد. میانگین دما در فروردین ماه ۱۷ درجه سانتی گراد و در مهرماه ۲۰ درجه سانتی گراد می‌باشد. میانگین دمای سالانه در شهر شیراز ۱۸ درجه سانتی گراد می‌باشد. بیشترین دمای ثبت شده در شهر شیراز تا کنون ۴۳/۲ درجه سانتی گراد می‌باشد و کمترین دمای ثبت شده ۱۴- درجه سانتی گراد می‌باشد.

تا کنون تحقیقات گستردۀ ای در زمینه نیروگاه‌های فتوولتائیک شناور صورت گرفته که بخشی از این تحقیقات در زیر قابل مشاهده می‌باشد.

پرز و همکاران (۲۰۱۸) مقایسه ای بین تکنولوژی فتوولتائیک شناور و سایر تکنولوژی‌های انرژی تجدیدپذیر انجام دادند و در محاسن فتوولتائیک شناور بیان می‌کنند که این سامانه تبخیر، رشد جلبک ها، تشکیل امواج و اثرات فرسایش همراه را کاهش می‌دهد. موارد حائز اهمیت دیگر در خصوص تبخیر نشان داد که دریاچه‌های عمیق تر نسبت به دریاچه‌های با عمق کمتر، میزان تبخیر آب کمتری دارند [۱].

ساهو و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به مطالعه در خصوص نیروگاه‌های تولید الکتریسیته پرداختند و تمرکز اصلی را بر روی نیروگاه‌های فتوولتائیک شناور قرار دادند. در ابتدا یک طبقه بندی برای سیستم‌های فتوولتائیک شناور جهت نوع نصب ارائه نمودند. در این تحقیق روش‌های نصب سیستم‌های فتوولتائیک به چهار دسته تقسیم شده است که شامل نصب بر روی زمین، نصب بر روی پشت بام، نصب بر روی کانال‌ها و نصب به صورت شناور بر روی سطح آب می‌باشد. در نتایج بدست امده به طور متوسط راندمان پنل‌های خورشیدی از نوع شناور ۱۱ درصد بیشتر از پنل‌های خورشیدی نصب شده بر روی زمین اعلام شد [۲].

ژو و همکاران (۲۰۲۰) پژوهشی برای اثر نصب شناور فتوولتائیک در هم افزایی بین پیوندهای آب، غذا و انرژی انجام دادند. برای حل این مسئله مدل بهینه سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه سازی ملخ برای به حداقل رساندن همزمان توان خروجی نیروگاه فتوولتائیک شناور و میزان حجم آب مخزن هم از لحاظ میزان ذخیره آب و هم تولید محصولات کشاورزی تشکیل دادند. مطالعه موردی این تحقیق در حوضچه آبریزی در شمال کشور تایلند بود. مدل بهینه سازی پیشنهادی در این تحقیق توانست هر کدام از سه هدف ذخیره آب، تولید مواد غذایی و توان نیروگاه فتوولتائیک شناور را بیش از ۱۰ درصد بهبود بخشد. در این تحقیق همچنین زاویه مناسب نصب صفحات خورشیدی محاسبه شد که

برای زمستان و تابستان متفاوت هستند. با توجه به مایل تر بودن خورشید در زمستان نسبت به تابستان زوایای بهینه نصب برای تابستان و زمستان به ترتیب  $11/9$  و  $44/3$  درجه برآورد شد.<sup>[۳]</sup> روزا کلوتا و همکاران (۲۰۱۷) در تحقیقی نیروگاه‌های فتوولتائیک شناور و حوضچه‌های فاضلاب را در پروژه‌های استرالیایی‌ها مورد بررسی قرار دادند و در نتیجه گیری شان علاوه بر تولید انرژی، کاهش بسیار زیادی در نرخ تبخیر آب به دست آوردن. (مقدار  $15000$  الی  $25000$  متر مکعب صرفه جویی در آب به ازای هر مگاوات پنل)<sup>[۴]</sup>.

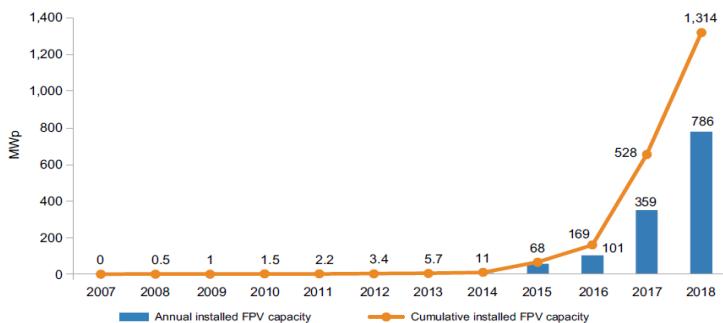
## ۱-۲ نیروگاه خورشیدی شناور

طبق مطالعات الوک ساهو و همکارانش<sup>[۵]</sup> پنج نوع روش نصب برای سیستم‌های فتوولتائیک می‌توان تعریف کرد که عبارتند از :

- نصب روی زمین
- نصب روی پشت بام
- نصب روی کاناال
- نصب در ساحل
- نصب به صورت شناور روی آب ( FPV )

در بسیاری از کشورها، منابع زمینی محدود هستند و نمی‌توان سیستم‌های فتوولتائیک خورشیدی را در مقیاس‌های بزرگ به کار گرفت. علاوه بر آن، پشت بام ساختمان‌های مسکونی، تجاری و صنعتی، کاربرد قابل توجهی برای نصب پنل‌های خورشیدی در مقیاس بزرگ ندارند. به همین دلیل، توجه‌های به سمت سیستم‌های فتوولتائیک شناور جلب شده است. چرا که راه حل اکولوژیکی خوبی به نظر می‌رسند. فتوولتائیک‌های خورشیدی شناور، امروزه با عنوان فلوبولتائیک نیز شناخته می‌شوند.<sup>[۶]</sup>

وقتی مساحت قابل توجهی از یک صفحه فتوولتائیک خورشیدی بر روی حجمی از آب قرار می‌گیرد، سیستم فلوتوولتائیک با کاهش تبخیر، به حفظ آب کمک می‌کند. در عین حال، سایه ای که پنل‌ها می‌سازند، رشد جلبک‌ها در آب را محدود می‌کند. این سیستم، هیچ خطری برای حیات وحش و زیستگاه‌های اطرافش ایجاد نمی‌کند. مهمتر از همه اینکه، خنک کنندگی طبیعی که آب برای این پنل‌های فتوولتائیک ایجاد می‌کند، به آنها اجازه می‌دهد تا بازدهی بیشتری داشته باشند و بیش از سیستم‌های سنتی، توان تولید کنند. یکی از مزایای اصلی نیروگاه‌های خورشیدی شناور فرسایش و خوردگی بخش شناور سازه و قسمت‌های فلزی آنها در محیط خورنده دریابی می‌باشد که با استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی می‌توان تا حدی خوردگی را تعویق اندانخت.<sup>[۷]</sup> ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های خورشیدی شناور در جهان در بین سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۸ در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد.<sup>[۸]</sup>



