

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

شبیه سازی یک نیروگاه خورشیدی شناور بر روی 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 تشکر

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 در نظر گرفتن شرایطی است که موجب مخاطره یا کاهش فرصت های پیش رو برای پیشرفت نگردد. در این پژوهش از یک نیروگاه خورشیدی فتولتائیک شناور جهت تامین توان تصفیه خانه فاضلاب واقع در شهر شیراز استفاده گردیده است. اثر سرمایه‌یابی آب باعث افزایش راندمان نیروگاه در حدود ۵ الی ۱۵ درصد می‌گردد و نیروگاه فتولتائیک شناور با ایجاد پوشش سطحی آب، از تبخیر سطحی آب تا حدود ۹۰ درصد جلوگیری می‌کند.

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

نیروگاه خورشیدی

۱. مقدمه

ساخت‌های 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 تصفیه‌خانه 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 تأثیر گذار 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 طراحی نرم افزار PVSyst واقع در دانشگاه ژنو سوئیس کمک‌های لازم گرفته شده است. پارامترهای محیطی مانند دمای محیط و میزان تابش منطقه‌ای بیشترین تأثیر را بر روی راندمان نیروگاه فتوولتائیک دارند.

ایران با داشتن بیش از ۳۰۰ روز آفتابی 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 کوه‌های زاگرس دارای آب و هوای معتدل می‌باشد. میانگین دمای هوای شهر شیراز در تیرماه (گرم‌ترین ماه سال) ۳۰ درجه سانتی‌گراد و در دی ماه (سردترین ماه سال) ۵ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین دما در فروردین ماه ۱۷ درجه سانتی‌گراد و در مهرماه ۲۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. میانگین دمای سالانه در شهر شیراز ۱۸ درجه سانتی‌گراد می‌باشد. بیشترین دمای ثبت شده در شهر شیراز تا کنون ۴۳/۲ درجه سانتی‌گراد می‌باشد و کمترین دمای ثبت شده ۱۴- درجه سانتی‌گراد می‌باشد.

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

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

ساهو و همکاران (۲۰۱۶) در تحقیقی به مطالعه در خصوص نیروگاه‌های تولید الکتروسیسته 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 آمده 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 هم‌افزایی بین پیوندهای آب، غذا و انرژی انجام دادند. برای حل این مسئله مدل بهینه‌سازی چند هدفه مبتنی بر الگوریتم بهینه‌سازی ملخ برای به حداکثر 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 بهینه‌سازی 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 ۱۱/۹ و ۴۴/۳ درجه برآورد شد [۳]. 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 آوردند. (مقدار ۱۵۰۰۰ الی ۲۵۰۰۰ متر مکعب صرفه جویی در آب به ازای هر مگاوات پنل) [۴].

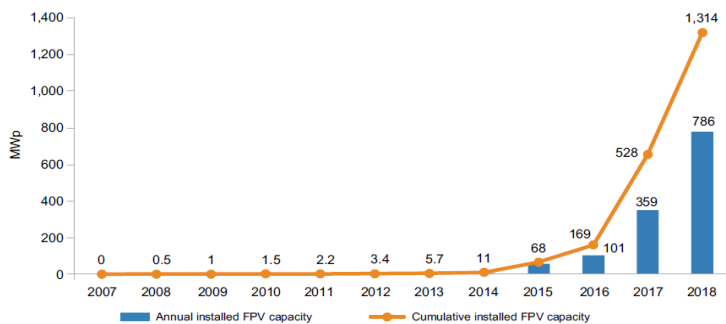
۱-۲ نیروگاه خورشیدی شناور

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

- نصب روی زمین
- نصب روی پشت بام
- نصب روی کانال
- 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، توجه‌ها به سمت سیستم‌های فتوولتائیک شناور جلب شده است. چرا که راه حل اکولوژیکی خوبی به نظر می‌رسند. فتوولتائیک‌های خورشیدی شناور، امروزه با عنوان فلوئولتائیک نیز شناخته می‌شوند [۶].

وقتی مساحت قابل توجهی از یک صفحه فتوولتائیک خورشیدی بر روی حجمی از آب قرار می‌گیرد، سیستم فلوئولتائیک 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، خنک‌کنندگی 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 معایب اصلی نیروگاه‌های خورشیدی شناور فرسایش و خوردگی بخش شناور سازه و قسمت‌های فلزی آنها در محیط خورنده دریایی می‌باشد که با استفاده از مواد مقاوم در برابر خوردگی می‌توان تا حدی خوردگی را تعویق انداخت [۷]. ظرفیت نصب شده نیروگاه‌های خورشیدی شناور در جهان در بین سال‌های ۲۰۰۷ الی ۲۰۱۸ در شکل (۱) قابل مشاهده می‌باشد [۸].



