امکان سنجی نصب پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی شناور روی دریاچه سد کرخه با هدف تولید انرژی پاک و کاهش تبخیر آب

خدیجه عینی[۱]، مازیار چنگیزیان[۲] الهه مشهور[۳] مصطفی کیانی ده کیانی[۴]

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهیدچمران اهواز، کارشناس مدل‌های آب و انرژی سازمان آب و برق خوزستان

۲- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی مکانیک،دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۳- دانشیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی برق، دانشکده مهندسی، دانشگاه شهید چمران اهواز

۴- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی بیوسیستم، دانشکده کشاورزی، دانشگاه شهید چمران اهواز

Yashgin.eini@gmail.com

چکیده

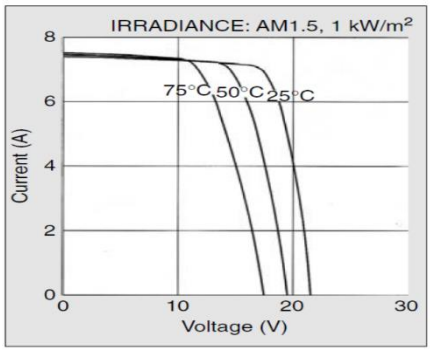
باتوجه به عمر محدود منابع سوخت‌های فسیلی و افزایش نگرانی‌های زیست‌محیطی ناشی از انتشار آلاینده‌ها استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر بعنوان یکی از راه‌های تأمین برق مورد توجه سیاست‌گذاران قرار گرفته‌است. سد کرخه بزرگ‌ترین سد خاکی ایران و خاورمیانه است که بعلت پهناور بودن دریاچه مخزن سد، مقادیر متنابهی آب از آن تبخیر می‌گردد. این مقاله با هدف تولید انرژی و جلوگیری از اتلاف آب شیرین، با استقرار گسترده پنل‌های فتوولتائیک خورشیدی روی دریاچه سد کرخه ارائه شد. نتایج حاکی از آن بود که در صورت پوشاندن سطح کامل دریاچه، سالانه از هدر رفت ۱۸۸ میلیون مترمکعب آب در اثر تبخیر جلوگیری می‌شود که این میزان آب حدود ۹ درصد از متوسط حجم آب مخزن و تقریباً ۴۰ درصد از متوسط سالانه آب شرب مصرفی استان خوزستان است. پس از جمع‌آوری داده‌های تبخیر روزانه یک دوره آماری ده ساله و برآورد تبخیر، تجزیه و تحلیل و شبیه‌سازی تولید برق تجدیدپذیر توسط داده‌های آب و هوایی ناسا و با استفاده از نرم‌افزار PVsyst انجام گرفت و نتایج نشان داد تنها با پوشش ۰/۵ درصد از سطح دریاچه معادل ۵۰۰۰۰۰ مترمربع با پنل‌های خورشیدی نه تنها یک میلیون مترمکعب آب ذخیره می‌شود بلکه ۱۷۱/۹۱ گیگاوات ساعت برق در سال تولید خواهد شد.

واژگان کلیدی: انرژی تجدیدپذیر، سد، پنل شناور، فتوولتائیک، PVsyst.

۱. مقدمه

کشور ایران به علت موقعیت جغرافیایی دارای اقلیم خشک و نیمه خشک بوده و میزان بارندگی در آن از سالی به سال دیگر متغیر است. اکنون مسئله اصلی کشور کم آبی مزمن ناشی از خشکسالی‌های مکرر است که این امر از دلایل اصلی کاهش ذخایر آب در پشت سدها به منظور بهره‌برداری و همچنین تولید برق است، بطور مثال سد کرخه در استان خوزستان بدلیل خشکسالی سال ۱۴۰۱ بطور کامل از مدار تولید انرژی خارج شد، بنابراین استفاده از انرژی‌های جایگزین به شدت احساس می‌شود. یکی از بهترین راهکارها

برای خروج از شرایط بحرانی تولید برق باتوجه به انرژی خورشید است. احداث نیروگاه‌های شناور فتوولتائیک روی بدنه‌های آبی مانند سـدها، مخازن، کانال‌ها و دیگر تاسیسات آبی به طور فزاینده‌ای در سراسر جهان به عنـوان یک انتخاب جایگزین در حال توسعه معرفی شده‌است. جـهان دارای پتانسیل عظیمی برای استفاده از فناوری هیبریدی نیروگاه برق آبی با خورشیدی شناور است (Solomin et al., 2021). این فناوری می‌تواند با ترکیب انرژی خورشیدی و انرژی آبی از امیـدوارکننده‌ترین روش‌هایی باشد که به طور بالقـوه برای تولید برق کارآمـد مورد استفاده قرار گیرد. این فناوری نوین می‌تواند تبخیر بیش از ۴۰ درصد از حجم آب ذخیره شده در دریاچه سدها را کاهش دهد. در کشورهایی که دارای مناطق خشک و نیمه خشک هستند و با بحران آب دست و پنجه نرم می‌کنند، استفاده از ماژول‌های FPV[۱] برای کاهش میزان تبخیر آب یک راه حل مناسب در جهت پایش و مدیریت منابع آبی است (Yousuf, 2020). در سال ۱۳۹۷ سید ابراهیم هاشمی و دکتر علیرضا شهرکی به مطالعه نصب پنل‌های خورشید شناور به منظور کاهش تبخیر آب و تولید انرژی در چاه نیمه‌های زابل در استان سیستان و بلوچستان پرداختند و با بررسی میزان تلفات آب به این نتیجه رسیدند که اجرای این سیستم باعث کاهش مقادیر قابل توجهی آب در حدود ۱۵۰ تا ۱۷۵ میلیون مترمکعب خواهد شد. اثر مفید کاهش اتلاف آب با تبخیر از مخازن به کسری از سطح تحت پوشش بستگی دارد (Antonio & Maria, 2017). از سویی دیگر پنل‌های خورشیدی شناور به دلیل اثر خنک کننده آب انرژی بیشتری نسبت به سیستم‌های زمینی با اندازه مشابه تولید می‌کنند(Gamarra & Ronk, 2019). در طراحی این سیستم‌ها نکته قابل توجه و مهم این است که هرچه میزان تابش خورشیدی بر سطح سلول‌های فتوولتائیک بیشتر باشد جریان الکتریکی بیشتری در سلول ها ایجاد می‌شود و متقابلا هرچه دمای سلول فتوولتائیک افزایش یابد میزان ولتاژ الکتریکی تولید شده در آن کاهش می یابد. کاهش ولتاژ تولیدی، راندمان سلول فتوولتائیک را کاهش می‌دهد که بطور تقریبی به ازای هر درجه افزایش دمای سلول فتوولتائیک توان تولیدی در حدود ۰/۵ درصد کاهش پیدا می‌کند، (شکل ۱.) نمودار کاهش توان تولیدی در اثر افزایش دما در یک سلول خورشیدی را نمایش می‌دهد (Gilbert, 2004).