شکل ۱. ظرفیت نصب شده نیروگاه خورشیدی شناور در جهان از سال ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۸

### ۳-۱ مزایا و معایب نیروگاه خورشیدی شناور

#### - مزایای نیروگاه‌های خورشیدی شناور<sup>[۵]</sup> :

افزایش بازدهی صفحات خورشیدی، کاهش نرخ تبخیر آب، افزایش بهره وری زمین، افزایش پتانسیل تولید سدهای برق آبی، تنوع زیستی مخزن

## ۲- معاييپ نيروگاه هاي خورشيدی شناور [۹]:

- اين سистем در معرض خطراتي مانند جزر و مد، طوفان، امواج دريا، سيكلون ها و سونامي است.
- خوردگي ساختار فلزی و اجزاي سازنده که می تواند عمر سیستم را کاهش دهد.
- کاهش نفوذ نور خورشید به درون آب که ممکن است بر رشد حیوانات آبزی و جلبک های دریایی و غیره تاثیر بگذارد.
- فعالیت‌هایی مانند ماهی‌گیری و سیستم حمل و نقل آبی ممکن است تحت تاثیر قرار گیرند.

## ۱-۴ اجزاي تشکيل دهنده ي سیستم‌های خورشيدی شناور

اجزای نيروگاه هاي خورشيدی شناور شامل پل هاي شناور يا جداگتنده هاي شناور، سیستم مهار، صفحات خورشيدی، اينورتر و كابل هستند [۱۰].

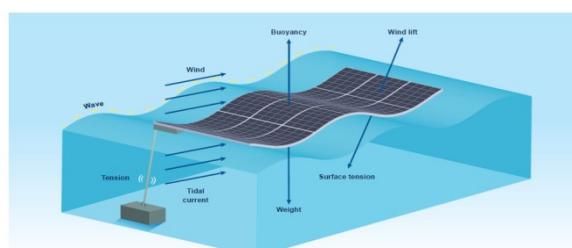
۱- سیستم شناور: سیستم شناور وسیله‌ای است که برای نگه داری تعداد مناسب پنل های خورشیدی که به صورت سری و موازی با توجه به نیاز و فضای موجود، به هم وصل شده‌اند، به کار می‌رود. این سیستم شامل سازه و بخش شناور می‌باشد. سیستم شناور از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

- ❖ شناورها : شناور، جسمی است که روی آب می‌ماند و به عنوان یک پایه برای نصب پنل خورشیدی هم عمل می‌کند. این شناور، شامل اجزایی است که کابل‌های مورینگ<sup>۱</sup> را ثابت نگه می‌دارند.
- ❖ پایه ایستاده : وقتی به شناور متصل شود، به عنوان یک پایه عمل می‌کند که زاویه شیب پنل های خورشیدی را در حالت معینی نگه می‌دارد.
- ❖ پل ها : پل، شناورها را به یکدیگر متصل کرده، و در حین فرآیند ساخت و تعمیر و نگهداری پنل های خورشیدی به عنوان جای پا برای افراد پیمانکار عمل می‌کند.

- ❖ باندهای اتصال : باند اتصال، شناورها را به هم متصل نگه می دارد. دو نوع از این باندها در دسترس هست که بار فشار باد را تنظیم می کنند.
- ❖ کمربندهای لنگری : این کمربندها، قلاب های پنل خورشیدی را به شناورها متصل می کنند.
- ❖ قلاب های پنل خورشیدی : قلاب های ثبیت کننده، به کمربندهای شناور متصل می شوند و به عنوان ثبیت کننده پنل های خورشیدی در مکان مورد نظر عمل می کنند.

شناورهای پلاستیکی با نیروی شناوری موثر نسبت به وزن خود که چندین بار با هم ترکیب شده اند و یک پل شناور بزرگ را تشکیل داده اند معمولاً از پلی اتیلن سنگین ساخته شده اند که به دلیل قدرت تنفس آن، مقاومت بالا، مقاومت در برابر UV و خوردگی از ان استفاده می شود. الیاف شیشه تقویت شده پلاستیکی (GRP) می تواند برای ساخت و ساز سکوی شناور استفاده شود.

۲- سیستم مهار : سیستم مهار به هر ساختار دائمی گفته می شود که می تواند یک محظوا را امن نگه دارد. از جمله این سیستم ها می توان به اسکله ها، لنگرگاه ها، باراندازها، موج شکن ها و مهارهای شناور اشاره کرد. سیستم مهار صفحات خورشیدی را در جای خود نگه می دارد و از جابجایی و چرخش آنها جلوگیری می کند. سیستم مورینگ (mooring) می تواند در عین حال که موقعیت سیستم را در جهت رو به جنوب حفظ می کند سیستم را در جهت رو به جنوب حفظ می کند، با افت و خیزهای سطح آب نیز هماهنگ شود. در شکل (۲) نیروهای وارد بر یک نیروگاه خورشیدی شناور قابل مشاهده می باشد.



شکل ۲. نیروهای وارد بر یک نیروگاه شناور خورشیدی

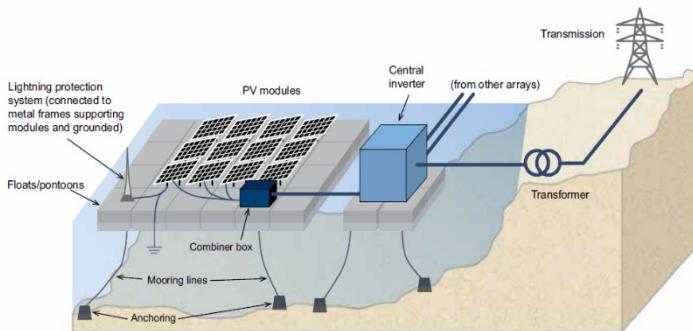
سازه نیروگاه خورشیدی شناور توسط کابل‌های لنگر اندازی (mooring line) به سازه‌های بتی در کف آب (anchoring) که به عنوان لنگرگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند متصل می‌شوند و از وارد شدن تنفس به سازه شناور و حرکت کردن آن روی سطح آب و چرخیدن سازه توسط نیروی باد و امواج جلوگیری می‌کند. نیروهای تاثیرگذار بر نیروگاه خورشیدی شناور شامل نیروی باد به صورت افقی (wind), نیروی باد به صورت بالا رونده (wind lift)، نیروی امواج (wave)، نیروی وزن سازه (weight)، نیروی کشش سطحی (surface tension)، نیروی شناوری (buoyancy)، جریان (current)، جز و مدي (tidal current)، می‌باشند.