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

۳-۱ مزایا و معایب نیروگاه خورشیدی شناور

۱- مزایای نیروگاه‌های خورشیدی شناور [۵]:

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

۲- معایب نیروگاه‌های خورشیدی شناور [۹]:

- این سیستم در معرض خطراتی 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 آبی و جلبک‌های دریایی و غیره تاثیر بگذارد.
- فعالیت‌هایی مانند ماهی‌گیری و سیستم حمل و نقل آبی ممکن است تحت تاثیر قرار گیرند.

۴-۱ اجزای تشکیل دهنده ی سیستم‌های خورشیدی شناور

اجزای نیروگاه‌های خورشیدی شناور شامل پل‌های شناور یا جداکننده‌های شناور، سیستم مهار، صفحات خورشیدی، اینورتر و کابل هستند [۱۰].

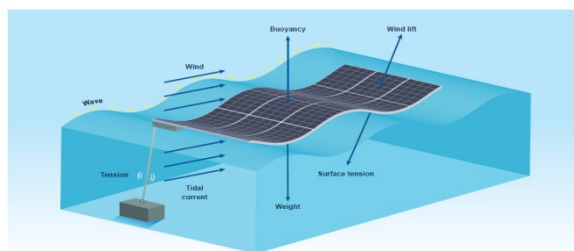
۱- سیستم شناور: سیستم شناور وسیله‌ای است که برای نگه‌داری تعداد مناسب پنل‌های خورشیدی که به صورت سری و موازی با توجه به نیاز و فضای موجود، به هم وصل شده‌اند، به کار می‌رود. این سیستم شامل سازه و بخش شناور می‌باشد. سیستم شناور از بخش‌های زیر تشکیل شده است:

- ❖ 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 را ثابت نگه می‌دارند.
- ❖ پایه ایستاده: وقتی به شناور متصل شود، به عنوان یک پایه عمل می‌کند که زاویه شیب پنل‌های خورشیدی را در حالت معینی نگه می‌دارد.
- ❖ پل‌ها: پل، شناورها را به یکدیگر متصل کرده، و در حین فرآیند ساخت و تعمیر و نگهداری پنل‌های خورشیدی به عنوان جای پا برای افراد پیمانکار عمل می‌کند.

- ❖ باندهای اتصال: باند اتصال، شناورها را به هم متصل نگه می‌دارد. دو نوع از این باندها در دسترس هست که بار فشار باد را تنظیم می‌کنند.
- ❖ کمربندهای لنگری: این کمربندها، قلاب‌های پنل خورشیدی را به شناورها متصل می‌کنند.
- ❖ قلاب‌های پنل خورشیدی: قلاب‌های تثبیت‌کننده، به کمربندهای شناور متصل می‌شوند و به عنوان تثبیت‌کننده پنل‌های خورشیدی در مکان مورد نظر عمل می‌کنند.

شناورهای پلاستیکی با نیروی شناوری موثر نسبت به وزن خود که چندین بار با هم ترکیب شده‌اند و یک پل شناور بزرگ را تشکیل داده‌اند معمولاً از پلی‌اتیلن سنگین ساخته شده‌اند که به دلیل قدرت تنش آن، مقاومت بالا، مقاومت در برابر UV و خوردگی از آن استفاده می‌شود. الیاف شیشه تقویت شده پلاستیکی (GRP) می‌تواند برای ساخت و ساز سکوی شناور استفاده شود.

۲- سیستم مهار: سیستم مهار به هر ساختار دائمی گفته می‌شود که می‌تواند یک محتوا را امن نگه دارد. از جمله این سیستم‌ها می‌توان به اسکله‌ها، لنگرگاه‌ها، باراندازها، موج‌شکن‌ها و مهارهای شناور اشاره کرد. سیستم مهار صفحات خورشیدی را در جای خود نگه می‌دارد و از جابجایی و چرخش آنها جلوگیری می‌کند. سیستم مورینگ (mooring) می‌تواند در عین حال که موقعیت سیستم را در جهت رو به جنوب حفظ می‌کند سیستم را در جهت رو به جنوب حفظ می‌کند، با افت و خیزهای سطح آب نیز هماهنگ شود. در شکل (۲) نیروهای وارد بر یک نیروگاه خورشیدی شناور قابل مشاهده می‌باشد.



