نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۲، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۶۵-۸۰

امکان‌سنجی فنی – اقتصادی و زیست‌محیطی احداث نیروگاه خورشیدی شناور ۱۰ مگاواتی بر روی سد طالقان

امیررضا قناعت
کارشناس ارشد، گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی؛ تهران؛ (نویسنده مسئول)
amirreza.ghanaat@gmail.com

زکیه احمدی
کارشناس ارشد، گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی؛تهران؛
zak.ahmadi@mail.sbu.ac.ir

حسن مردانی
معاونت امور اقتصادی، شرکت هلدینگ برق و انرژی صبا؛
mardani@sabapeg.com

نیما عبداله زادگان
دانشجوی کارشناسی‌ارشد، گروه برنامه‌ریزی و بهره‌برداری سیستم‌های قدرت، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه شهید بهشتی؛ تهران؛
nimaabdolahzadegan@gmail.com

تاریخ دریافت:
۱۴۰۴/۰۵/۲۸
تاریخ پذیرش:
۱۴۰۵/۰۴/۳۰

کلمات کلیدی:
نیروگاه خورشیدی شناور، سد طالقان، صرفه‌جویی در تبخیر آب، امکان‌سنجی اقتصادی، توسعه پایدار منابع انرژی.

چکیده

باتوجه‌به بحران فزاینده منابع آب و ضرورت استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر، توسعه نیروگاه‌های خورشیدی شناور به‌عنوان راهکاری نوین در بهره‌برداری بهینه از منابع آبی مطرح شده است. در این پژوهش، امکان‌سنجی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی احداث یک نیروگاه خور شیدی شناور به ظرفیت ۱۰ مگاوات بر روی مخزن سد طالقان موردبرر سی قرار گرفته ا ست. نتایج تحلیل فنی نشان می‌دهد که این نیروگاه قادر به تولید سالیانه حدود ۱۹/۴۷۷ میلیون کیلووات‌ساعت انرژی با نسبت عملکرد ۸۵/۵ درصد خواهد بود. تحلیل اقتصادی پروژه، بر ا ساس فروش برق تولیدی در بازار سبز بورس انرژی ایران، نرخ بازده داخلی ۳۳/۷۵ در صد و دوره بازگشت سرمایه ۵ ساله را نشان می‌دهد. از منظر زیست‌محیطی نیز، اجرای این طرح می‌تواند از انتشار بیش از ۱۷/۹۴۳ تُن دی‌اکسیدکربن و تبخیر سالانه حدود ۳۴۱ هزار کیلو لیتر آب جلوگیری کند. یافته‌های این پژوهش نشان می‌دهد که احداث نیروگاه خورشیدی شناور در سد طالقان نه‌تنها از نظر فنی و اقتصادی امکان‌پذیر است، بلکه از منظر زیست‌محیطی نیز مزایای قابل‌توجهی به همراه دارد و می‌تواند گامی مؤثر در جهت توسعه پایدار و مدیریت بهینه منابع طبیعی محسوب شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

۱. مقدمه

پیش‌بینی‌ها حاکی از آن است که سامانه‌های خورشیدی شناور تا سال ۲۰۳۰ به ظرفیت نصب شده‌ای در حدود ۱۰ گیگاوات و تولید سالانه ۱۳/۵ تراوات ساعت برق دست خواهند یافت[۱]. تحول در ترکیب منابع تولید انرژی در سطح جهان به دلیل کاهش آلایندگی‌های زیست‌محیطی و پاسخ به تقاضای فزاینده انرژی‌های پاک شتاب گرفته است. در این میان، انرژی خورشیدی به‌ویژه فناوری فوتوولتائیک نقشی کلیدی ایفا می‌کند؛ چرا که ظرفیت نصب آن با سرعتی چشمگیر در حال افزایش و هزینه‌های آن روبه‌کاهش است. در این راستا، بهره‌گیری از سامانه‌های خورشیدی در مناطق شهری و روستایی روندی گسترده یافته است [۱].

سامانه‌های فتوولتائیک شناور[۱] به‌منظور رفع محدودیت‌های سامانه‌های خورشیدی زمینی[۲] طراحی شده‌اند. این سامانه‌ها بر روی سطوح آبی نظیر دریاچه‌ها، سدها و حوضچه‌ها مستقر می‌شوند و به همین دلیل نیازی به استفاده از زمین‌های وسیع ندارند. استفاده از این فناوری به حفظ اراضی ارزشمند کمک می‌کند، به‌ویژه در مناطقی با تراکم جمعیت بالا که زمین مناسب برای احداث نیروگاه‌های خورشیدی کمیاب است. در مقایسه با نیروگاه‌های خورشیدی زمینی، فناوری خورشیدی شناور از مزایای گوناگونی برخوردار است که مهم‌ترین آن‌ها عبارت‌اند از:

بهبود راندمان از طریق خنک‌کنندگی طبیعی: فناوری خورشیدی شناور به دلیل مجاورت با آب، دمای پنل‌ها را به طور متوسط ۸ تا ۲۰ درجه سانتی‌گراد کاهش داده و باعث افزایش ۱۰ تا ۱۲ درصدی راندمان می‌شوند [۲].

کاهش تبخیر آب: پوشش سطح آب توسط این سامانه می‌تواند تا ۸۰ درصد از تبخیر جلوگیری کند که در مناطق خشک حائز اهمیت است [۳]. مهار رشد جلبک‌ها: سایه‌اندازی پنل‌ها نفوذ نور را کاهش داده و رشد جلبک‌های ناخواسته را محدود می‌کند؛ پوشش ۴۰ تا ۶۰ درصدی سطح آب می‌تواند تأثیر محسوسی داشته باشد [۳].

سهولت اجرا نسبت به نیروگاه‌های زمینی: نصب بر روی دریاچه‌ها و مخازن، به دلیل سطح صاف و نبود موانع، آسان‌تر بوده و نیازی به آماده‌سازی زمین ندارد [۴].