شکل ۱: نمودار کاهش ولتاژ در اثر افزایش دما در یک سلول خورشیدی

در سال ۲۰۲۱ ناگانانتینی راویچاندران و همکاران به این نتایج رسیدند که جهت‌گیری افقی پنل‌ها و در نظر گرفتن زاویه شیب کمتر منجر به کاهش تعداد پنل‌ها و افزایش پتانسیل تولید پنل‌ها می‌شود و همچنین به حفظ دمای بهینه پنل کمک می‌کند. شافعی و همکارانش در سال ۲۰۲۱ به این نتیجه رسیدند که اگر تنها ۲۰ درصد از سطح دریاچه ناصر در مصر یعنی حدود ۱۰۰۰ کیلومتر مربع پوشش داده شود، برق سبز ارزان قیمتی تولید خواهد کرد که تقریبا برای ۱۶ درصد نیاز اروپا کافی می‌باشد و همچنین به کاهش تلفات آب از طریق تبخیر از دریاچه ناصـر کمک خواهد کرد. نکته حائز اهمیت این است که تولید برق از انرژی های تجدیدپذیر

[۱]-Floating Photovoltaic

می بایست قابل اعتماد تر، مقرون به صرفه تر و کارآمدتر از سایر منابع تولید انرژی بوده و همچنین بیشترین سود را برای محیط زیست داشته باشد (Perera, 2020). در آینـده نزدیک، سطح بدنه‌های آبی مرتبط با سدهای برق آبی، تاسیسات ذخیره‌سازی پمپاژ شده و حوضچه‌های خنک کننده که معمولاً دارای اتصالات شبکه برق موجود هستند، کاملاً با سیستم شناور پوشانده می‌شود که در طراحی این سیستم‌ها می‌بایست عواملی مانند سرعت باد، جریان آب، محدودیت دما، طوفان و اقدامات ایمنی مناسب برای انتقال نیرو از بدنه های آبی به زمین در نظر گرفته شود (Ingole et al., 2020). نیروگاه‌های PV شناور پتانسیل زیادی برای کاهش هزینه‌های تولید انرژی و صرفه‌جویی قابل توجه در قیمت زمین دارند به ویژه در مناطق جزیره‌ای که اراضی با ارزش در درجه اول برای مصارف مختلف از جمله کشاورزی و دامداری ترجیح داده می‌شوند. نیروگاه‌های PV شناور در مقایسه با سیستم‌های PV معمولی زمینی بیش از ۱۰ درصد عملکرد بهتری دارند و با این حال، لازم به ذکر است که هزینه سرمایه‌گذاری سیستم‌های PV شناور کمی بیشتر از سیستم‌های PV معمولی است (Cuce et al., 2022). مصطفی الشافعی و همکاران در سال ۲۰۲۱ با هدف توسعه یک روش استاندارد برای طراحی سیستم‌های خورشیدی شناور در سطح دریاچه ناصر جهت تولید انرژی خورشیدی تحقیقی را انجام دادند و عملکرد سیستم‌های خورشیدی متصل به شبکه را با استفاده از نرم افزار PVSyst شبیه سازی و طراحی کردند و بیان داشتند که با استفاده از نرم‌افزار PVsyst می‌توان بطور قابل قبولی گزارش نصب کامل نیروگاه را تهیه و توان خروجی و تلفات نیروگاه را بررسی و شبیه‌سازی کرد. ایران کشوریست که بیش از ۳۰۰ روز کاملا آفتابی در طول سال دارد و اگرچه این امر کشور را با چالش عمده تبخیر آب مواجه می‌کند اما این منطقه جغرافیایی را به یکی از مستعدترین و با صرفه‌ترین مناطق دنیا برای بکار بردن انرژی خورشیدی تبدیل کرده‌است. بنابراین با نصب نیروگاه‌های خورشیدی شناور روی سطح مخازن آب، نه تنها میزان قابل توجهی انرژی پاک تولید و از تولید گازهای گلخانه‌ای جلوگیری می‌شود بلکه جلوی تبخیر مقادیر متنابهی آب گرفته شده و بخشی از تهدید به فرصت تبدیل خواهد شد. تبخیر سطحی یکی از مهمترین علل اتلاف منابع آب در دنیا بخصوص در دریاچه‌های مصنوعی و طبیعی است. همه ساله به دلیل افزایش دمای هوا و تغییرات اقلیم به ویژه در فصل گرما میلیاردها لیتر از آب ذخیره‌سازی شده در حوضچه‌ها و دریاچه‌ها با تابش مستقیم نور خورشید تبخیر شده و از دسترس انسان خارج می‌گردد. از این رو توجه به مدیریت منابع آب و یافتن راهی برای رفع این مشکل و جلوگیری از تبخیر سالانه دو و نیم میلیارد مترمکعب آب از سدها و سایر منابع آب‌های سطحی مخصوصا در مناطق خشک و نیمه خشک به ویژه در استان خوزستان که از خشکسالی و بحران آب رنج می‌برد از اهمیت بالایی برخوردار است، بنابراین باید از هم اکنون سیاست و استراتژی استفاده کارا از منابع آب همراه با پیش بینی فناوری‌های موردنیاز جهت مقابله با این امر مورد نظر قرار گیرد.