شکل ۲. نیروهای وارد بر یک نیروگاه شناور خورشیدی

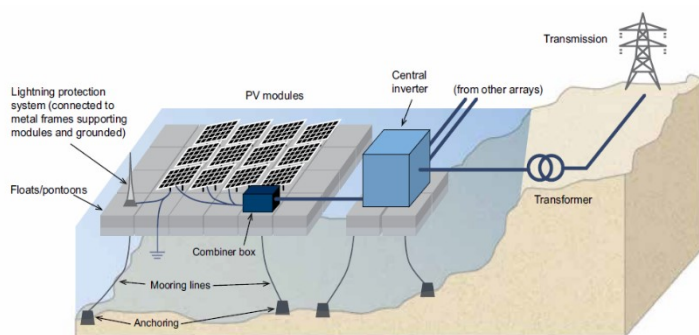
سازه نیروگاه خورشیدی شناور توسط کابل‌های لنگر اندازی (mooring line) به سازه‌های بتنی در کف آب (anchoring) که به عنوان لنگرگاه مورد استفاده قرار می‌گیرند متصل می‌شوند و از وارد شدن تنش به سازه شناور و حرکت کردن آن روی سطح آب و چرخیدن سازه توسط نیروی باد و امواج جلوگیری می‌کند. نیروهای تاثیرگذار بر نیروگاه 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 جز و مدی (tidal current)، می‌باشند.

۳- پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی

برای ساخت پروژه‌هایی بر روی آب‌های شور، استفاده از پنل‌هایی نیاز خواهد بود که توانایی مقاومت در برابر قرارگیری 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 کابل‌کشی 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

۵-۱ آب خاکستری و فاضلاب

آب خاکستری معمولاً به فاضلاب تولیدی از روشویی، حمام، ماشین لباسشویی و ظرفشویی آشپزخانه‌ها اطلاق می‌گردد که در مبدأ از فاضلاب دستشویی و توالت تفکیک شده باشد، هرچند در بعضی از مطالعات پساب تولیدی آشپزخانه‌ها به واسطه بار آلی بالا در دسته بندی آب خاکستری قرار نگرفته است. آب خاکستری براساس نوع استفاده در کشورهای گوناگون ۳۰٪ تا ۸۰٪ فاضلاب تولیدی را شامل می‌شود. امروزه به واسطه بار میکروبی 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 تصفیه‌خانه‌های 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 [۱۱].

۶-۱ 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

۷-۱ تبخیر آب

به طور کلی تبخیر به تغییرات انرژی گرمایی و فشار بخار وابسته 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 شده‌اند که انتخاب آنها با توجه به منطقه مورد مطالعه، داده‌های اقلیمی قابل اندازه‌گیری 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 تشت آب بعنوان مرجع برای بدست آوردن 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 تشت آب، K_1 ضریب تبخیر که بین ۰/۶ 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 ۱ MW به فضایی در حدود ۱۵۰۰۰ متر مربع نیاز می‌باشد که شامل فضای کافی برای نصب پنل‌ها و مسیر تردد بین پنل‌ها و تجهیزات می‌باشد.

۲-۱ محاسبات

دمای پنل‌های فتوولتائیک یکی از تاثیرگذارترین پارامترها بر توان خروجی نیروگاه می‌باشد. دمای پنل فتوولتائیک شناور متاثر از دمای آب، دمای محیط و سرعت باد می‌باشد. پارامترهای تاثیر

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

$$T_{cw} = (0,246 T_w) + (0,928 T_a) + (0,021 G) - (1,221 \times V_{wsea}) + 18,08$$

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

$$T_w = 5,0 + 0,75T_a$$

در رابطه بالا T_a دمای هوا می‌باشد.

$$V_{wsea} = 1,62 + 1,17 V_{wland}$$

در رابطه بالا V_{wland} 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 آنالیز داده‌های انواع سیستم‌های فتوولتائیک می‌باشد که توسط دانشگاه ژنو سوئیس طراحی و هر ساله بروز رسانی می‌گردد. نرم افزار PVsyst بعنوان معتبرترین 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 شبه‌سازی شده، جعبه ابزار برای تعیین هندسه خورشیدی، هواشناسی و رفتار عملیاتی سیستم‌های فتوولتائیک از آن دسته‌اند. همچنین از این نرم افزار برای طراحی نیروگاه‌های متصل به شبکه، منفصل از شبکه در سطوح کیلوواتی و مگاواتی و طراحی