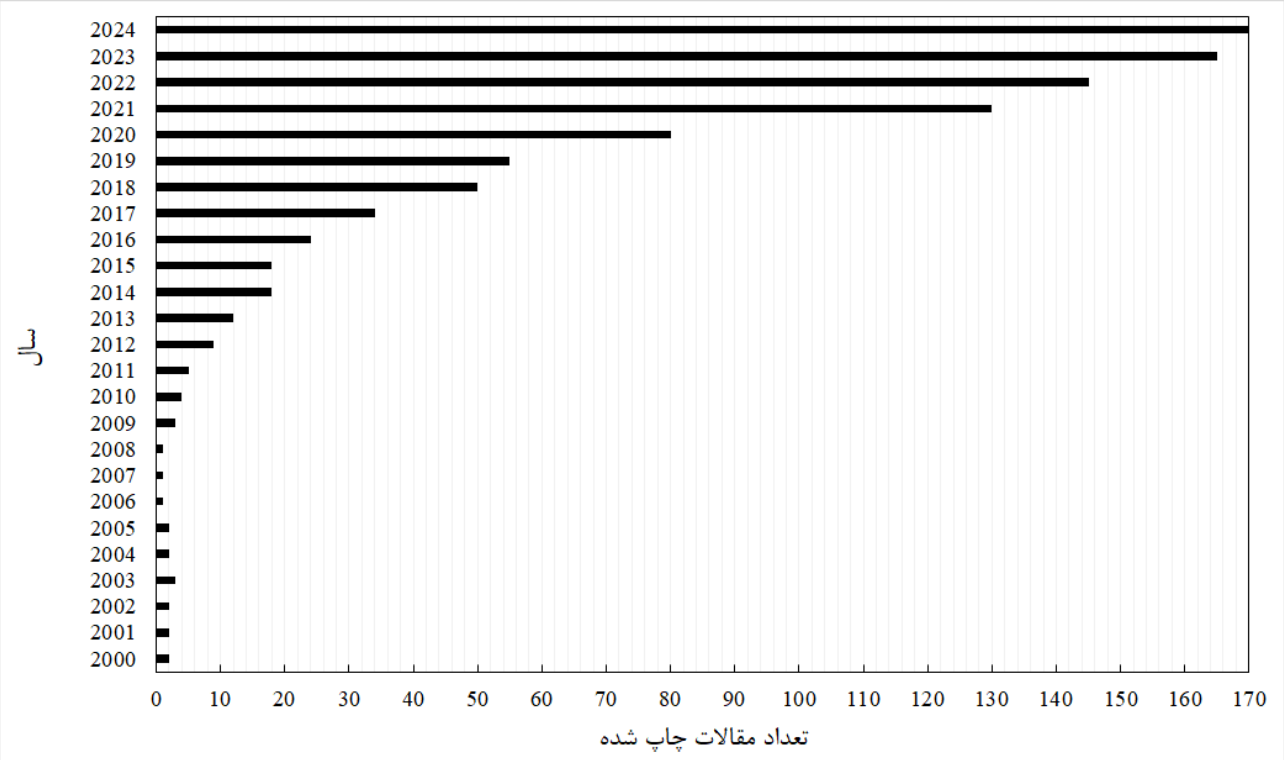
امکان تلفیق با سایر فناوری‌های انرژی تجدیدپذیر: فناوری خورشیدی شناور قابلیت هم‌افزایی با نیروگاه‌های برق‌آبی، توربین‌های بادی و مبدل‌های انرژی امواج را دارد که می‌تواند هزینه‌های زیرساختی را کاهش داده و بهره‌وری را ارتقا دهد [۵].

در این پژوهش، با جستجو در پایگاه Science of Web حدود ۹۰۰ مقاله مرتبط با سامانه خورشیدی شناور شناسایی شد که روند روبه‌رشد آن از سال ۲۰۲۰ نشان‌دهنده نوظهور بودن این حوزه تحقیقاتی است. در اینجا به بررسی برخی منابع می‌پردازیم (شکل ۱).

۱ Floating photovoltaic: FPV

۲ Ground photovoltaic: GPV

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۱. تعداد انتشارات تحقیقات نیروگاه‌های خورشیدی شناور بر اساس سال (داده‌های قابل‌دسترسی در ۱ دسامبر ۲۰۲۴ از Science of Web).

مرور مطالعات بین‌المللی نشان می‌دهد که فناوری فتوولتائیک شناور، علاوه بر مخازن داخلی و سدها، در محیط‌های ساحلی و فراساحلی نیز مورد توجه قرار گرفته است. در مرجع [۶]، مزایا، محدودیت‌ها و چالش‌های فنی نیروگاه‌های خورشیدی فراساحلی بررسی شده و عواملی نظیر شرایط محیطی نامساعد، خوردگی تجهیزات، بارهای ناشی از باد و موج و الزامات مربوط به سامانه‌های مهار و لنگرگاه به‌عنوان مهم‌ترین ملاحظات طراحی معرفی شده‌اند. نتایج مرجع [۷] نیز نشان می‌دهد که استقرار سامانه‌های خورشیدی شناور در آب‌های ساحلی و مواج از نظر فنی امکان‌پذیر است و رفتار دینامیکی سازه، از جمله رزونانس حرکتی و میزان نوسانات آن، با استفاده از مدل‌های مناسب قابل پیش‌بینی است. این مطالعات بیانگر آن است که توسعه سامانه‌های خورشیدی شناور در محیط‌های آبی، مستلزم توجه هم‌زمان به عملکرد الکتریکی و پایداری سازه‌ای سامانه است.

از منظر اقتصادی، مطالعات مختلف بر نقش شرایط محل اجرا، هزینه سرمایه‌گذاری و امکان استفاده از زیرساخت‌های موجود در توجیه‌پذیری نیروگاه‌های خورشیدی شناور تأکید کرده‌اند. در مرجع [۸] نشان داده شده است که ترکیب نیروگاه خورشیدی شناور با نیروگاه برق‌آبی می‌تواند سود سالانه مجموعه را تا ۲۱ درصد افزایش دهد. بااین‌حال، رقابت‌پذیری این فناوری در مقایسه با نیروگاه‌های خورشیدی زمینی به میزان هزینه‌های سرمایه‌ای آن وابسته است. بر اساس نتایج این مطالعه، برای دستیابی به شرایط رقابتی، هزینه سرمایه‌گذاری سامانه شناور باید به‌طور قابل‌توجهی کاهش یابد. همچنین، نتایج مرجع [۹] نشان می‌دهد که نیروگاه‌های خورشیدی شناور در برخی کشورهای اروپایی می‌توانند به دلیل اثر خنک‌کنندگی آب، تا حدود ۲ درصد بازده بیشتری نسبت به سامانه‌های زمینی داشته باشند. در این مطالعه، تأثیر زاویه شیب ماژول‌ها نیز بررسی شده و برای هر درجه افزایش زاویه شیب، ارزشی اقتصادی بین ۲/۵ تا ۷/۵ یورو به‌ازای هر کیلووات ظرفیت نصب‌شده گزارش شده است.