۲. مواد و روش‌ها

سد کرخه ششمین سد طویل خاکی جهان و بزرگ‌ترین سد خاکی ایران و خاورمیانه است که بر روی رودخانه کرخه در ۲۲ کیلومتری شمال غربی شهرستان اندیمشک در استان خوزستان با موقعیت جغرافیایی ۴۸ درجه و ۱۶ دقیقه طول شرقی و ۳۲ درجه و ۴۰ دقیقه عرض شمالی قرار دارد. این سد در سال ۱۳۸۰ با هدف تامین و تنظیم آب جهت آبیاری ۳۲۰ هزار هکتار اراضی پایین‌دست، کنترل سیل‌های مخرب رودخانه و تولید ۹۳۴ گیگاوات ساعت انرژی برقابی سالانه بر روی رودخانه کرخه به بهره‌برداری رسید. حداکثر رقوم سد ۲۳۴ متر و ظرفیت کلی مخزن در حداکثر رقوم ۷۹۹۶ میلیون مترمکعب می‌باشد. تراز نرمال بهره برداری از مخزن سد ۲۲۰ متر و حجم معادل آن ۵۲۷۴ میلیون مترمکعب است. سطح دریاچه در تراز نرمال حدودا ۱۶۱ کیلومترمربع و طول دریاچه ۶۰ کیلومتر

می‌باشد. نیروگاه سد کرخه سه واحد تولید توان الکتریکی دارد که بسته وضعیت منابع آب موجود و حداقل تراز بهره برداری، فعال و یا غیرفعال می‌باشند. (شکل ۲.).

شکل ۲: موقعیت جغرافیایی سد کرخه

۲-۱. تولید انرژی نیروگاه سد کرخه

براساس اطلاعات بدست آمده از رصدخانه آب و انرژی سازمان آب و برق خوزستان، مقادیر خروجی سد کرخه و میزان تولید برق برای سال‌های آبی ۱۳۹۸ الی ۱۴۰۲ به شرح (جدول ۱.) ارائه می‌گردد. لازم به ذکر است که طی این سال‌ها مقادیر آب ذخیره شده در مخزن سد کرخه یکبار دست خوش پرآبی و سیلاب (۱۳۹۹-۱۳۹۸) و یکبار دست‌خوش خشکسالی و کم‌آبی (۱۴۰۱-۱۴۰۰) شده‌است و می‌توان این سال‌ها را به عنوان نمونه‌ایی از حداکثر و حداقل توان تولید نیروگاه در نظر گرفت.

جدول ۱: تولید انرژی نیروگاه سد کرخه

تولید انرژی (مگاوات ساعت)	حجم آب خروجی از توربین (میلیون‌مترمکعب)	سال آبی
۱۳۶۵۳۷۱	۵۷۷۱	۱۳۹۸-۱۳۹۹
۷۲۹۱۴۲	۳۵۳۰	۱۳۹۹-۱۴۰۰
۱۶۸۱۲	۱۰۱	۱۴۰۰-۱۴۰۱
۱۲۲۴۷۲	۵۹۹	۱۴۰۱-۱۴۰۲

۲-۲. مطالعات هیدرولوژی منطقه مورد مطالعه

استان خوزستان به طور کلی دارای آب و هوای نیمه صحرایی و دارای تابستان های خشک و غبارآلود است. خوزستان و سواحل مجاور آن از مناطق گرم دنیا هستند که بی‌تردید در نواحی هم عرض خود از نظر میزان گرما کم نظیرند. براساس داده‌های گردآوری شده

از سامانه متئومنز برای ایستگاه سینوپتیک صفی آباد دزفول برای دوره آماری ۱۳۹۲ الی ۱۴۰۲، تیرماه با متوسط دمای ۳۷/۱۸ درجه سانتی‌گراد گرم ترین ماه و دی ماه با متوسط دمای ۱۲/۴۰ خنک ترین ماه های سال در منطقه می‌باشند (جدول ۲.).

جدول ۲: متوسط دما ماهانه برای دوره آماری ۱۳۹۲ -۱۴۰۲ ایستگاه صفی‌آباد دزفول

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دمای هوا (°C)	۲۳/۷۳	۲۹/۹۱	۳۴/۸۲	۳۷/۱۸	۳۶/۴۵	۳۲/۶۴	۲۶/۷۳	۱۹/۴۵	۱۴/۵۰	۱۲/۴۰	۱۴/۷۰	۱۸/۳۰

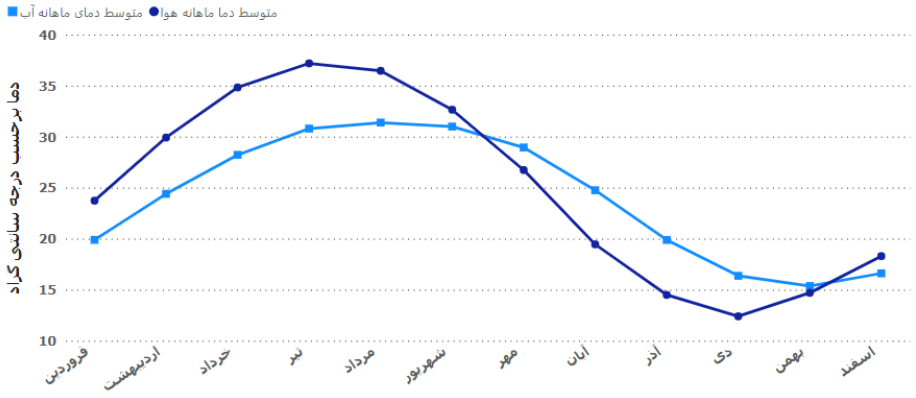
۲-۳. دمای آب

فاکتور بسیار مهم و تاثیرگذار در طراحی و بازدهی نیروگاه خورشیدی شناور دمای سطح آب دریاچه می‌باشد. متوسط ماهانه دمای سطح آب برای یک دوره آماری ده ساله (۱۳۹۲ -۱۴۰۲) از معاونت نیروگاه سد کرخه تهیه و با استفاده از نرم افزار PowerBI به شرح (جدول ۳.) به تفکیک برای هرماه محاسبه گردید. بیشترین دمای آب ۳۱/۳۸ درجه سانتیگراد در فصل تابستان و مربوط به مردادماه و کمترین دمای آب ۱۵/۳۷ درجه سانتی گراد در فصل زمستان و مربوط به بهمن ماه می‌باشد.