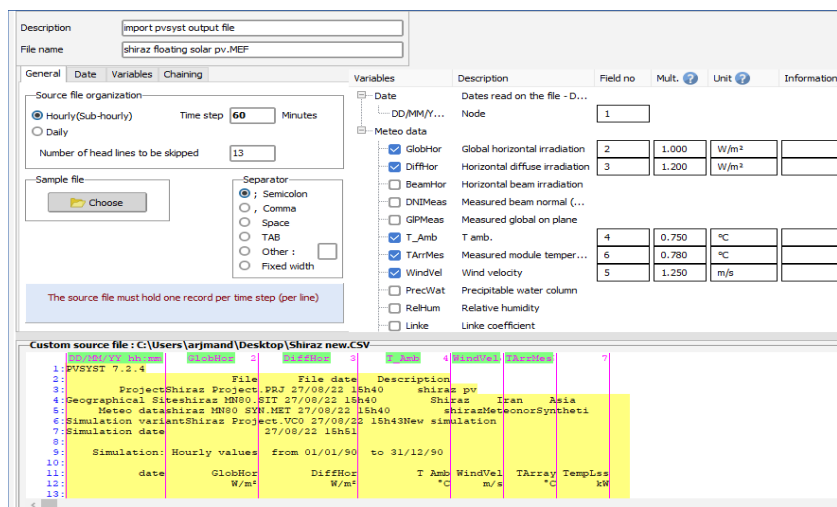
پمپ آب خورشیدی استفاده می‌گردد. از قابلیت‌های نرم افزار pvsyst در طراحی نیروگاه‌های فتوولتائیک می‌توان به انتخاب پنل‌های فتوولتائیک از پایگاه داده داخلی و افزودن پنل، انتخاب معکوس کننده از پایگاه داده داخلی، پیشنهاد یک آرایه و پیکر بندی سیستم برای انجام یک شبیه سازی مقدماتی، نشان دادن منحنی I/V از آرایه 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 MWh/y برای ارزیابی سودآوری سیستم فتوولتائیک، انرژی خاص kWh/kWp شاخص تولید بر اساس پرتو افکنی در دسترس (محل و جهت گیری)، نشان دادن انرژی اصلی و دستاورد ها و تلفات گرفتار در شبیه سازی اشاره کرد.

۳. تحلیل نتایج

۳-۱ طراحی نیروگاه فتوولتائیک شناور

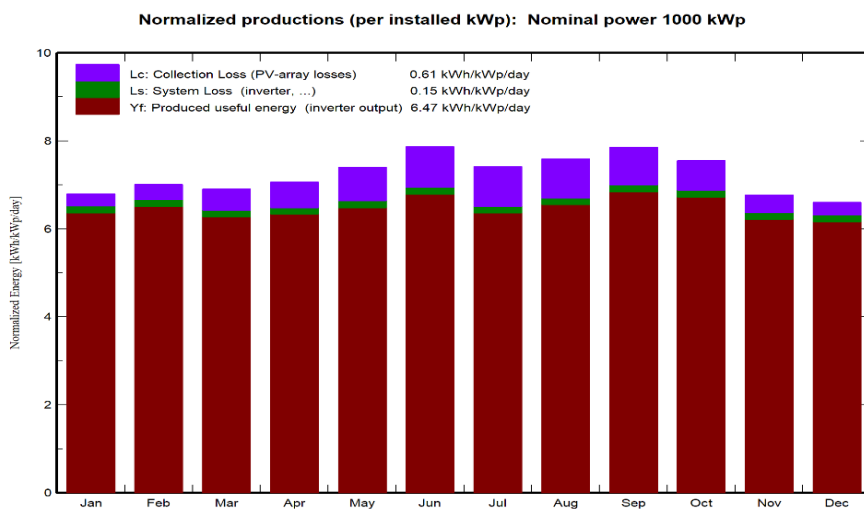
در این قسمت به طراحی نیروگاه ۱ MWh مورد نیاز خواهیم پرداخت. در این طراحی از پنل‌های ۴۲۰ W مونو کریستال برند Suntech استفاده خواهیم کرد. این پنل دارای راندمان ۲۱/۷۷ درصد می‌باشد. برای طراحی این نیروگاه شناور ۱ MWh به ۲۳۸۰ عدد از این مدل پنل نیاز داریم. اتصال پنل‌های این نیروگاه خورشیدی شناور دارای ۱۴۰ استرینگ می‌باشد که هر استرینگ شامل ۱۷ پنل می‌باشد و به صورت سری با هم اتصال دارند. اینورتر مورد استفاده در این نیروگاه از برند SMA با راندمان ۹۸ درصد می‌باشد. در این نیروگاه از ۲۰ عدد اینورتر ۵۰ kW 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 ۲۹ درجه در نظر گرفته شده است. در طراحی نیروگاه فتوولتائیک توسط نرم افزار Pvsyst، نیاز به