عملکرد بهره‌برداری و نگهداری نیز یکی از عوامل تعیین‌کننده در اقتصاد نیروگاه‌های خورشیدی شناور است. بر اساس مرجع [۱۰]، اگرچه این سامانه‌ها ممکن است نسبت به نیروگاه‌های زمینی با نرخ خرابی بیشتری مواجه باشند، اجرای برنامه نگهداری استاندارد می‌تواند قابلیت دسترسی و تولید انرژی آن‌ها را بهبود دهد. در این مطالعه، هزینه هم‌تراز تولید برق در شرایط نگهداری معمول حدود ۰/۰۵۵۱ دلار به‌ازای هر کیلووات‌ساعت محاسبه شده است که رقابت‌پذیری نسبی این فناوری را در مقایسه با نیروگاه‌های خورشیدی زمینی نشان می‌دهد.

مطالعات موردی انجام‌شده در کشورهای مختلف نیز نشان‌دهنده وابستگی عملکرد فنی و اقتصادی نیروگاه‌های خورشیدی شناور به شرایط اقلیمی و ویژگی‌های محل نصب است. در مرجع [۱۱] ، دو نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت ۹/۳۶ مگاوات در اندونزی و بریتانیا مقایسه شده‌اند. نتایج نشان می‌دهد که سایت اندونزی، با ضریب ظرفیت ۲۰/۳ درصد و تولید سالانه حدود ۱۶ گیگاوات‌ساعت، عملکرد بهتری داشته است. این تفاوت را می‌توان

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

به میزان تابش خورشیدی و شرایط اقلیمی مناسب‌تر در اندونزی نسبت داد. در هر دو سایت، تلفیق نیروگاه خورشیدی شناور با زیرساخت نیروگاه برق‌آبی، به‌عنوان راهکاری برای استفاده بهینه از زمین، تجهیزات اتصال به شبکه و منابع آبی مورد توجه قرار گرفته است.

در غنا نیز امکان احداث یک نیروگاه ترکیبی خورشیدی شناور و برق‌آبی با ظرفیت ۴۲۰ مگاوات بر روی سد آکوسومبو بررسی شده است [۱۲]. نتایج این مطالعه نشان می‌دهد که پروژه مذکور می‌تواند سالانه حدود ۵۲۰٬۲۳۳ مگاوات ساعت برق تولید کرده و از انتشار ۳۰۸٬۹۰۴ تن دی‌اکسیدکربن جلوگیری کند. هزینه هم‌تراز تولید برق حدود ۰/۱۰ دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت، درآمد سالانه ۵۲/۲ میلیون دلار و دوره بازگشت سرمایه حدود ۱۲ سال برآورد شده است. این نتایج نشان می‌دهد که اگرچه پروژه‌های بزرگ‌مقیاس خورشیدی شناور به سرمایه‌گذاری اولیه قابل‌توجهی نیاز دارند، استفاده از زیرساخت سدها و نیروگاه‌های برق‌آبی می‌تواند توجیه‌پذیری اقتصادی و زیست‌محیطی آن‌ها را افزایش دهد.

در مطالعه دیگری در جنوب هند، پتانسیل احداث نیروگاه خورشیدی شناور بر روی مخزن سد راجگات با استفاده از شبیه‌سازی‌های فنی ارزیابی شده است [۱۳]. در این مطالعه، با فرض پوشش ۲۵ درصد از سطح مخزن، میزان تولید سالانه سامانه برآورد شده و کاهش تبخیر آب معادل ۱۳۹۵ مترمکعب به‌ازای هر مگاوات ظرفیت نصب شده گزارش شده است. همچنین، هزینه هم‌تراز تولید برق حدود ۰/۰۳۶ دلار به‌ازای هر کیلووات ساعت برآورد شده که بیانگر ظرفیت اقتصادی مناسب این فناوری در مناطق دارای تابش خورشیدی مطلوب و محدودیت منابع آب است.

در مجموع، مطالعات انجام‌شده در اروپا، آسیا و آفریقا نشان می‌دهد که نیروگاه‌های خورشیدی شناور در مقایسه با نیروگاه‌های زمینی، مزایایی مانند عدم نیاز به زمین، امکان استفاده مشترک از زیرساخت‌های نیروگاه برق‌آبی، افزایش نسبی راندمان ماژول‌ها و کاهش تبخیر آب دارند. مجاورت پنل‌ها با سطح آب می‌تواند از طریق کاهش دمای عملکرد و تجمع کمتر گردوغبار، تولید انرژی را افزایش دهد؛ به‌طوری‌که افزایش تولید تا حدود ۱۰ تا ۱۲ درصد در برخی مطالعات گزارش شده است [۱۴]. همچنین، پوشش بخشی از سطح مخزن می‌تواند از تبخیر آب و رشد نامطلوب جلبک‌ها بکاهد [۱۵]. بااین‌حال، هزینه بیشتر سازه‌های شناور، پیچیدگی سامانه مهار و لنگرگاه، نوسانات تراز آب، خوردگی تجهیزات و بارهای ناشی از باد و موج از مهم‌ترین چالش‌های این فناوری محسوب می‌شوند [۱].

با وجود گسترش مطالعات مربوط به نیروگاه‌های خورشیدی شناور در کشورهای مختلف، نتایج این مطالعات به شدت به شرایط اقلیمی، ویژگی‌های مخزن، هزینه‌های سرمایه‌گذاری، زیرساخت‌های موجود و سازوکارهای قیمت‌گذاری برق در هر کشور وابسته است؛ بنابراین، نتایج آن‌ها را نمی‌توان مستقیماً به شرایط ایران تعمیم داد. افزون بر این، مطالعات محدودی در ایران به ارزیابی هم‌زمان جنبه‌های فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی نیروگاه‌های خورشیدی شناور، با درنظرگرفتن قیمت فروش برق در بازار سبز، کاهش تبخیر آب و امکان استفاده از زیرساخت‌های موجود نیروگاه برق‌آبی پرداخته‌اند.