### ۳- پنل‌های فتوولتاویک خورشیدی

برای ساخت پروژه‌هایی بر روی آب‌های شور، استفاده از پنل‌هایی نیاز خواهد بود که توانایی مقاومت در برابر قرار گیری در معرض غبار نمک در طولانی مدت را داشته باشند. تقریباً هر فلزی با گذشت زمان دچار زنگ زدگی می‌شود در نتیجه جایگزین‌هایی مانند چهارچوب‌های آلومینیومی استاندارد مورد نیاز است.

### ۴- کابل‌ها و اتصالات

بیشتر کابل کشی در پروژه‌های انجام شده تاکنون از بالای سطح آب انجام گرفته است. اگرچه هیچ کدام از قسمت‌های الکتریکی در زیر آب قرار ندارند، اما کابل‌های مناسب و ارزیابی شده و جعبه‌های اتصالات ضدآب در پروژه‌های خورشیدی شناور مهم هستند. قسمت‌های الکتریکی دیگر مانند اینورترها و باتری‌ها معمولاً بر روی زمین قرار می‌گیرند و با آب تماس ندارند. در شکل (۳) نمای یک نیروگاه خورشیدی شناور قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۳. نمای کلی تجهیزات یک نیروگاه خورشیدی شناور

## ۱-۵ آب خاکستری و فاضلاب

آب خاکستری معمولاً به فاضلاب تولیدی از روش‌بی، حمام، ماشین لباسشویی و ظرفشویی آشپزخانه‌ها اطلاق می‌گردد که در مبدأ از فاضلاب دستشویی و توالت تفکیک شده باشد، هرچند در بعضی از مطالعات پس از تولیدی آشپزخانه‌ها به واسطه بارآلی بالا در دسته بندي آب خاکستری قرار نگرفته است. آب خاکستری براساس نوع استفاده در کشورهای گوناگون ۳۰٪ تا ۸۰٪ فاضلاب تولیدی را شامل می‌شود. امروزه به واسطه بارمیکروبی پایین آب خاکستری، تصفیه و بازیافت آن در جهان مخصوصاً در کشورهایی که با بحران آبی رو به رو می‌باشند، مورد توجه جدی قرار گرفته است. بازیافت آب خاکستری علاوه بر ایجاد یک منبع جایگزین برای مصارفی نظیر فلاش تانک‌ها و آبیاری موجب کاهش بار ورودی به تصفیه خانه‌های فاضلاب و کاهش هزینه‌های انتقال می‌گردد. تا سال ۲۰۰۵ بیش از ۳۰۰۰ پروژه بازیافت آب در جهان در حال بررسی بود که اکثر این پروژه‌ها در ژاپن (۱۸۰۰ پروژه)، آمریکا (۴۵۰) پروژه و استرالیا (۳۰۰) صورت پذیرفت. طی یک بررسی نشان داده شد، در صورت اجرای طرح‌های بازگردانی آب بین ۱ تا ۱۷٪ در مصرف آب تازه در کشورهای عضو اتحادیه اروپا صرفه جویی رخ خواهد داد.<sup>[۱]</sup>

## ۶- تصفیه آب خاکستری و فاضلاب

تصفیه آب خاکستری و فاضلاب به سه روش صورت می‌گیرد. در بعضی مواقع از روش‌های ترکیبی برای تهیه آب با کیفیت بهتر استفاده می‌شود: تصفیه فیزیکی، تصفیه شیمیایی، تصفیه بیولوژیکی

## ۷- تبخیر آب

به طور کلی تبخیر به تغییرات انرژی گرمایی و فشار بخار واپسیه است که خود تابعی از دما، سرعت باد، فشار اتمسفر، تابش خورشید، کیفیت آب و هندسه منبع آب است. به همین ترتیب این فاکتورها به عوامل دیگری از جمله موقعیت جغرافیایی و زمان بستگی دارند. میزان تبخیر سطحی آب در شهر شیراز ۱۴۱۹/۱ میلی متر در سال می‌باشد [۱۲]. مدل‌های تحلیلی و تجربی متعدد برای مدل کردن فرایند بسیار پیچیده تبخیر ارائه شده اند که انتخاب آنها با توجه به منطقه مورد مطالعه، داده‌های اقلیمی قابل اندازه گیری و دقت مورد انتظار انجام می‌شود. کنترل تبخیر نیز به روش‌های مختلفی از جمله بیولوژیکی، شیمیایی و فیزیکی انجام می‌گیرد. برای محاسبه میزان تبخیر سطحی آب از یک تست آب بعنوان مرجع برای بدست اوردن ضریب تبخیر سطحی استفاده می‌شود. میزان تبخیر سطحی آب از رابطه زیر قابل محاسبه می‌باشد.

$$E = K_1 \times E_{pan}$$

در رابطه بالا  $E$  تبخیر از سطح ازاد آب،  $E_{pan}$  میزان تبخیر از تست آب،  $K_1$  ضریب تبخیر که بین ۰/۰ الی ۰/۸ می‌باشد.

## ۲. روش تحقیق

در این طراحی یک نیروگاه خورشیدی شناور بر روی حوضچه تصفیه فاضلاب شهر شیراز انجام می‌شود و نتایج حاصل از طراحی و توان خروجی نیروگاه با نیروگاه دیگری در همان منطقه جغرافیایی که در خشکی نصب گردیده است مقایسه می‌شود. توان و تجهیزات مورد استفاده در هر دو نیروگاه یکسان می‌باشد. تصفیه خانه شماره یک فاضلاب شیراز در زمینی به مساحت تقریبی ۷۲ هکتار در ناحیه جنوب شرقی شیراز واقع شده است. این محل در طرح اولیه مشاور برای جمعیت ۹۰۰/۰۰۰ نفر مشتمل بر سه مدول ۳۰۰/۰۰۰ نفری بوده که در حال حاضر اولین مدول آن اجرا گردیده است. دبی متوسط تصفیه خانه ۱۳۶۰ لیتر در ثانیه و حداکثر دبی خطوط انتقال تصفیه خانه ۲۶۰۰ لیتر در ثانیه می‌باشد. ایستگاه پمپاژ ورودی شامل سه دستگاه پمپ حلزونی (اسکروپمپ) می‌باشد که ظرفیت هر پمپ ۷۵۰ لیتر در ثانیه است. این تصفیه خانه ظرفیت تصفیه روزانه ۱۰۰ هزار متر مکعب فاضلاب را دارا می‌باشد. با توجه به اجرای مرحله اول تصفیه خانه برای اجرای مرحله دوم می‌توان از طرح نیروگاه شناور استفاده کرد. با احداث یک حوضچه با ابعاد ۱۵۰\*۱۵۰ متر و به عمق ۳ متر می‌توان ۶۷۵۰۰ متر مکعب آب ذخیره کرد که سطح استخر برابر با ۲۲۵۰۰ متر مربع می‌باشد. برای احداث نیروگاه خورشیدی شناور به ظرفیت MW ۱ به فضایی در حدود ۱۵۰۰۰ متر مربع نیاز می‌باشد که شامل فضای کافی برای نصب پنل‌ها و مسیر تردد بین پنل‌ها و تجهیزات می‌باشد.