جدول ۳: متوسط ماهیانه درجه حرارت آب دریاچه سد کرخه برحسب درجه سانتیگراد دوره آماری ۱۳۹۲ الی ۱۴۰۲

ماه	فروردین	اردیبهشت	خرداد	تیر	مرداد	شهریور	مهر	آبان	آذر	دی	بهمن	اسفند
دمای آب (°C)	۱۹/۸۹	۲۴/۴۰	۲۸/۲۲	۳۰/۷۹	۳۱/۳۸	۳۰/۹۹	۲۸/۹۴	۲۴/۷۵	۱۹/۸۸	۱۶/۳۷	۱۵/۳۷	۱۶/۶۱

تغییرات متوسط ماهانه دمای آب و دمای هوا برای یک دوره ده ساله (۱۳۹۲-۱۴۰۲) در (شکل ۳.) نشان داده شده‌است. همانطور که در نمودار مشاهده می‌شود دمای هوای ماهانه بجز در فصول سرد سال بیش‌تر از دمای سطح آب مخزن می‌باشد، در فصول سرد دمای هوا به دلیل بزرگ بودن مقدار ظرفیت گرمایی آب زودتر از دمای سطح آب کاهش پیدا می‌کند (Hojjati et al., 2020) و براساس مطالعات انجام گرفته برای دمای هوا کمتر از ۲۰ درجه سانتی‌گراد دمای سطح آب بیشتر است (Taye et al., 2020)



شکل ۳: متوسط تغییرات ماهانه دمای هوا و دمای آب

۲-۴. محاسبه تبخیر

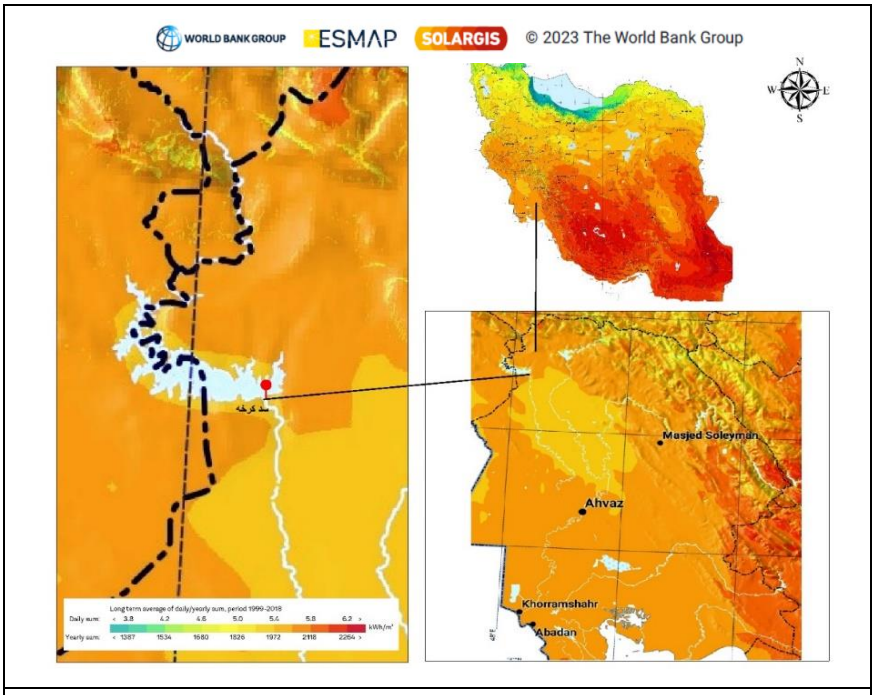
ساده‌ترین وسیله اندازه‌گیری تبخیر، استفاده از تشت‌هایی می‌باشد که بر روی زمین یا بر روی آب شناور می‌باشند. سال‌های زیادی‌ست که محققان و مهندسین، برای محاسبه تبخیر از سطح دریاچه‌ها و مخازن آبی و همچنین اندازه‌گیری تبخیر_تعرق گیاهان، از تشت‌های تبخیر استفاده می‌کنند. برای این منظور ابتدا میزان تبخیر از تشت اندازه‌گیری شده و آنگاه با استفاده از ضرایب مخصوص میزان تبخیر از سطح آب بدست می‌آید. باتوجه به آمار تشت تبخیر میتوان مقدار تبخیر از سطح آب (E_w) را از معادله زیر تخمین زد (۵).

$$E_w = K(E_{pan}) \quad (۱)$$

که در آن E_w، تبخیر از سطح آب (mm); E_{Pan}، تبخیر از سطح تشت (mm); و K ضریب ثابتی که مقدار آن بین ۰/۶ تا ۰/۸ می باشد.

۲-۵. پتانسیل انرژی خورشیدی

ایران که بر روی کمربند خورشیدی جهان قرار دارد از ۲۹۰۰ ساعت آفتابی (۳۴۰ روز) در سال برخوردار است. حداکثر و حداقل پتانسیل تابشی خورشید در کشور ایران ۶/۲۳ و ۳/۷۹ کیلووات ساعت بر مترمربع می‌باشد که متوسط انرژی تابشی خورشید ۵/۶ کیلووات ساعت در هر متر مربع است. پتانسیل خورشیدی کشور به حدی است که تنها با احداث نیروگاه خورشیدی روی یک درصد از خشکی ایران می‌توان تمام انرژی الکتریکی مورد نیاز کشور را تامین کرد. نقشه تابش خورشیدی ایران در (شکل ۴.) پتانسیل تابشی خورشیدی را نشان می دهد که براساس آن پتانسیل انرژی خورشیدی روزانه در منطقه مورد مطالعه بطور متوسط بین ۵ تا ۵/۴ کیلووات ساعت بر هر مترمربع می‌باشد.