درحالی‌که ایران به دنبال توسعه پایدار منابع انرژی و افزایش سهم انرژی‌های تجدیدپذیر در سبد انرژی ملی است، پژوهش حاضر می‌تواند به گسترش دانش در زمینه فناوری فتوولتائیک شناور کمک کند و چارچوبی برای ارزیابی مزایای فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی این فناوری در مقایسه با سامانه‌های خورشیدی زمینی در اختیار سیاست‌گذاران، متخصصان انرژی و نهادهای اجرایی قرار دهد. هرچند هزینه سرمایه‌گذاری اولیه سامانه‌های خورشیدی شناور معمولاً بیشتر از سامانه‌های زمینی است، این پژوهش امکان کمی‌سازی مزایای افزوده آن‌ها، از جمله افزایش نسبی بازده، کاهش نیاز به زمین، کاهش تبخیر منابع آبی و محدودکردن رشد نامطلوب جلبک‌ها را فراهم می‌سازد. در این راستا، سد طالقان به‌عنوان یکی از منابع مهم آب سطحی کشور و یکی از منابع تأمین آب شرب و کشاورزی منطقه، از ظرفیت مناسبی برای استقرار نیروگاه خورشیدی شناور برخوردار است.

بر همین اساس، پژوهش حاضر با تمرکز بر احداث یک نیروگاه خورشیدی شناور ۱۰ مگاواتی بر روی مخزن سد طالقان، پتانسیل تولید انرژی، توجیه‌پذیری اقتصادی، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن، کاهش تبخیر آب و صرفه‌جویی در استفاده از زمین را به‌صورت هم‌زمان بررسی می‌کند. موقعیت جغرافیایی سد، شدت تابش مناسب، وسعت سطح مخزن و وجود زیرساخت نیروگاه برق‌آبی، سد طالقان را به گزینه‌ای مناسب برای انجام این مطالعه تبدیل کرده است.

ساختار ادامه مقاله به این صورت است که در بخش دوم، اجزای اصلی سامانه فتوولتائیک شناور معرفی می‌شوند. در بخش سوم، روش‌شناسی ارزیابی فنی و اقتصادی با استفاده از نرم‌افزارهای PVsyst و کامفار تشریح می‌شود. بخش چهارم به معرفی سد طالقان، ویژگی‌های مخزن و پتانسیل خورشیدی محل اختصاص دارد. در بخش پنجم، نتایج ارزیابی فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی، شامل میزان تولید انرژی، عملکرد سامانه، ساختار

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

انتقال توان، هزینه‌های پروژه، تحلیل حساسیت، کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن و کاهش تبخیر آب ارائه و تحلیل می شوند. در نهایت، جمع‌بندی و نتایج اصلی پژوهش در بخش ششم ارائه می‌شود.

۲. اجزای سامانه فتوولتائیک شناور

در جدول ۱، اجزای اصلی نیروگاه خورشیدی شناور از نظر ماژول‌های فتوولتائیک و تجهیزات تبدیل توان تا حد زیادی مشابه نیروگاه‌های زمینی هستند؛ با این حال، استقرار سامانه بر سطح آب، نیاز به اجزای اختصاصی از جمله شناورها، سامانه مهار و لنگرگاه و کابل‌ها و اتصالات مقاوم در برابر رطوبت را ایجاد می‌کند. همچنین، نوسان تراز آب مخزن، بارهای ناشی از باد و جریان آب، احتمال خوردگی و محدودیت دسترسی برای تعمیرات، از جمله ملاحظاتی هستند که باید در مرحله طراحی، اجرا و بهره‌برداری نیروگاه خورشیدی شناور مورد توجه قرار گیرند .

جدول ۱. اجزای اصلی نیروگاه خورشیدی شناور [۶, ۱۶]

جزء سامانه	ویژگی‌ها در نیروگاه خورشیدی شناور
شناور یا پانتون	پانتون نیروی شناوری لازم برای نگهداری ماژول‌ها بر سطح آب را فراهم می‌کند و تعداد و آرایش آن بر اساس ظرفیت نیروگاه، تعداد پنل‌ها و سطح قابل‌استفاده مخزن تعیین می‌شود.
سازه شناور	شناورها و سکوهای نگهدارنده معمولاً از موادی مانند پلی‌اتیلن با چگالی بالا یا پلاستیک تقویت‌شده با الیاف شیشه ساخته می‌شوند که در برابر رطوبت، تابش فرابنفش و خوردگی مقاومت مناسبی دارند.
سامانه مهار و لنگرگاه	شامل لنگر، بویه، طناب یا سیم‌بکسل و نقاط اتصال ساحلی است و از جابه‌جایی، چرخش یا برخورد آرایه‌های شناور در اثر باد، جریان آب و تغییرات تراز مخزن جلوگیری می‌کند.
ماژول‌های فتوولتائیک	معمولاً از ماژول‌های سیلیکونی کریستالی استفاده می‌شود؛ با این حال، قاب، پایه و اتصالات ماژول باید در برابر رطوبت، خوردگی، تابش فرابنفش و تغییرات حرارتی مقاوم باشند.
کابل‌ها و اتصالات الکتریکی	کابل‌ها، کانکتورها و جعبه‌های اتصال باید در برابر رطوبت، تابش خورشید، تغییرات دما، سایش و حرکت ناشی از باد یا نوسان سطح آب مقاوم باشند. استفاده از اتصالات آب‌بند و جعبه‌های اتصال با حفاظت مناسب، مانندIP۶۷ ، ضروری است.
تجهیزات بهره‌برداری و نگهداری	اینورترها، تابلوهای برق و سامانه‌های ذخیره‌سازی ترجیحاً در بخش خشکی یا سکوی محافظت‌شده نصب می‌شوند تا دسترسی، ایمنی و تعمیرات دوره‌ای آسان‌تر باشد.

همان‌گونه که در جدول ۲ نشان داده شده است، نیروگاه‌های خورشیدی شناور در مقایسه با نیروگاه‌های زمینی دارای تفاوت‌هایی در الزامات بهره‌برداری تجهیزات الکتریکی و شرایط محیطی هستند. در سامانه‌های شناور، رطوبت، خوردگی، تغییر تراز آب و حرکت نسبی سازه، نیاز به ماژول‌های مقاوم‌تر در برابر رطوبت و PID[۳]، آب‌بندی بهتر جعبه‌های اتصال و کانکتورها، و استفاده از کابل‌های مقاوم در برابر UV، سایش و خمش را افزایش می‌دهد. همچنین، مسیر کابل و سامانه هم‌بندی باید با در نظر گرفتن حرکت آرایه طراحی شوند تا از کشیدگی کابل، نفوذ آب و قطع پیوستگی ارت جلوگیری شود؛ ازاین‌رو، به‌دلیل ماهیت شناور سامانه، پیوستگی شبکه ارت باید به صورت چندمسیره و افزونه (redundant) طراحی شود تا در صورت قطع یک مسیر، تداوم اتصال زمین حفظ گردد.