## ۱-۲ محاسبات

دماهی پنل‌های فتوولتائیک یکی از تاثیرگذار ترین پارامترها بر توان خروجی نیروگاه می‌باشد. دماهی پنل فتوولتائیک شناور متاثر از دمای اب، دمای محیط و سرعت باد می‌باشد. پارامترهای تاثیر

گذار را می‌توان از سایت‌های هواشناسی یا به صورت اندازه‌گیری در محل نصب نیروگاه بدست اورد. دمای پنل شناور از رابطه زیر بدست می‌آید [۱۳]:

$$T_{cw} = ( -0.246 T_w ) + ( 0.928 T_a ) + ( 0.021 G ) - ( 1.221 \times V_{wsea} ) + 1.808$$

در رابطه بالا  $T_{cw}$  دمای پنل شناور می‌باشد،  $T_w$  دمای آب می‌باشد،  $V_{wsea}$  سرعت باد روی سطح آب می‌باشد.

$$T_w = 0.0 + 0.75 T_a$$

در رابطه بالا  $T_a$  دمای هوا می‌باشد.

$$V_{wsea} = 1.72 + 1.17 V_{wind}$$

در رابطه بالا  $V_{wind}$  سرعت باد در ساحل می‌باشد.

## ۲-۲ نرم افزار PVsyst

نرم افزار PVsyst یک نرم افزار جامع و کاربردی در زمینه طراحی سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد که شامل مجموعه ابزارهای لازم برای مطالعه و تحقیق، طراحی و شبیه‌سازی و ایالیز داده‌های انواع سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد که توسط دانشگاه ژنو سوئیس طراحی و هر ساله بروز رسانی می‌گردد. نرم افزار PVsyst بعنوان معتبر ترین نرم افزار طراحی سیستم‌های فتوولتائیک در اکثر کشورها به صورت گسترده مورد استفاده قرار می‌گیرد. این نرم افزار دارای یک کتابخانه کامل از تجهیزات و طیف وسیعی از امکانات طراحی می‌باشد که ابزار سه بعدی برای سایه توسعه یافته، توانایی وارد کردن داده‌ها برای اندازه‌گیری مستقیم، مقایسه مقادیر شبه سازی شده، جعبه ابزار برای تعیین هندسه خورشیدی، هواشناسی و رفتار عملیاتی سیستم‌های فتوولتائیک از ان دسته اند. همچنین از این نرم افزار برای طراحی نیروگاه‌های متصل به شبکه، منفصل از شبکه در سطوح کیلوواتی و مگاواتی و طراحی

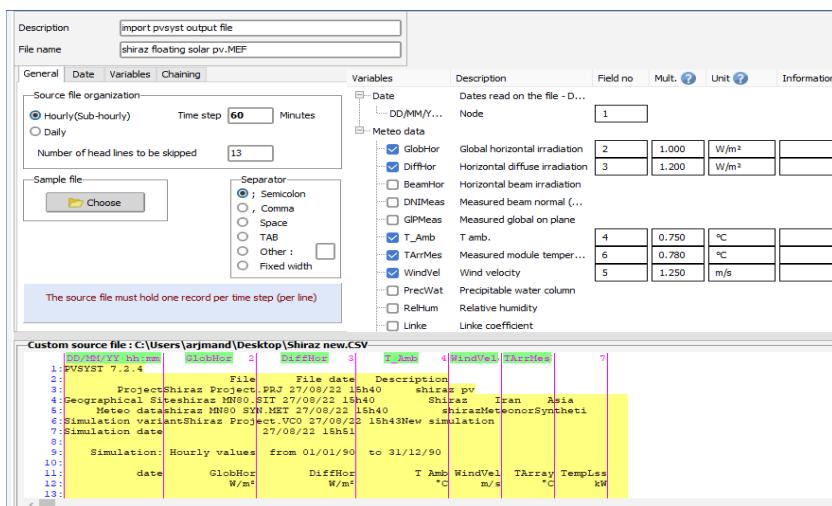
پمپ آب خورشیدی استفاده می‌گردد. از قابلیت‌های نرم افزار pvsyst در طرای نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌توان به انتخاب پنل‌های فتوولتائیک از پایگاه داده داخلی و افرودن پنل، انتخاب معکوس کننده از پایگاه داده داخلی، پیشنهاد یک آرایه و یک‌بندی سیستم برای انجام یک شبیه سازی مقدماتی، نشان دادن منحنی  $V/I$  از آرایه فتوولتائیک همراه با محدوده MPPT Power (Maximum Point Tracking)، ولتاژ و توان، نمایش توزیع سالانه قدرت آرایه، ارائه ابزار‌های تخصصی برای ارزیابی خسارات سیم کشی (و ضرر و زیان‌های دیگر مانند کیفیت پنل)، عدم تطابق بین پنل، رفتار حرارتی با توجه به نصب مکانیکی، در دسترس نبودن سیستم و...، تولید کل انرژی برای ارزیابی سودآوری سیستم فتوولتائیک، انرژی خاص  $kWh/kWp$  شاخص تولید براساس پرتو افکنی در دسترس ( محل و جهت گیری)، نشان دادن انرژی اصلی و دستاوردها و تلفات گرفتار در شبیه سازی اشاره کرد.