شکل ۴: متوسط انرژی تابشی خورشیدی روزانه در محل سد کرخه

۲-۶. منطقه ارزیابی شده برای احداث نیروگاه خورشیدی شناور

مخزن سد کرخه در ناحیه شمالی بدنه سد قرار دارد و توسط تپه های کم ارتفاع با پوشش گیاهی کمی احاطه شده است. کل سطح مخزن برای نصب نیروگاه خورشیدی شناور مناسب است و فرصت های توسعه تقریبا نامحدود است. با این حال، برای اهداف این مطالعه، بر روی ناحیه سر حوضچه در ناحیه شرقی آبگیرهای سد تمرکز شده است که یک مکان ایده آل برای یک سایت آزمایشی خورشیدی شناور است. مساحت کل سطح مورد بررسی ۰/۵ درصد از کل مساحت دریاچه سد است که حدودا ۵۰ هکتار (پانصد هزار مترمربع) می‌باشد و به راحتی می‌تواند یک نیروگاه ۹۰ مگاواتی را در خود جای دهد و به گونه ای قرار گیرد که با عملیات سد مانند سرریز و آبگیرها تداخل نداشته باشد و همچنین در مجاورت دستگاه تابلو برق قرار گیرد، از طرفی دیگر به دلیل شیب ملایم خط ساحلی امکان احداث یک جاده دسترسی برای تجهیزات نیز وجود دارد (شکل ۵.).

شکل ۵: موقعیت مساحت مورد نظر جهت احداث نیروگاه شناور

۲-۷ . نرم افزار PVsyst

در این تحقیق مراحل شبیه سازی نیروگاه خورشیدی شناور در محیط نرم افزار PVsyst انجام گرفت. این نرم‌افزار برای طراحی و شبیه‌سازی نیروگاه‌های خورشیدی اعم از متصل به شبکه و جدا از شبکه در سطوح کیلوواتی و مگاواتی و همچنین طراحی پمپ‌های آب خورشیدی استفاده می‌گردد. خروجی‌های این نرم افزار برای طرح‌های توجیهی مورد تایید سازمان انرژی‌های تجدیدپذیر و بهینه‌سازی مصرف انرژی (ساتبا) می‌باشد. از ویژگی‌های کلیدی نرم‌افزار PVsyst، می‌توان به تخمین تولید انرژی سامانه‌های خورشیدی، مطالعات دقیق سایزینگ تجهیزات، تحلیل سایه و گزارش‌دهی جامع آن اشاره کرد.

۳. نتایج

۳-۱. محاسبه حجم تبخیر از سطح دریاچه

با افزایش دمای هوا دمای آب و در نتیجه افزایش جنبش مولکول‌های آب افزایش می‌یابد که این امر سبب تبخیر از سطح آزاد آب می‌شود. میزان تبخیر از دریاچه سد کرخه با استفاده از روش تشت تبخیر و (رابطه ۱.) برای هر روز از سال در یک دوره آماری ۱۰ ساله تخمین زده شد و مقادیر تجمعی سالانه تبخیر برای هر سال آبی به شرح (جدول ۴.) ارائه شده‌است (شرکت مدیریت منابع آب ایران، ۱۴۰۲).

جدول ۴: مقادیر تبخیر تجمعی سالانه از سطح آزاد آب با اعمال ضریب تشت تبخیر

سال	۱۳۹۲	۱۳۹۳	۱۳۹۴	۱۳۹۵	۱۳۹۶	۱۳۹۷	۱۳۹۸	۱۳۹۹	۱۴۰۰	۱۴۰۱
تبخیر (mm)	۱۸۴۷/۳	۱۹۰۴/۶	۱۹۵۹/۹	۲۰۰۰/۴	۲۱۱۴/۴	۱۹۰۶/۷	۱۸۸۹/۲	۱۹۰۷/۸	۲۲۷۷/۳	۱۹۶۵/۸

درنهایت با استفاده از محاسبات تبخیر از دریاچه سد کرخه و مقادیر متوسط مساحت دریاچه میزان حجم آب تلف شده محاسبه گردید (جدول ۵.).

جدول ۵: مقادیر تبخیر از سطح آزاد آب دریاچه با اعمال ضریب تشت تبخیر

	ارتفاع تبخیر (mm)	متوسط مساحت دریاچه (km^2)	حجم تبخیر (m^3)
مقدار تجمعی تبخیر دوره ده ساله	۲۱۲۷۸	۹۵/۲	۲۰۲۵۶۶۵۰۰۰
متوسط مقدار تبخیر دوره ده ساله	۱۹۷۷	۹۵/۲	۱۸۸۲۱۰۰۰۰

۳-۲. مقادیر تابش ماهانه خورشیدی

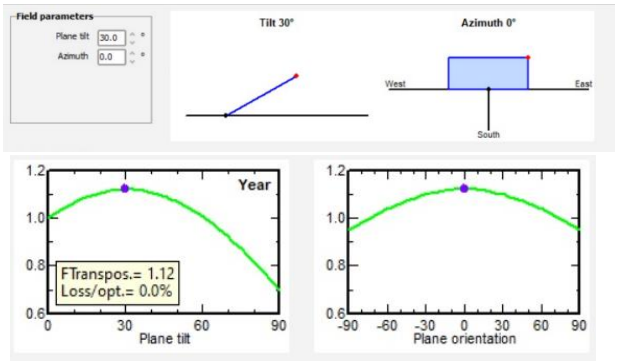
در شروع کار با نرم افزار ابتدا با انتخاب موقعیت جغرافیایی منطقه مورد مطالعه داده‌های هواشناسی و داده‌های تابش خورشیدی از پایگاه داده متئونورم[۱] متصل به پایگاه داده نرم‌افزار استخراج گردید. مقادیر متوسط تابش خورشیدی ماهانه در محل سد کرخه به شرح (جدول ۶.) می‌باشد.