۳ Potential-Induced Degradation

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۲، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۶۵-۸۰

جدول ۲. مقایسه تجهیزات و الزامات فنی نیروگاه‌های خورشیدی زمینی و شناور [۱۷]

تجهیز	نیروگاه خورشیدی زمینی	نیروگاه خورشیدی شناور
ماژول فتوولتائیک	ماژول دارای گواهی IEC ٦١٢١٥ و IEC ٦١٧٣٠ ؛ انتخاب بر اساس توان نامی، ضریب دمایی، بار باد و برف، مقاومت مکانیکی و شرایط گردوغبار	ماژول دارای گواهی IEC ٦١٢١٥ و IEC ٦١٧٣٠ ، با اولویت مقاومت بالاتر در برابر رطوبت وPID ؛ استفاده از کپسولانت و بک‌شیت با نفوذپذیری بخار آب پایین
جعبه اتصال ماژول	جعبه اتصال دارای حفاظت مناسب در برابر گردوغبار و رطوبت محیط، متناسب با شرایط سایت	جعبه اتصال با حداقل درجه حفاظت IP٦٧ ، آب‌بندی قابل‌اطمینان و مقاومت مناسب در برابر رطوبت، خوردگی و نفوذ آب؛ انتخاب بر اساس IEC ٦٢٧٩٠
کابلDC	کابل تک‌رشته مخصوصPV ، مقاوم در برابر UVو دمای محیط؛ اجرا در سینی، داکت، کانال یا ترانشه	کابل مخصوص PV مطابق IEC ٦٢٩٣٠ ، با روکش مقاوم در برابر UV، رطوبت، سایش و خمش ناشی از حرکت آرایه؛ کابل‌ها و کانکتورها باید حتی‌المقدور در مسیرهای محافظت‌شده و خارج از تماس مستقیم با آب نصب شوند.
مسیر و مهار کابل	مسیر ثابت؛ مهار با سینی، بست یا داکت و کنترل افت ولتاژ	مسیر شناور یا زیرآبیِ طراحی‌شده؛ دارای طول آزاد کنترل‌شده برای تغییر تراز آب و حرکت جزایر شناور؛ مهار با بست مقاوم در برابر UV یا گیره استنلس‌استیل و حفاظت در برابر سایش
کانکتورDC	کانکتور دارای گواهی IEC ٦٢٨٥٢ ، متناسب با ولتاژ و جریان طراحی استرینگ	کانکتور دارای گواهی IEC ٦٢٨٥٢ ، با آب‌بندی و حفاظت مکانیکی مناسب؛ جلوگیری از تماس یا غوطه‌وری کانکتور در آب ضروری است
جعبه تجمیع DC/AC	تابلو و جعبه تجمیع دارای حفاظت مناسب مطابق شرایط محیطی محل نصب	جعبه‌های DC و AC با درجه حفاظت حداقل IP٦٥ ، تثبیت مکانیکی مناسب روی شناور یا سکوی ایمن، گلند و آب‌بندی مقاوم در برابر نفوذ آب
هم‌بندی و ارت	اتصال فریم ماژول‌ها و سازه فلزی به شبکه ارت سایت؛ طراحی مطابق IEC ٦٢٥٤٨-١ و مقررات محلی	هم‌بندی فریم‌ها و اجزای فلزی با هادی مسی؛ مسیر ارت به چاه ارت ساحلی، الکترود بستر مخزن یا سامانه ارت طراحی‌شده متصل می‌شود
آرایش هم‌بندی	هم‌بندی سری یا شبکه‌ای، بر اساس طراحی ارت نیروگاه	استفاده از هادی اصلی ارت به‌صورت موازی روی آرایه شناور و اتصال مستقل هر بخش به آن، به‌منظور حفظ تداوم ارت در صورت قطع یک اتصال

۳. روش‌شناسی

در این پژوهش، جهت تحلیل فنی سامانه خورشیدی شناور پیشنهادی بر روی مخزن سد طالقان، از نرم‌افزار PVsyst بهره گرفته شده است. نرم‌افزار PVsyst یکی از معتبرترین و جامع‌ترین ابزارهای شبیه سازی سامانه‌های فتوولتاییک در سطح بین‌المللی ا ست که با درنظرگرفتن داده‌های اقلیمی، خصوصیات فنی پنل‌ها، اینورترها، آرایش سامانه و راندمان و انرژی خروجی سالانه نیروگاه را بادقت بالا برآورد می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

نشریه علمی (فصلنامه) «انرژی ایران»
دوره ۲۸، شماره۲، تابستان ۱۴۰۴، صفحه ۶۵-۸۰

برای برر سی اقت صادی پروژه نیز از نرم‌افزار کامفار، تو سعه‌یافته تو سط سازمان تو سعه صنعتی ملل متحد[۴]، ا ستفاده شده ا ست. این نرم‌افزار ابزار قدرتمندی برای تحلیل مالی و اقت صادی پروژه‌های سرمایه‌گذاری بوده و با محا سبه شاخص‌هایی همچون نرخ بازده داخلی[۵]، ارزش خالص فعلی[۶]، دوره بازگشت سرمایه[۷]، و تحلیل حساسیت، امکان ارزیابی جامع سودآوری و ریسک سرمایه‌گذاری را فراهم می‌سازد.

٤. مطالعه موردی: سد طالقان

سد طالقان یکی از سدهای مهم مخزنی کشور بوده که در شمال غربی استان البرز و در شهرستان طالقان واقع شده است. این سد در بخش طالقان، در فاصله‌ای حدود ۱۳۰ کیلومتری از شهر تهران قرار دارد. پروژه احداث این سد باهدف، تأمین آب شرب، کشاورزی، واپایش سیلاب‌ها و تولید انرژی برق‌آبی عنوان شده است. در شکل ۲ طرح پیشنهادی نصب نیروگاه خورشیدی شناور ارائه شده است.