### ۳. تحلیل نتایج

#### ۱-۳ طراحی نیروگاه فتوولتائیک شناور

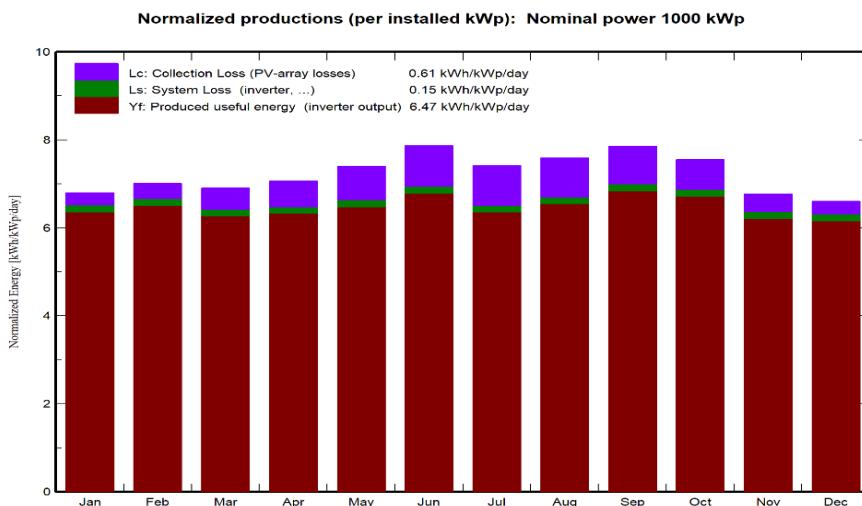
در این قسمت به طراحی نیروگاه  $MWh$  ۱ مورد نیاز خواهیم پرداخت. در این طراحی از پنل‌های  $W$  ۴۲۰ مونو کریستال برنده Suntech استفاده خواهیم کرد. این پنل دارای راندمان  $21/77$  درصد می‌باشد. برای طراحی این نیروگاه شناور  $MWh$  ۱ به  $2380$  عدد از این مدل پنل نیاز داریم. اتصال پنل‌های این نیروگاه خورشیدی شناور دارای  $140$  استرینگ می‌باشد که هر استرینگ شامل  $17$  پنل می‌باشد و به صورت سری با هم اتصال دارند. اینورتر مورد استفاده در این نیروگاه از برنده SMA با راندمان  $98$  درصد می‌باشد. در این نیروگاه از  $20$  عدد اینورتر  $kW$   $50$  استفاده خواهیم کرد. در صورت استفاده از اینورتر با توان بالاتر امکان مانور در شبکه کاهش می‌یابد و در صورت ایجاد عیب در یک اینورتر بخش بزرگی از نیروگاه از مدار خارج می‌گردد. زاویه نصب پنل‌ها در این نیروگاه  $29$  درجه در نظر گرفته شده است. در طراحی نیروگاه فتوولتائیک توسط نرم افزار PVSyst، نیاز به

اطلاعات سالانه هواشناسی منطقه نصب نیروگاه می‌باشد. این اطلاعات توسط نرم افزار از سایت های هواشناسی قابل دریافت می‌باشد. در طراحی نیروگاه فتوولتائیک شناور برخی پارامترهای تاثیرگذار بر توان تولیدی نیروگاه به دلیل وجود آب در زیر پنل ها متفاوت از داده های هواشناسی می‌باشد که باید میزان تغییرات این پارامترها در طراحی نرم افزار لحاظ گردد. این پارامترها به صورت اندازه گیری میدانی بدست می‌اید و با توجه با مقایسه با داده های هواشناسی بصورت ضرایب افزایشی یا کاهشی در اطلاعات هواشناسی منطقه طراحی نیروگاه در نرم افزار وارد می‌گردد. باید توجه داشت که این مقادیر بر اساس مقادیر محاسبه شده در محل نصب نیروگاه های فتوولتائیک شناور بدست آمده و برای مناطق مختلف می‌تواند تغییر کند. افزایش دمای پنل فتوولتائیک تاثیر بالایی در افت تولید پنل دارد. با توجه به پارامترهای اندازه گیری شده بر روی حوضچه های تصفیه خانه فاضلاب شهر شیراز ضرایب محیطی تاثیرگذار بر راندمان نیروگاه فتوولتائیک شناور بصورت میانگین برای دمای محیط، دمای آرایه ها، به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۲۲٪، ۲۵٪، ۲۰٪، ۲۳٪ نسبت به داده های هواشناسی به صورت کاهشی می‌باشد و ضریب باد، میزان تابش *diffuse* و رطوبت نسبی هوانیز به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۲۰٪ نسبت به داده های هواشناسی به صورت افزایشی می‌باشد. این نوع از طراحی به صورت پیش فرض در نرم افزار PVsyst قابل طراحی نمی‌باشد و کمک های فنی لازم از تیم طراح نرم افزار مستقر در دانشگاه ژنو سوئیس گرفته شده است. در شکل (۴) سربرگ مربوط به تغییر پارامترهای طراحی نیروگاه شناور قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۴. تغییر پارامترهای اثر گذار در توان تولیدی نیروگاه شناور

در این نوع طراحی با توجه به اینکه میزان تابش **diffuse** تغییر پیدا می کند باید تابع زمان بندی تابش **horizontal diffuse** و تابش **vertical diffuse** در طول روز دارای بازه زمانی یکسانی باشند که این زمانبندی نیز باید در نرم لحاظ گردد. در شکل (۵) میزان انرژی موثر تولید شده نیروگاه به صورت ماهانه (قسمت قمر رنگ) و همچنین میزان مجموع تلفات آرایه ها (قسمت بنفس رنگ) و تلفات اینورتر (قسمت سبز رنگ) را می توان مشاهده نمود. میزان تلفات DC که مربوط به تلفات پنل ها و سیم کشی آرایه ها از پنل تا اینورتر می باشد برابر با  $61/0$  کیلووات ساعت در روز می باشد و میزان تلفات AC که مربوط به اینورتر می باشد برابر با  $15/0$  کیلووات ساعت در روز می باشد.



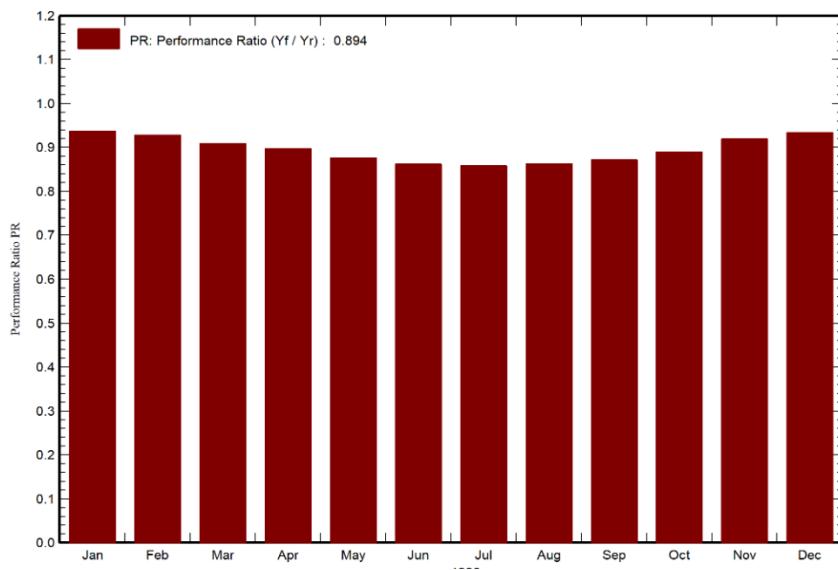
شکل ۵. نمودار ماهانه تلفات دریافت انرژی و تجهیزات سیستم بر حسب انرژی تولیدی اینورتر

نسبت کارایی (ضریب عملکرد) نیروگاه در شکل (۶) قابل مشاهده است. معمولاً ضریب عملکرد در نیروگاه های مقیاس بزرگ بالاتر از ۸۰ درصد و در نیروگاه های مقیاس کوچک نیز نباید کمتر از ۷۵ درصد باشد مگر اینکه شرایط خاص مثل سایه وجود داشته باشد.