جدول ۶: متوسط ماهانه تابش خورشیدی در موقعیت مورد مطالعه

ماه میلادی	ژانویه	فوریه	مارس	آپریل	می	ژوئن	جولای	آگوست	سپتامبر	اکتبر	نوامبر	دسامبر
GHI($KWh/m^2/year$)	۹۵/۸	۱۰۶/۸	۱۴۰/۲	۱۷۰/۷	۲۰۰/۷	۲۲۳/۸	۲۱۶/۶	۱۹۹/۳	۱۷۷/۰	۱۳۱/۰	۱۰۰/۶	۸۶/۶

۳-۳. تعیین زوایای بهینه شیب پنل و آزیموت

مرحله بعد تعیین زاویه شیب پنل‌ها و زاویه آزیموت است که این زوایا از نکات مهم در طراحی نیروگاه‌های فتوولتائیک و افزایش بازدهی این نیروگاه‌ها می‌باشند. نیروگاه‌های خورشیدی فتوولتائیک زمانی بیشترین بازدهی را دارند که پنل‌های فتوولتائیک عمود بر جهت تابش خورشید باشند، بنابراین بهینه‌ترین حالت پنل جهت دریافت حداکثر انرژی تابشی خورشید رو به جنوب بودن پنل است که برای این منظور زاویه آزیموت صفر در نظر گرفته شد. از سوی دیگر با سعی و خطا و تغییر مقادیر مختلف زاویه شیب پنل و بررسی میزان افت به ازای زوایای مختلف، در نهایت زاویه شیب ۳۰ درجه برای نصب پنل‌ها در نظر گرفته شد (شکل ۶.).



شکل ۶: تعیین زاویه آزیموت و شیب پنل و مقدار افت متناظر با زاویه انتخابی

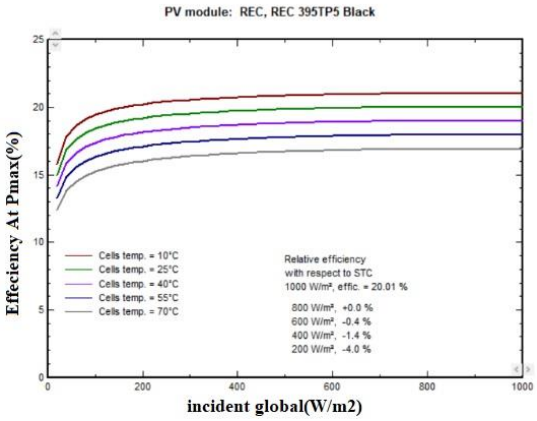
[۱]- Meteonorm

۳-۴. تعیین پنل خورشیدی و اینورتر

مرحله بعد انتخاب پنل خورشیدی و اینورتر می‌باشد که در این تحقیق از پنل مونوکریستال مدل REC TwinPeak 5 black با توان ۳۹۵ وات ساخت کشور سنگاپور با مشخصات به شرح (جدول ۷.) انتخاب گردید،نمودار راندمان سلول خورشیدی انتخابی در دماهای مختلف با استفاده از نرم افزار تهیه و در (شکل ۷.) نشان داده شده‌است، همانطور که مشاهده می‌شود بیشترین بازدهی مربوط به دمای ۱۰ درجه و کمترین آن در دمای ۷۰ درجه سانتی گراد است.

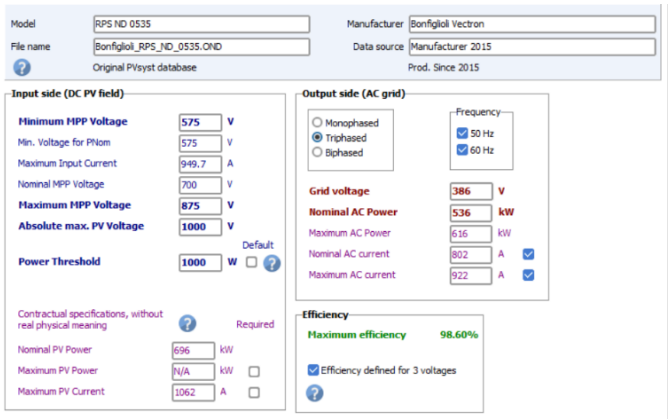
جدول ۷: مشخصات سلول خورشیدی REC TwinPeak 5 black

Cell type	132 half-cut mono c-Si p-type cells, 6 strings of 22 cells in series
Dimensions:	1899 x 1040 x 30 mm (1.97 m2)
Weight:	21.6 kg
Power Output - P_{MAX} (Wp)	395
Short Circuit Current - I_{SC} (A)	11.35
Open Circuit Voltage - V_{OC} (V)	44.9
Nominal Power Current - I_{MPP} (A)	10.62
Nominal Power Voltage - V_{MPP} (V)	37.2



شکل ۷: راندمان سلول خورشیدی در دماهای مختلف

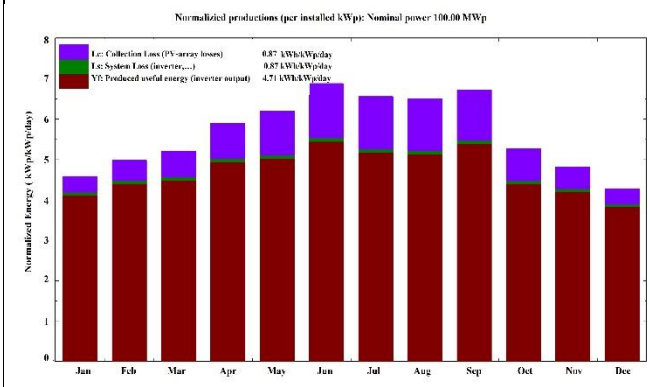
از موارد مهمی که در انتخاب اینورتر باید مورد توجه قرار بگیرد استفاده از حداقل تعداد اینورتر در احداث نیروگاه می‌باشد زیرا باعث کاهش اندازه کابل کشی و کاهش هزینه‌ها و از سویی دیگر کاهش هزینه تعمیر و نگهداری می‌شود. در این تحقیق بعد از بررسی کلیه موارد فوق اینورتر بونفیگلیولی مدل RPS ND 0535 ساخت کشور ایتالیا با مشخصات ارائه شده در (شکل ۸.) انتخاب گردید.