اطلاعات سالانه هواشناسی منطقه نصب نیروگاه می باشد. این اطلاعات توسط نرم افزار از سایت های هواشناسی قابل دریافت می باشد. در طراحی نیروگاه فتوولتائیک شناور برخی پارامترهای تاثیر گذار بر توان تولیدی نیروگاه به دلیل وجود آب در زیر پنل ها متفاوت از داده های هواشناسی می باشد که باید میزان تغییرات این پارامترها در طراحی نرم افزار لحاظ گردد. این پارامترها به صورت اندازه گیری میدانی بدست می آید و با توجه با مقایسه با داده های هواشناسی بصورت ضرایب افزایشی یا کاهش می در اطلاعات هواشناسی منطقه طراحی نیروگاه در نرم افزار وارد می گردد. باید توجه داشت که این مقادیر بر اساس مقادیر محاسبه شده در محل نصب نیروگاه های فتوولتائیک شناور بدست آمده و برای مناطق مختلف می تواند 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 تاثیر گذار بر راندمان نیروگاه فتوولتائیک شناور بصورت میانگین برای دمای محیط، دمای آرایه ها، به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۲۲٪، نسبت به داده های هواشناسی به صورت کاهش می باشد و ضریب باد، میزان تابش diffuse و رطوبت نسبی هوا نیز به ترتیب برابر با ۲۵٪، ۲۰٪، ۲۳٪ نسبت به داده های هواشناسی به صورت افزایشی می باشد. این نوع از طراحی به صورت پیش فرض در نرم افزار PVsyst قابل طراحی نمی باشد 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 می باشد.



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 diffuse و تابش horizontal 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 قرمز رنگ) و همچنین میزان مجموع تلفات آرایه ها (قسمت بنفش 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 ۰/۶۱ کیلووات ساعت در روز می باشد و میزان تلفات AC که مربوط به اینورتر می باشد برابر با ۰/۱۵ کیلووات ساعت در روز می باشد.

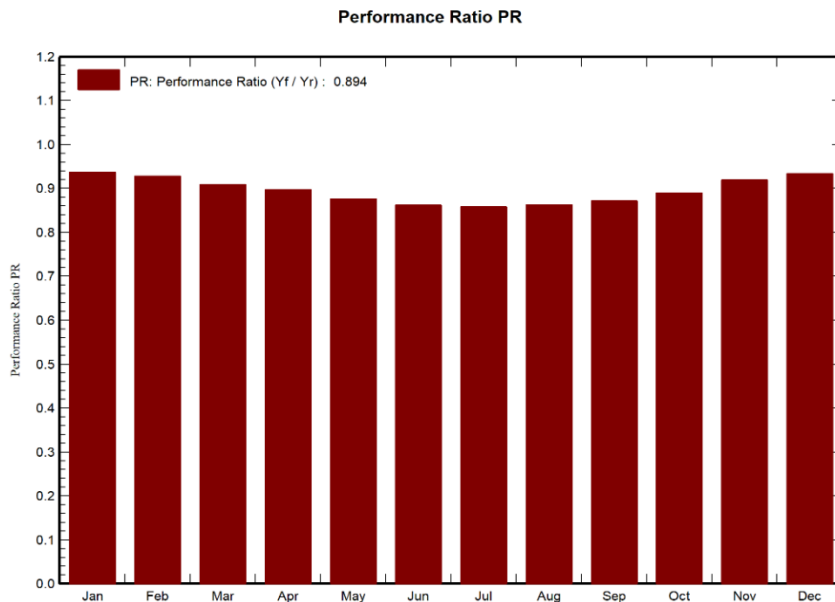


شکل ۵. نمودار ماهانه تلفات دریافت انرژی و تجهیزات سیستم بر حسب انرژی تولیدی اینورتر