همانطور که در شکل (۶) قابل مشاهده است در ماه های سرد سال ضریب عملکرد بیشتر از ماه های گرم سال است. دلیل این امر خنک تر بودن پنل ها در ماه های سرد سال می باشد که افزایش راندمان پنل ها به همراه دارد. در این طراحی ضریب عملکرد برابر با  $0.894/100$  درصد می باشد که یک ضریب نسبتاً بالا می باشد. در نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور دمای آب، سرعت باد، رطوبت محیط و دمای محیط بر ضریب عملکرد تاثیر می گذارند. با وجود بالاتر بودن ضریب عملکرد نیروگاه در ماه های سرد سال، تولید توان در ماه های گرم سال به دلیل بیشتر بودن ساعت تابش خورشید، بیشتر از ماه های سرد سال می باشد. در شکل (۷) میزان تابش افقي سالانه در منطقه نصب نیروگاه، توان رسیده به سطح پنل ها، تلفات سیستم و توان خروجی قابل مشاهده است. نسبت کارایی از مهم ترین پارامترهای عملکردی هر نیروگاه فتوولتائیک است که مستقل از مکان جغرافیایی محل احداث به میزان تششعع واردہ به سطح پنل وابستگی دارد. نسبت کارایی در واقع نسبت واقعی بین میزان توان حقیقی تولیدی با

توان تولید در حالت نظری در هر نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد. در نیروگاه‌های متصل به شبکه مقدار بالاتر نسبت کارایی بیانگر کارایی بالاتر آن نیروگاه و تلفات کمتر در سیم کشی‌ها، اینورترها، تاثیرات دمایی پنل و همچنین سهم اندک گرد و غبار و یا برف بر توان خروجی نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد.

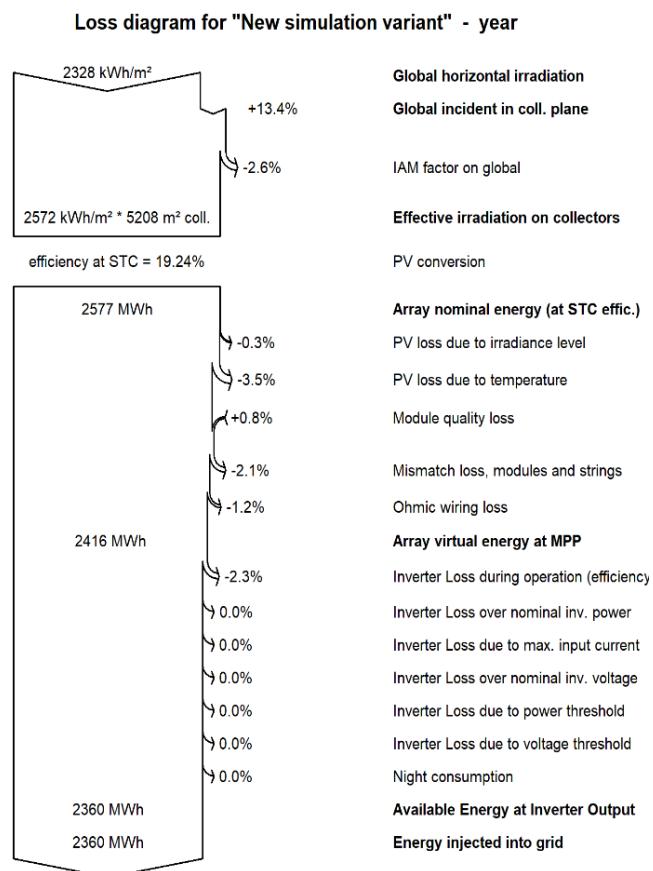
Performance Ratio PR



شکل ۶. ضریب عملکرد ماهانه نیروگاه در طول یکسال

بر اساس داده‌های شکل (۷) تابش افقی در منطقه نصب نیروگاه برابر با  $2328 \text{ kWh/m}^2$  می‌باشد، مجموع تابش‌های *reflect* و *diffuse* نیز باعث افزایش  $13/4\%$  توان رسیده به سطح پنل‌ها می‌گردد. از این میزان توان تابشی رسیده به سطح پنل‌ها به دلیل بازتابش از سطح پنل‌ها به میزان  $2/6\%$  تلفات ایجاد می‌شود و در نهایت به میزان  $2572 \text{ kWh/m}^2$  توان تابشی به سطح پنل‌ها می‌رسد. توان تولیدی پنل‌ها با راندمان تولیدی  $19/24\%$  که به صورت DC می‌باشد معادل  $2577 \text{ MWh}$  در سال می‌باشد. پس از کسر تلفات از توان تولیدی که شامل تلفات ناشی پنل، اینورتر و واپرینگ می‌شود،  $2260 \text{ MWh}$  توان به صورت سالانه به شبکه تزریق می‌گردد. بیشترین

تلفات مربوط به اثر دمای پنل می‌باشد که موجب افت راندمان ۳/۵ درصدی می‌گردد. در نیروگاه‌های نصب شده در خشکی تلفات ناشی از دمای پنل معمولاً بالای ۶ درصد می‌باشد.



شکل ۷. نمودار تلفات کل نیروگاه و میزان تابش و توزیق سالیانه به شبکه نیروگاه خورشیدی شناور

که در شکل ۷:

میزان تابش افقی کلی در منطقه مورد نظر: Global horizontal irradiation

میزان تابش کلی رسیده به کلکتور خورشیدی در منطقه مورد نظر: Global incident in coll