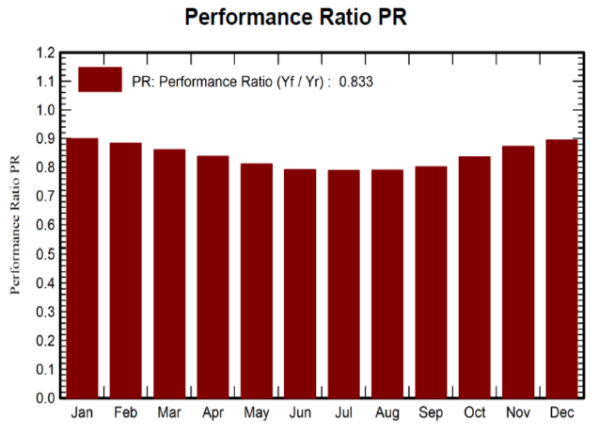
شکل ۸: مشخصات اینورتر انتخابی در شبیه سازی

۳-۵. شبیه سازی با استفاده از PVsyst

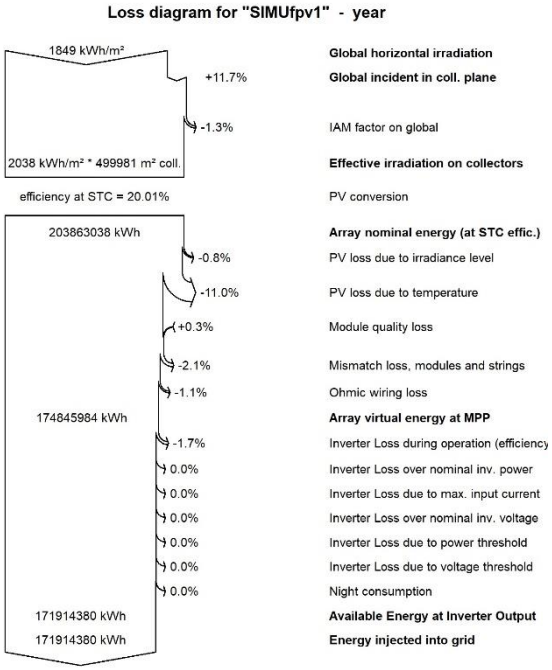
نرم افزار PVsyst بسته به شرایط موجود به لحاظ محدودیت مساحت در دسترس یا توان مورد نیاز بهره‌برداری بهترین تعداد و نحوه چیدمان را براساس نوع ماژول و اینورتر انتخابی پیشنهاد می‌دهد، که در این مطالعه براساس مساحت مورد نظر که ۵۰ هکتار از سطح دریاچه کرخه در نظر گرفته شد، تعداد ۲۵۳۱۶۰ ماژول با چیدمان ۲۰ ماژول در هر ردیف به تعداد ۱۲۶۵۸ ردیف بصورت موازی برای دریافت بیشترین و بهینه ترین انرژی پیشنهاد گردید، نتیجه نهایی شبیه سازی در (شکل ۹.) آمده است.



الف- تولید نرمالیزه شده نیروگاه و افت ماهانه سیستم



ب – ضریب عملکرد ماهیانه نیروگاه



ج- دیاگرام افت نیروگاه

شکل ۹: نتایج شبیه سازی نیروگاه خورشیدی شناور روی دریاچه سد کرخه

۴. بحث و نتیجه گیری

این مقاله به شبیه سازی یک نیروگاه خورشیدی شناور متصل به شبکه روی دریاچه سد کرخه با هدف تولید انرژی پاک و جلوگیری از هدر رفت منابع آبی با استفاده از نرم افزار PVsyst پرداخت. کلیه مراحل انتخاب ماژول خورشیدی، اینورتر و نحوه چیدمان ماژول‌ها در محیط نرم افزار انجام گرفت. نتایج حاکی از آن بود که میزان ۱۸۴۹ کیلووات در هر ساعت انرژی تابشی بعد از عبور از جو تحت تاثیر پارامترهای مختلف از جمله ضخامت اتمسفر، آلودگی‌های محیطی، پراکنده شدن تابش خورشیدی و دیگر عوامل تاثیرگذار به سلول‌های خورشیدی شناور رسیده و تبدیل به انرژی الکتریکی می‌شود. با توجه به نمودار (شکل ۹-الف) بیشترین میزان تولید از اواخر بهار تا اواخر تابستان تولید می‌شود که در این ایام ساعات روشنایی روز طولانی می‌باشد و از سویی دیگر میزان افت سیستم در این ماه‌های سال بیشتر گزارش شده‌است که این امر می‌تواند ناشی دمای بالای هوا باشد که تاثیر منفی بر عملکرد نیروگاهای خورشیدی دارد، در گراف (شکل ۹-ب) که نشان دهنده عملکرد جهانی سیستم‌های خورشیدی می‌باشد مشاهده می‌شود که عملکرد این سیستم در ماه‌های سرد سال بیش از ماه‌های گرم سال می‌باشد که همین موضوع یکی از دلایل احداث این نیروگاه‌ها بر روی آب بدلیل اثر خنک کنندگی آن می‌باشد تا بدین ترتیب بتوان در فصول گرم که بیشترین تابش را داریم بیشترین بازدهی را در تولید نیروگاه‌های خورشیدی داشته باشیم. دیاگرام افت که شامل انرژی ورودی، انرژی خروجی و تجزیه و تحلیل گام به گام تلفات است ابزار بسیار مفیدی برای بررسی کارایی و توان یک نیروگاه خورشیدی است که با استفاده از آن می‌توان مقادیر تلفات مختلف در سیستم را به طور دقیق بررسی کرد و در جهت رفع آن‌ها اقدام نمود. همانطور که در دیاگرام افت مشاهده می‌گردد تنها با پوشش ۰/۵ درصد از کل مساحت دریاچه سد کرخه، حدود ۲۰۳ گیگاوات انرژی اسمی تولید و از این میزان، ۱۷۱ گیگاوات ساعت برق در سال به شبکه تزریق خواهد شد و این اختلاف ۳۱ گیگاوات ساعت در سال، مجموع تلفات سیستم مانند افت عدم تطابق ماژول، نحوه چیدمان پنل‌ها ، افت اینورتر و سایر پارامترهایی ارائه شده در دیاگرام افت می‌باشد. در صورت پوشش ۱۰ درصدی سطح دریاچه قریب به ۳۲۰۰ گیگاوات ساعت برق در سال تولید خواهد شد که این میزان حدودا ۲۰ درصد میزان تولید کل نیروگاه‌های برقابی استان خوزستان و حدود ۴ برابر متوسط تولید سالانه نیروگاه کرخه در ده سال اخیر می‌باشد. از سوی دیگر در صورت پوشش کل سطح دریاچه، ۱۸۸ میلیون مترمکعب آب در سال ذخیره می‌شود . از آن‌جا که متوسط سالانه خروجی آب از توربین‌های نیروگاه کرخه حدودا ۱۰۱ میلیون مترمکعب می‌باشد و این حجم آب با عبور از واحدهای نیروگاهی حدود ۱۶ گیگاوات برق در سال تولید می‌کند، می‌توان نتیجه گرفت در صورت پوشش سطح آب علاوه بر جلوگیری از هدر رفت آب و تولید انرژی پاک، با عبور این حجم آب حفظ شده از توربین‌ها قریب به ۳۲ گیگاوات برق در سال از واحدهای نیروگاه برقابی نیز تولید خواهد شد و پس از آن این میزان آب به مصرف پایین دست می‌رسد. طبق بررسی‌های انجام شده از معاونت آبرسانی و رصدخانه آب و انرژی سازمان آب و برق خوزستان میزان آب تولیدی کل استان در سال ۱۴۰۱-۱۴۰۰ معادل ۶۲۳ میلیون مترمکعب بوده‌است که ۱۸۸ میلیون مترمکعب تبخیر معادل ۳۰ درصد از حجم آب تولیدی کل مخازن استان خوزستان می‌باشد و این میزان بسیار قابل تامل است. از سویی دیگر براساس آمار و اطلاعات میزان آب تحویلی شرب به شهرستان اهواز در سال ۱۴۰۱، ۱۴۱ میلیون مترمکعب بوده و این میزان تبخیر ۱/۳ برابر مصرف آب شرب اهواز در طول یک سال و حدود ۴۰ درصد از آب شرب مصرفی کل استان خوزستان است. بنابراین با پوشش سطح دریاچه با پنل خورشیدی نه تنها انرژی پاک تولید می‌شود بلکه تولید نیروگاه برقابی نیز افزایش می‌یابد و حجم زیادی از آب شیرین و باارزش حفظ و به مصرف پایین دست خواهد رسید. لازم به ذکر است که احداث نیروگاه‌ها تجدیدپذیر با متوسط طول عمر ۲۵ سال از تولید میلیون‌ها تن دی اکسید کربن نیز جلوگیری خواهد کرد.