شکل۲. طرح کلی نیروگاه خورشیدی شناور[۱۸]

علاوه بر نقش کلیدی سد در مدیریت منابع آب منطقه، در پایین‌د ست آن نیروگاهی از نوع برق‌آبی با ظرفیت تولید ۱۷/۸ مگاوات احداث شده ا ست. کارفرمای اصلی این پروژه، شرکت سهامی آب منطقه‌ای تهران بوده و مدیریت بهره‌برداری از آن نیز تحت‌نظر همین نهاد صورت می‌گیرد.
ظرفیت کل مخزن این سد حدود ۴۲۰ میلیون مترمکعب برآورد شده است که آن را در زمره سدهای با ظرفیت متوسط در کشور قرار می‌دهد. مساحت سطحی مخزن در شرایط نرمال بهره‌برداری حدود ۱۲ کیلومترمربع ا ست که بخش قابل‌توجهی از آن در اغلب ایام سال در معرض تابش م ستقیم خورشید قرار دارد. بر اساس گزارش‌ها منتشر شده در سال ۱۴۰۴، تنها ۵۳٪ از حجم کل مخزن دارای آب ذخیره‌شده بوده است. موضوعی که بیانگر کاهش منابع آبی ورودی و افت سطح ذخیره‌سازی در مقایسه با ظرفیت طراحی است. باوجود این افت، سطح قابل‌توجهی از مخزن در بیشتر ایام سال همچنان در دسترس است که می‌تواند به‌عنوان عرصه‌ای مناسب برای نصب سامانه‌های خورشیدی شناور با حداقل تأثیر بر کیفیت آب و اکوسیستم آبی مورداستفاده قرار گیرد.

۴ The united nations industrial development organization: UNIDO

۵ Internal rate of return: IRR

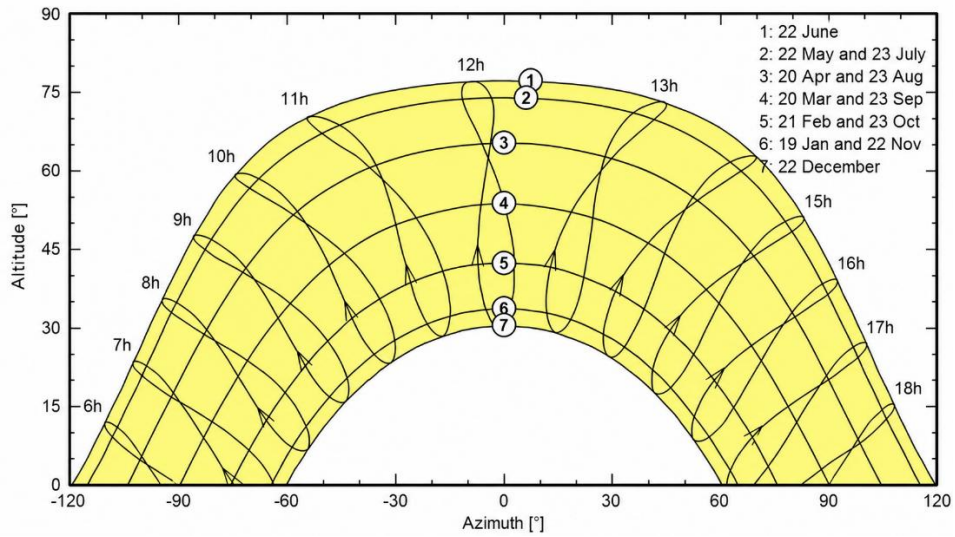
۶ Net present value: NPV

۷ Payback period: PBP

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

بر ا ساس داده‌های خور شیدی و نمودار م سیر خور شید در این موقعیت جغرافیایی، م شخص می شود که این منطقه از پتان سیل بالایی برای دریافت انرژی خورشیدی برخوردار است.

شکل ۳ نمودار مسیر خورشید را نشان می‌دهد که در فصل تابستان، به‌ویژه در حوالی ۲۲ ژوئن (اوایل تیرماه)، خورشید در بیشترین ارتفاع خود (حدود ۷۵ درجه) در آسمان ظاهر می‌شود که منجر به بیشینه دریافت تابش خورشیدی در طول روز می‌گردد. در مقابل، در فصل زمستان و به‌ویژه حوالی ۲۲ دسامبر (اوایل دی‌ماه)، ارتفاع خورشید در ظهر به حدود ۳۰ درجه کاهش می‌یابد که به طور طبیعی موجب کاهش میزان تابش روزانه خواهد شد. این تغییرات در مسیر خورشید باعث ایجاد یک الگوی فصلی مشخص در دریافت انرژی خورشیدی در منطقه می‌شود.



شکل۳. مسیر خورشید در سد طالقان (نرم‌افزار PVsyst نسخه ۷,۰)

میانگین تابش روزانه خورشید در منطقه طالقان بر اساس داده‌های هواشناسی بلندمدت در حدود ۵/۰ تا ۵/۵ کیلووات‌ساعت بر مترمربع در روز تخمین زده می شود. این مقدار ن شان‌دهندۀ ظرفیت قابل‌توجه منطقه برای بهره‌برداری از انرژی خور شیدی، به‌ویژه در قالب نیروگاه‌های خور شیدی شناور، است.

از منظر توجیه فنی و اقتصادی، ا ستفاده از سطح آب مخزن برای ا ستقرار سامانه‌های خور شیدی دارای چندین مزیت قابل‌توجه ا ست. نخ ست آنکه کاهش تبخیر آب با ا ستقرار پنل‌ها بر سطح آب، مزیتی زی ست‌محیطی مح سوب می شود. دوم، امکان ا ستفاده از خطوط انتقال موجود، نزدیکی به مراکز مصرف، و فضای باز و بدون سایه‌اندازی در مخزن، از نظر فنی شرایط بسیار مساعدی را فراهم می‌کند.

در ادامه این پژوهش، امکان سنجی احداث یک نیروگاه خور شیدی شناور با ظرفیت ۱۰ مگاوات بر مخزن سد طالقان، باهدف فروش برق تولیدی از طریق تابلوی سبز بورس انرژی، از منظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی موردبررسی دقیق قرار خواهد گرفت.

مدت بهره‌برداری پروژه برابر با ۲۵ سال در نظر گرفته شده ا ست. در تحلیل مالی انجام شده، نرخ بازده داخلی تعدیل شده با لحاظ نرخ سرمایه‌گذاری مجدد ۲۰ در صد و سرمایه‌گذاری کل ۲۵ در صد محا سبه گردیده ا ست. همچنین در برر سی جداگانه‌ای، نرخ بازده داخلی تعدیل شده با درنظرگرفتن سرمایه کل سهام‌داران و نرخ ۲۸ درصد برآورد شده است.