نسبت کارایی (ضریب عملکرد) نیروگاه در شکل (۶) قابل مشاهده است. معمولاً ضریب عملکرد در نیروگاه‌های مقیاس بزرگ بالاتر از ۸۰ درصد و در نیروگاه‌های 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 ماه‌های سرد سال ضریب عملکرد بیشتر از ماه‌های گرم سال است. دلیل این امر خنک‌تر بودن پنل‌ها در ماه‌های سرد سال می‌باشد که افزایش راندمان پنل‌ها را به همراه دارد. در این طراحی ضریب عملکرد برابر با ۰/۸۹۴ درصد می‌باشد که یک ضریب نسبتاً بالا می‌باشد. در نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور دمای آب، سرعت باد، رطوبت محیط و دمای محیط بر ضریب عملکرد تاثیر می‌گذارند. با وجود بالاتر بودن ضریب عملکرد نیروگاه در ماه‌های سرد سال، تولید توان در ماه‌های گرم سال به دلیل بیشتر بودن ساعات تابش خورشید، بیشتر از ماه‌های سرد سال می‌باشد. در شکل (۷) میزان تابش افقی سالانه در منطقه نصب نیروگاه، توان رسیده به سطح پنل‌ها، تلفات سیستم و توان خروجی قابل مشاهده است. نسبت کارایی از مهم‌ترین پارامترهای عملکردی هر نیروگاه فتوولتائیک است که مستقل از مکان جغرافیایی محل احداث به میزان تشعشع وارده به سطح پنل وابستگی دارد. نسبت کارایی در واقع نسبت واقعی بین میزان توان حقیقی تولیدی با

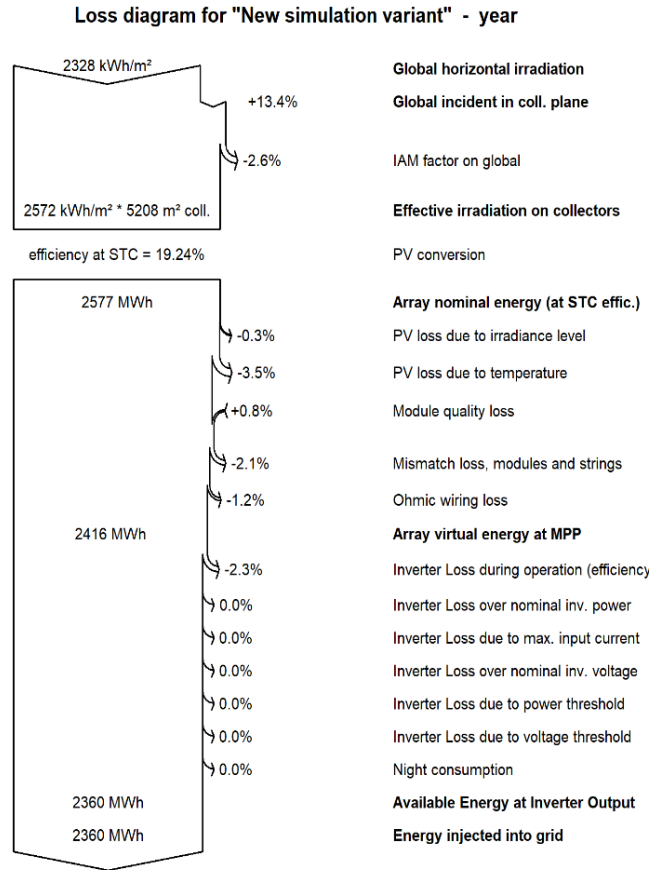
توان تولید در حالت نظری در هر نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد. در نیروگاه‌های متصل به شبکه مقدار بالاتر نسبت کارایی بیانگر کارایی بالاتر آن نیروگاه و تلفات کمتر در سیم‌کشی‌ها، اینورترها، تاثیرات دمایی پنل و همچنین سهم اندک گرد و غبار و یا برف بر توان خروجی نیروگاه فتوولتائیک می‌باشد.



شکل ۶. ضریب عملکرد ماهانه نیروگاه در طول یکسال

بر اساس داده‌های شکل (۷) تابش افقی در منطقه نصب نیروگاه برابر با 2328 kWh/m^2 می‌باشد، مجموع تابش‌های diffuse و reflect 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 kWh/m^2 توان تابشی به سطح پنل‌ها می‌رسد. توان تولیدی پنل‌ها با راندمان تولیدی $19/24\%$ که به صورت DC می‌باشد معادل 2577 MWh در سال می‌باشد. پس از کسر تلفات از توان تولیدی که شامل تلفات ناشی پنل، اینورتر و وایرینگ می‌شود، 2360 MWh توان به صورت سالانه به شبکه تزریق می‌گردد. بیشترین

تلفات مربوط به اثر دمای پنل می باشد که موجب افت راندمان ۳/۵ درصدی می گردد. در نیروگاه های نصب شده در خشکی تلفات ناشی از دمای پنل معمولا بالای ۶ درصد می باشد.