باتشکر از مجموعه سازمان آب و برق خوزستان و حمایت واحدهای رصدخانه آب و انرژی، دفتر مطالعات منابع آب و دفتر پژوهش‌های کاربردی سازمان که در گردآوری و به روز بودن اطلاعات حامی این تحقیق بودند.

منابع

هاشمی، س.، (۱۳۹۷). **بررسی فنی و اقتصادی روش پوشش شناور فتوولتائیکی به منظور کاهش تبخیر آب و تولید انرژی مطالعه موردی: چاه نیمه‌های زابل، استان سیستان و بلوچستان**. پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه سیستان و بلوچستان

Cuce, E., Cuce, P. M., Saboor, S., Ghosh, A., & Sheikhnejad, Y. (2022). Floating PVs in Terms of Power Generation, Environmental Aspects, Market Potential, and Challenges. *Sustainability (Switzerland)*, *14*(5). https://doi.org/10.3390/su14052626

Elshafei, M., Ibrahim, A., Helmy, A., Abdallah, M., Eldeib, A., Badawy, M., & AbdelRazek, S. (2021). Study of Massive Floating Solar Panels over Lake Nasser. *Journal of Energy*, *2021*, 1–17. https://doi.org/10.1155/2021/6674091

Gamarra, C., & Ronk, J. J. (2019). Floating Solar: An Emerging Opportunity at the Energy-Water Nexus. *Texas Water Journal*, *10*, 32–45. https://doi.org/10.21423/twj.v10i1.7050

Gilbert, M. Masters. (2004). Renewable and Efficient Electric Power Systems. New Jersey: A john wiley & sons, inc., publication

Hojjati, E., Mahtabi, G., Taran, F., & Kisi, O. (2020). Estimating evaporation from reservoirs using energy budget and empirical methods: Alavian dam reservoir, NW Iran. *Italian Journal of Agrometeorology*, *2020*(2), 19–34. https://doi.org/10.13128/ijam-1033

Ingole, N., Kelzarkar, A., Rathod, P., & Bandewar, A. (2020). IRJET-Floating Solar Power Plants: A Review IRJET Journal Floating Solar Power Plants: A Review. *International Research Journal of Engineering and Technology*. www.irjet.net

Marco Antonio Esteves Galdino, & Marta Maria de Almeida Olivieri. (2017). Some Remarks about the Deployment of Floating PV Systems in Brazil. *J. of Electrical Engineering*, *5*(1), 10–19. https://doi.org/10.17265/2328-2223/2017.01.002

Moustafa Elshafei & S. M. Abdelrazik, A. A. E. (2021). IRJET- Design and Simulation Analysis of 1 MWP Grid Connected Photovoltaic System Floating over Lake Nasser by using PV SYST Software. *Irjet*, *8*(4).

Perera, H. D. M. R. (2020). Designing of 3MW Floating Photovoltaic Power System and its Benefits over Other PV Technologies. *International Journal of Advances in Scientific Research and Engineering*, *06*(04), 37–48. https://doi.org/10.31695/ijasre.2020.33782

Ravichandran, N., Fayek, H. H., & Rusu, E. (2021). Emerging floating photovoltaic system—case studies high dam and aswan reservoir in Egypt. *Processes*, *9*(6). https://doi.org/10.3390/pr9061005

Solomin, E., Sirotkin, E., Cuce, E., Selvanathan, S. P., & Kumarasamy, S. (2021). Hybrid floating solar plant designs: A review. *Energies*, *14*(10), 1–25. https://doi.org/10.3390/en14102751

Taye, B. Z., Nebey, A. H., & Workineh, T. G. (2020). Design of floating solar PV system for typical household on Debre Mariam Island. *Cogent Engineering*, *7*(1). https://doi.org/10.1080/23311916.2020.1829275

Yousuf, H. M. Q. M. A. J. Y. E.-C. Y. H. J. (2020). A Review on Floating Photovoltaic Technology (FPVT). *Current Photovoltaic Research*, *8*(3), 67–78. https://doi.org/10.21218/CPR.2020.8.3.067

http://dams.wrm.org