بازار سبز بورس انرژی به‌عنوان بستری نوین برای تبادل برق تولیدی از منابع تجدیدپذیر، نقش مهمی در توسعه پایدار صنعت انرژی کشور ایفا می‌کند. این بازار باهدف ایجاد ساختاری شفاف، رقابتی و تخصصی برای معاملات برق سبز شکل‌گرفته و زمینه را برای جذب سرمایه‌گذاری بخش خصوصی در پروژه‌های پاک فراهم کرده است. یکی از مزایای کلیدی بازار سبز، امکان فروش برق تجدیدپذیر با نرخ‌هایی بالاتر از تعرفه‌های معمول خرید تضمینی ا ست که جذابیت اقتصادی پروژه‌ها را افزایش می‌دهد. بر همین ا ساس، پیش‌بینی می شود در سال ۱۴۰۴، میانگین قیمت معامله برق

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در بازار سبز حدود ۵۴۵۰ تومان به‌ازای هر کیلووات‌ساعت باشد؛ رقمی که می‌تواند نرخ بازگشت سرمایه را برای پروژه‌های خورشیدی بهبود قابل‌توجهی ببخشد.

علاوه بر مزایای مالی، بازار سبز با فراهم‌کردن د ستر سی به اطلاعات لحظه‌ای، شفاف سازی معاملات و حذف وا سطه‌های غیر ضروری، ف ضای اطمینان‌بخشی برای تولیدکنندگان و خریداران ایجاد کرده است. همچنین، این بازار به تحقق اهداف کلان کشور در زمینه کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، افزایش سهم انرژی‌های پاک و ارتقای امنیت انرژی کمک می‌کند. از منظر سیا ست‌گذاری نیز، تابلوی سبز بورس انرژی ابزار منا سبی برای هدایت منابع مالی به سمت پروژه‌های زی ست‌محیطی و کم‌کربن مح سوب می شود. در این چارچوب، قیمت آب معادل ۱۵ هزار تومان در نظر گرفته شده است که می‌تواند مبنایی برای ارزیابی بخشی از درآمدها قرار گیرد.

۵. تحلیل نتایج به‌دست‌آمده

در این بخش، تحلیل نتایج به‌دست‌آمده در قالب سه محور اصلی شامل ارزیابی فنی، ارزیابی اقتصادی و ارزیابی زیست‌محیطی صورت‌گرفته است.

۵.۱. ارزیابی فنی

به‌منظور ارزیابی فنی عملکرد نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت نامی ۱۰ مگاوات پیک، شبیه‌سازی سامانه با استفاده از نرم‌افزار تخصصی PVsyst انجام شد. سامانه طراحی‌شده از نوع متصل به شبکه بوده و با پیکربندی آرایه‌های ثابت در زاویه شیب ۳۷ درجه و زاویه سمت‌گیری (آزیموت) صفر درجه نسبت به جنوب جغرافیایی مورد تحلیل قرار گرفت. مشخصات اصلی خروجی حاصل از شبیه‌سازی در نرم‌افزار PVsyst در جدول ۳ ارائه شده است.

جدول ۳. ویژگی‌های کلی سامانه

مؤلفه	مشخصات فنی
توان اسمی هر ماژول (وات پیک)	۳۲۰
تعداد ماژول‌ها	۳۲،۷۳۶
توان کل نصب‌شده (مگاوات پیک)	۱۰/۴۸
توان نامی هر اینورتر	۱۰۰۰
تعداد اینورترها	۱۰
توان کل اینورترها (مگاوات)	۱۰
نسبت ظرفیت DC به AC	۱/۰۵

شبیه‌سازی انجام‌شده نشان می‌دهد که سامانه طراحی‌شده قادر به تولید ۱۹،۴۷۷،۱۰۵ کیلووات‌ساعت در سال انرژی خالص تزریقی به شبکه خواهد بود. مقدار تولید ویژه سالانه برای سامانه معادل ۱۸۵۹ کیلووات‌ساعت به‌ازای هر کیلووات پیک محا سبه شده ا ست که بازتاب‌دهنده کارایی منا سب سامانه در شرایط اقلیمی محل نصب ا ست. نسبت عملکرد[۸] نیز برابر با ۶/۸۵ درصد برآورد شده که نشان‌دهنده سطح بالای بهره‌وری سامانه پس از درنظرگرفتن تمامی تلفات (تلفات حرارتی، الکتریکی، محیطی و عملکردی) ا ست. د ستر سی سامانه برابر با ۹۹ در صد در نظر گرفته شده ا ست که معادل حدود ۳/۷ روز خامو شی سالیانه برآورد می شود. در جدول ۴، تراز ماهانه انرژی تولیدی، تابش دریافتی و شاخص عملکرد سامانه ارائه شده است:

[۸] Performance ratio: PR

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۴. تراز انرژی ماهانه و تحلیل اقلیمی