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

که در شکل ۷:

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

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

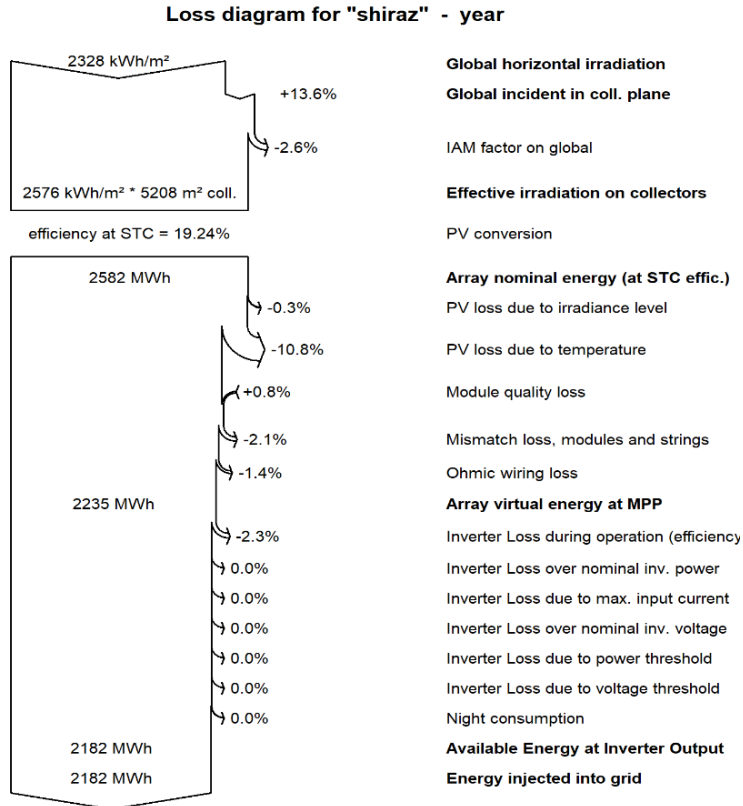
- IAM factor on global
- Effective irradiation on collectors: ضریب انعکاس پرتوهای نوری خورشید
- Array nominal energy: میزان تابش موثر روی سطح کلکتور
- PV loss due to irradiance level: تلفات حاصل از تغییر شدت تابشی
- PV loss due to temperature: تلفات حرارتی فتوولتائیک
- Module quality loss: تلفات کیفی پنل‌ها
- Mismatch loss, modules and strings: تلفات عدم تطابق پنل‌ها و استرینگ‌ها
- Ohmic wiring loss: تلفات اهمی سیم‌ها
- Array virtual energy at MPP: انرژی پیش‌بینی شده نقطه توان ماکزیمم
- 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 Mwh خواهیم پرداخت و توان تولیدی این نیروگاه و پارامترهای تاثیر گذار 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 kWh/m^2 می‌باشد، مجموع تابش‌های diffuse و reflect نیز باعث افزایش ۱۳/۶٪ توان رسیده به سطح پنل‌ها می‌گردد. از این میزان توان تابشی رسیده به سطح پنل‌ها به دلیل بازتابش از سطح پنل‌ها به میزان

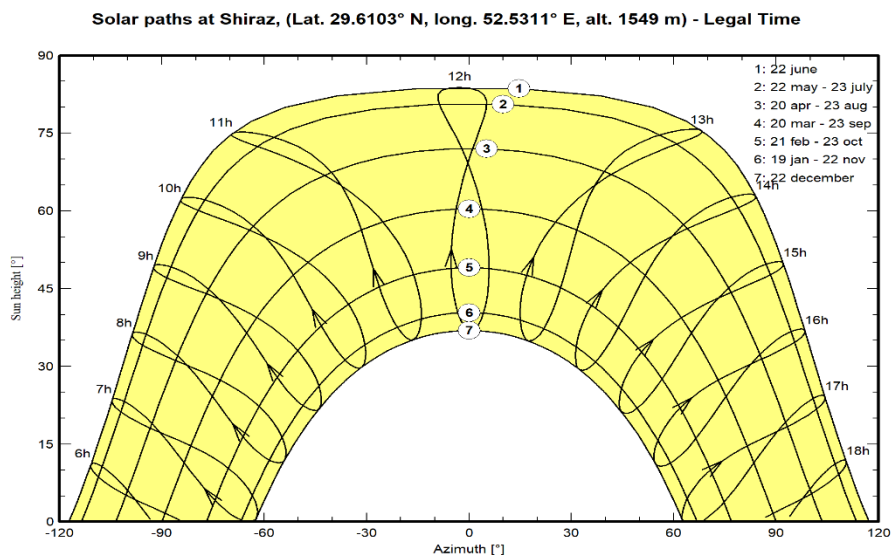
٪۲/۶ تلفات ایجاد می‌شود و در نهایت به میزان 2576 kWh/m^2 توان تابشی به سطح پنل‌ها می‌رسد. توان تولیدی پنل‌ها با راندمان تولیدی ٪۱۹/۲۴ که به صورت DC می‌باشد معادل 2582 MWh در سال می‌باشد. پس از کسر تلفات از توان تولیدی که شامل تلفات ناشی از پنل، اینورتر و وایرینگ می‌شود، 2182 MWh توان به صورت سالانه به شبکه تزریق می‌گردد. بیشترین تلفات مربوط به اثر دمای پنل می‌باشد که موجب افت راندمان ۱۰/۸ درصدی می‌گردد. در نیروگاه‌های نصب شده در خشکی تلفات ناشی از دمای پنل معمولاً بالای ۶ 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 MWh در سال می‌باشد که در برابر 2360 MWh تولید نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور حدود ۸ درصد کاهش را نشان می‌دهد که عمده اختلاف ایجاد شده به دلیل کاهش تلفات دمایی آرایه‌ها در نیروگاه خورشیدی فتوولتائیک شناور می‌باشد.