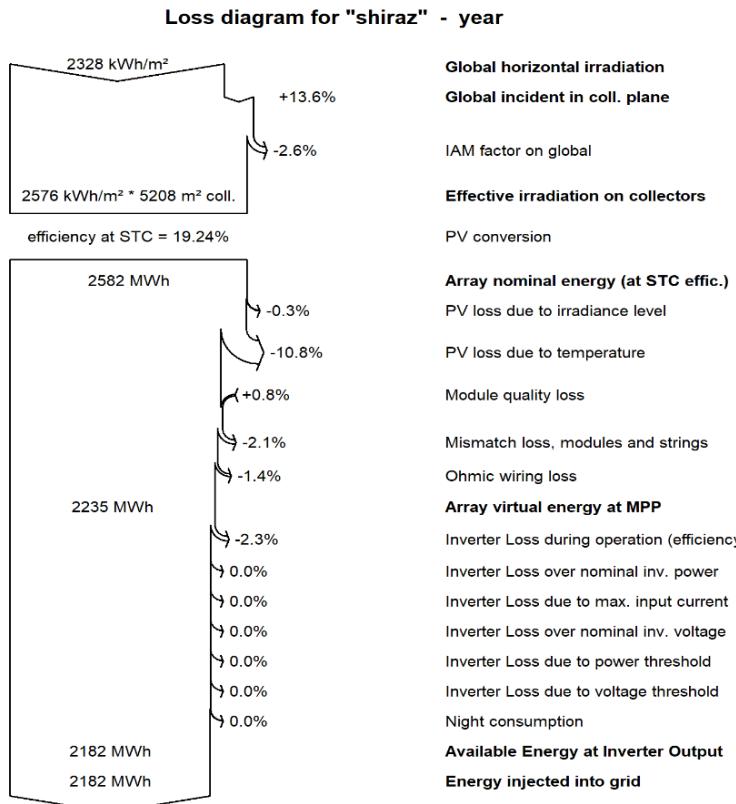
اIAM factor on global خریب انعکاس پرتوهای نوری خورشید  
 Effective irradiation on collectors میزان تابش موثر روی سطح کلکتور  
 Array nominal energy انرژی نامی ارایه ها در حالت استاندارد  
 PV loss due to irradiance level تلفات حاصل از تغییر شدت تابشی  
 PV loss due to temperature تلفات حرارتی فتوولتائیک  
 Module quality loss تلفات کیفی پنل ها  
 Mismatch loss, modules and strings تلفات عدم تطابق پنل ها و استرینگ ها  
 Ohmic wiring loss تلفات اهمی سیم ها  
 Array virtual energy at MPP انرژی پیشینی شده نقطه توان ماکتریم  
 Inverter loss during operating تلفات اینورتر در هنگام کارکرد  
 Available energy at inverter output انرژی در دسترس از خروجی اینورتر  
 Energy injected into grid انرژی تزریقی به شبکه

در این قسمت به طراحی یک نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک در خشکی واقع در منطقه جغرافیایی شهر شیراز با مقیاس ۱ خواهیم پرداخت و توان تولیدی این نیروگاه و پارامترهای تاثیرگذار بر خروجی نیروگاه را بررسی خواهیم کرد. در نهایت پارامترهای خروجی نیروگاه طراحی شده در خشکی و پارامترهای نیروگاه فتوولتائیک شناور را با هم مقایسه خواهیم کرد. در شکل (۸) می‌توان دیاگرام خروجی نیروگاه ۱ Mwh طراحی شده در خشکی، واقع در منطقه جغرافیایی شهر شیراز را مشاهده کرد.

بر اساس داده‌های شکل (۸) تابش افقی در منطقه نصب نیروگاه برابر با  $2328 \text{ kWh/m}^2$  می‌باشد، مجموع تابش‌های reflect و diffuse نیز باعث افزایش ۱۳/۶٪ توان رسیده به سطح پنل ها می‌گردد. از این میزان توان تابشی رسیده به سطح پنل ها به دلیل بازتابش از سطح پنل ها به میزان

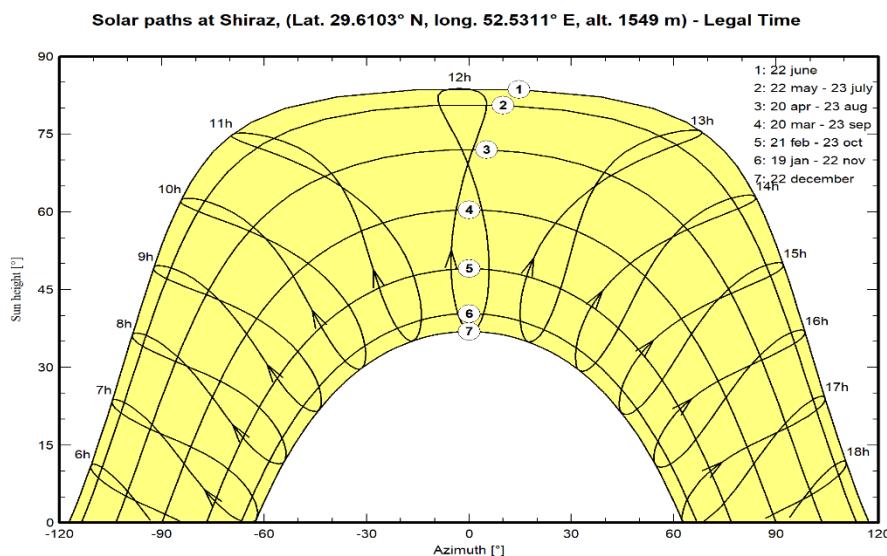
٪ ۲/۶ تلفات ایجاد می‌شود و در نهایت به میزان  $2576 \text{ kWh/m}^2$  توان تابشی به سطح پنل ها می‌رسد. توان تولیدی پنل‌ها با راندمان تولیدی ۱۹/۲۴٪ که به صورت DC می‌باشد معادل  $2582 \text{ MWh}$  در سال می‌باشد. پس از کسر تلفات از توان تولیدی که شامل تلفات ناشی از پنل، اینورتر و واپرینگ می‌شود،  $2182 \text{ MWh}$  توان به صورت سالانه به شبکه تزریق می‌گردد. بیشترین تلفات مربوط به اثر دمای پنل می‌باشد که موجب افت راندمان  $10/8$  درصدی می‌گردد. در نیروگاه‌های نصب شده در خشکی تلفات ناشی از دمای پنل معمولاً بالای  $6$  درصد می‌باشد. در شکل ۸ تلفات کل نیروگاه و میزان تابش و توان تزریق شده به شبکه در سال برای نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی قابل مشاهده می‌باشد.

پس از انجام طراحی میزان توان تولیدی نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی برابر با  $2182 \text{ MWh}$  در سال می‌باشد که در برابر  $2360 \text{ MWh}$  تولید نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور حدود  $8$  درصد کاهش را نشان می‌دهد که عمدۀ اختلاف ایجاد شده به دلیل کاهش تلفات دمایی آرایه‌ها در نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور می‌باشد.



شکل ۸. تلفات کل نیروگاه و میزان تابش و توزیق سالیانه به شبکه نیروگاه خورشیدی در خشکی

میانگین ضریب عملکرد سالانه در نیروگاه خورشیدی شناور در این پژوهش ۰/۸۹۴ می باشد و این ضریب در نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی در این پژوهش معادل ۰/۸۲۶ می باشد که نشان دهنده راندمان بالاتر نیروگاه فتوولتائیک شناور می باشد. نمودار مسیر حرکتی خورشید برای شهر شیراز که توسط نرم افزار PVsysyt گردیده است در شکل (۹) قابل مشاهده می باشد [۱۳].