شکل ۸. تلفات کل نیروگاه و میزان تابش و تزریق 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 PVsyst ترسیم گردیده است در شکل (۹) قابل مشاهده می باشد [۱۳].



شکل ۹. نمودار مسیر حرکتی 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 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 جغرافیای و با همان تجهیزات استفاده شده در نیروگاه خورشیدی شناور، توان خروجی محاسبه شده برای نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی 2182 MWh در سال است که نشان دهنده افزایش ۸ 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 می‌باشد که نشان دهنده راندمان بالاتر نیروگاه خورشیدی شناور می‌باشد. تلفات ناشی از دمای پنل‌ها در نیروگاه خورشیدی واقع در خشکی ۱۰/۸ درصد می‌باشد درحالی‌که این تلفات در نیروگاه فتوولتائیک شناور ۳/۵ درصد شناور می‌باشد. همانطور که از نتایج طراحی پیداست نصب نیروگاه خورشیدی به صورت شناور با افزایش راندمان قابل توجهی نسبت به نیروگاه واقع در خشکی همراه گردیده است که این افزایش راندمان می‌تواند در طول دوره بهره‌برداری از نیروگاه هزینه مازاد احداث نیروگاه شناور نسبت به نیروگاه واقع در خشکی را جبران کند. معمولاً نیروگاه‌های خورشیدی شناور افزایش هزینه ۲۰ الی ۲۵ درصدی نسبت به نیروگاه‌های واقع در خشکی دارند که این هزینه در یک دوره سه الی چهار ساله با توجه به افزایش راندمان نیروگاه جبران می‌گردد. 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 می‌کند. با توجه به اصطکاک کم سطح آب و نیروگاه شناور می‌توان با صرف هزینه کم نسبت به نیروگاه واقع در خشکی این نیروگاه را به سیستم ردیاب مجهز کرد.

میزان دی‌اکسید کربنی که به ازای هر کیلووات برق تولیدی به جو زمین منتشر می‌شود به نوع سوخت مصرفی وابسته است. در ایران با توجه به نوع سوخت فسیلی مصرفی نیروگاه‌های تولیدکننده انرژی الکتریکی، طبق گزارش وزارت نیرو به ازای هر کیلووات انرژی الکتریکی تولیدی ۵۷۳/۹۳ گرم کربن دی‌اکسید وارد جو کره زمین می‌شود. بر این اساس و با توجه به تولید ۲۳۶۰ MWh انرژی الکتریکی سالانه توسط نیروگاه خورشیدی شناور از انتشار ۱۲۶۹۵۱۴/۸ کیلوگرم دی‌اکسید کربن در سال به جو کره زمین کاسته خواهد شد. بر اساس استانداردهای سازمان محیط زیست کانادا هر درخت بالغ در سال می‌تواند ۱۱۸ کیلوگرم دی‌اکسید کربن جذب کند که بر این اساس احداث این نیروگاه شناور معادل ۱۰۷۵۹ درخت در سال در کاستن دی‌اکسید کربن جو کره زمین عملکرد دارد. میزان تبخیر سطحی آب در شهر شیراز ۱۴۱۹/۱ میلی‌متر در سال می‌باشد بنابراین با توجه به

میزان پوشش سطحی نیروگاه خورشیدی شناور سالانه در حدود ۱۳۹۸۵/۲۳ متر مکعب در سال از تبخیر 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;۶۶:۸۱۵.

[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;۲۷۵:۱۱۵۳۸۹.

[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. ۳, 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 شاخص های 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