شکل ۹. نمودار مسیر خورشید برای شهر شیراز

#### ۴. نتیجه گیری

در این مطالعه پس از اصلاح متغیرهای تاثیرگذار از جمله ضریب بازتابش از سطح آب، دمای پنل، سرعت باد و دمای محیط اطراف نتایج شبیه سازی مورد بررسی قرار گرفت. توان خروجی نیروگاه مورد بررسی پس از کسر تلفات برابر  $2360 \text{ MWh}$  در سال است که تلفات ناشی از افزایش دمای پنل ها در نیروگاه خورشیدی شناور در این پژوهش نسبت به سایر نیروگاه های نصب شده در خشکی کاهش قابل ملاحظه ای داشته است. جهت مقایسه توان تولیدی در نیروگاه دیگر طراحی شده در خشکی در همان منطقه جغرافیایی و با همان تجهیزات استفاده شده در نیروگاه خورشیدی شناور، توان خروجی محاسبه شده برای نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی  $2182 \text{ MWh}$  در سال است که نشان دهنده افزایش  $8\%$  درصدی توان نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور نسبت به نیروگاه

واقع در خشکی است. ضریب عملکرد در نیروگاه خورشیدی شناور ۰/۸۹۴ و در نیروگاه واقع در خشکی ۰/۸۲۶ می باشد که نشان دهنده راندمان بالاتر نیروگاه خورشیدی شناور می باشد. تلفات ناشی از دمای پنل ها در نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی ۱۰/۸ درصد می باشد درحالی که این تلفات در نیروگاه فتوولتائیک شناور ۳/۵ درصد شناور می باشد. همانطور که از نتایج طراحی پیداست نصب نیروگاه خورشیدی به صورت شناور با افزایش راندمان قابل توجه ای نسبت به نیروگاه واقع در خشکی همراه گردیده است که این افزایش راندمان می تواند در طول دوره بهره برداری از نیروگاه هزینه مازاد احداث نیروگاه شناور نسبت به نیروگاه واقع در خشکی را جبران کند. معمولاً نیروگاه های خورشیدی شناور افزایش هزینه ۲۰ الی ۲۵ درصدی نسبت به نیروگاه های واقع در خشکی دارند که این هزینه در یک دوره سه الی چهار ساله با توجه با افزایش راندمان نیروگاه جبران می گردد. البته باید به این نکته توجه کرد که در صورت خرید زمین برای احداث نیروگاه واقع در خشکی هزینه کامل طرح نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی به مراتب نسبت به نیروگاه شناور افزایش پیدا می کند. با توجه به اصطکاک کم سطح آب و نیروگاه شناور می توان با صرف هزینه کم نسبت به نیروگاه واقع در خشکی این نیروگاه را به سیستم ردیاب مجهز کرد.

میزان دی اکسید کربنی که به ازای هر کیلووات برق تولیدی به جو زمین منتشر می شود به نوع سوخت مصرفی وابسته است. در ایران با توجه به نوع سوخت فسیلی مصرفی نیروگاه های تولید کننده انرژی الکتریکی، طبق گزارش وزارت نیرو به ازای هر کیلووات انرژی الکتریکی تولیدی ۵۷۳/۹۳ گرم کربن دی اکسید وارد جو کره زمین می شود. بر این اساس و با توجه به تولید ۲۳۶۰ MWh انرژی الکتریکی سالانه توسط نیروگاه خورشیدی شناور از انتشار ۱۲۶۹۵۱۴/۸ کیلو گرم دی اکسید کربن در سال به جو کره زمین کاسته خواهد شد. بر اساس استاندارهای سازمان محیط زیست کانادا هر درخت بالغ در سال می تواند ۱۱۸ کیلو گرم دی اکسید کربن جذب کند که بر این اساس احداث این نیروگاه شناور معادل ۱۰۷۵۹ درخت در سال در کاستن دی اکسید کربن جو کره زمین عملکرد دارد. میزان تبخیر سطحی آب در شهر شیراز ۱۴۱۹/۱ میلی متر در سال می باشد بنابراین با توجه به

میزان پوشش سطحی نیروگاه خورشیدی شناور سالانه در حدود ۱۳۹۸۵/۲۳ متر مکعب در سال از تبخر آب جلوگیری خواهد شد.

## ۵. منابع

- [۱] Perez M, Perez R, Ferguson CR, Schlemmer J. Deploying effectively dispatchable PV on reservoirs: Comparing floating PV to other renewable technologies. *Solar Energy*. ۲۰۱۸;۱۷۴:۸۳۷-۴۷.
- [۲] Sahu A, Yadav N, Sudhakar K. Floating photovoltaic power plant: A review. *Renewable and sustainable energy reviews*. ۲۰۱۶;۶۶:۸۱۰.
- [۳] Zhou Y, Chang F-J, Chang L-C, Lee W-D, Huang A, Xu C-Y, et al. An advanced complementary scheme of floating photovoltaic and hydropower generation flourishing water-food-energy nexus synergies. *Applied Energy*. ۲۰۲۰;۲۷۵:۱۱۰۳۸۹.
- [۴] Rosa-Clot M, Tina GM, Nizetic S. Floating photovoltaic plants and wastewater basins: an Australian project. *Energy Procedia*. ۲۰۱۷;۱۳۴:۶۶۴-۷۴.
- [۵] Alok Sahu, Neha Yadav, K. Sudhakar. “Floating photovoltaic power plant: A review”, ۲۰۱۶
- [۶] Young-Kwan Choi, Ph.D. “A Study on Power Generation Analysis of Floating PV System Considering Environmental Impact”, ۲۰۱۴
- [۷] Sumitomo Mitsui Construction Co., Ltd. <http://pv-float.com/english/>
- [۸] Thomas Reindl, Celine Paton, Where Sun Meets Water, Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS) at the National University of Singapore (NUS), ۲۰۱۹
- [۹] A. Sahu, N. Yadav, and K. Sudhakar, “Floating photovoltaic power plant: A review,” *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. ۶۶, pp. ۸۱۵-۸۲۴, Dec. ۲۰۱۶.
- [۱۰] 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. ۴, no. ۱, pp. ۷۰-۷۴, ۲۰۱۴.
- [۱۱] Raso, J. Updated Report on Wastewater Reuse in the European Union. European Commission: Brussels, Belgium. (۲۰۱۳).

[۱۲] مهدی اسدی، مختار کرمی، برآورد میزان تبخیر و تعریق در استان فارس با استفاده از شاخص‌های تجربی.

۱۳۹۷، تحقیقات کاربردی علوم جغرافیایی سال بیستم بهار ۱۳۹۹ شماره ۵۶

[۱۳] Yousuf, H.; Khokhar, M.Q.; Zahid, M.A.; Kim, J.; Kim, Y.; Cho, E.C.; Cho, Y.H.; Yi, J. A Review on Floating Photovoltaic Technology (FPVT). *Curr. Photovolt. Res.* ۲۰۲۰, ۸, ۶۷–۷۸