ماه شمسی	تابش افقی kWh/m²	تابش پراکنده kWh/m²	تابش مایل kWh/m²	تابش مؤثر kWh/m²	انرژی آرایه kWh	انرژی تزریق‌شده به شبکه kWh	نسبت عملکرد
فروردین	۱۴۶/۴	۵۲/۹۶	۱۸۰/۶	۱۷۳/۶	۱٬۷۰۷٬۹۴۱	۱٬۶۸۷٬۴۱۱	۰/۸۹۲
اردیبهشت	۱۷۹/۲	۵۷/۹۷	۱۸۱/۲	۱۸۱/۲	۱٬۷۵۲٬۴۴۸	۱٬۷۳۱٬۱۶۷	۰/۸۷۳
خرداد	۲۱۶/۰	۶۳/۶۳	۲۰۱/۲	۱۹۱/۹	۱٬۸۱۲٬۳۸۷	۱٬۷۸۹٬۰۰۴	۰/۸۴۹
تیر	۲۳۳/۲	۶۲/۳۵	۲۰۴/۴	۱۹۴/۵	۱٬۸۰۰٬۸۶۸	۱٬۷۷۸٬۷۳۳	۰/۸۳۱
مرداد	۲۲۸/۹	۶۵/۷۱	۲۰۶/۶	۱۹۶/۸	۱٬۸۰۱٬۶۰۸	۱٬۷۷۸٬۹۴۰	۰/۸۲۲
شهریور	۲۱۳/۲	۵۷/۸۴	۲۱۴/۰	۲۰۴/۶	۱٬۸۶۷٬۷۴۳	۱٬۸۴۴٬۹۴۵	۰/۸۲۳
مهر	۱۷۸/۶	۴۳/۷۸	۲۱۰/۳	۲۰۱/۸	۱٬۸۶۵٬۰۴۲	۱٬۵۹۴٬۰۳۶	۰/۷۲۳
آبان	۱۳۲/۳	۴۵/۱۹	۱۷۸/۰	۱۷۱/۸	۱٬۶۳۴٬۳۳۷	۱٬۶۱۴٬۴۷۷	۰/۸۶۶
آذر	۹۰/۵	۲۹/۲۱	۱۴۵/۸	۱۴۰/۰	۱٬۳۸۹٬۶۹۳	۱٬۳۷۲٬۶۲۲	۰/۸۹۹
دی	۸۰/۸	۲۶/۵۲	۱۴۳/۲	۱۳۸/۹	۱٬۳۹۰٬۵۳۸	۱٬۳۷۲٬۷۷۸	۰/۹۱۵
بهمن	۸۸/۰	۲۸/۲۱	۱۵۱/۹	۱۴۷/۱	۱٬۴۸۸٬۶۵۵	۱٬۴۷۱٬۲۳۵	۰/۹۲۴
اسفند	۱۰۲/۵	۲۳/۵۱	۱۵۰/۵	۶,۱۴۵	۱٬۴۵۹٬۷۴۹	۱٬۴۴۱٬۷۵۶	۰/۹۱۴

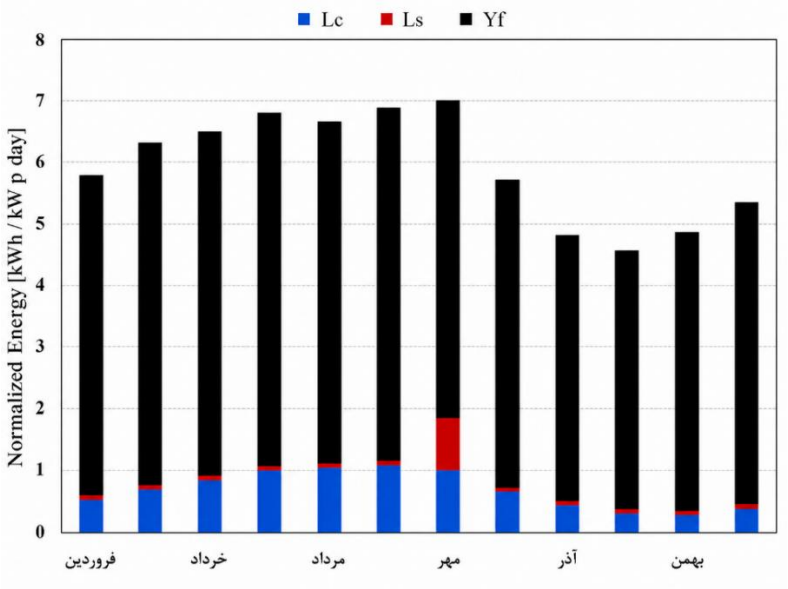
در شکل ۴ انرژی و تلفات تولید شده در سامانه فتوولتاییک را نمایش می‌دهد. بیانگر تلفات نرمال شده[۹] آرایه فتوولتائیک است که شامل اثرات دما، عدم تطابق ماژول‌ها و سایه‌اندازی می شود؛ مجموع تلفات نرمال شده[۱۰] کل سامانه را در بر می‌گیرد که علاوه بر تلفات آرایه، شامل تلفات اینورتر، کابل‌ها و سایر اجزا نیز هست؛ و انرژی خروجی نهایی سامانه[۱۱] پس از کسر تمامی تلفات بوده و شاخصی از عملکرد واقعی سامانه فتوولتائیک به شمار می‌رود.

[۹] Collection loss :Lc

[۱۰] System loss: Ls

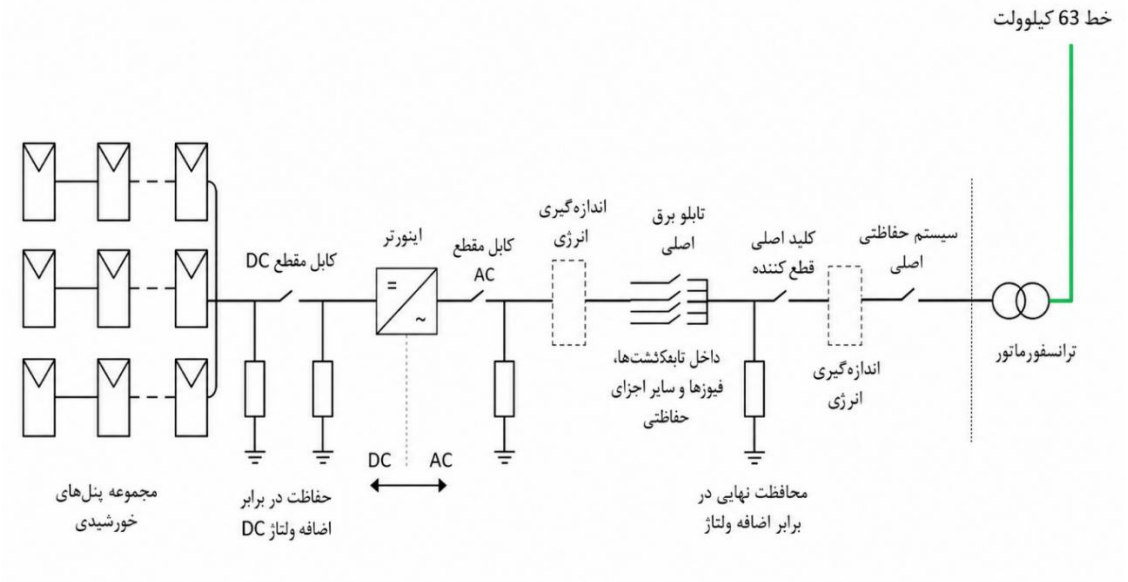
[۱۱] Final energy yield: Yf

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۴. انرژی و تلفات تولید شده سامانه فتوولتاییک

طبق شـکل ۵ مسـیر انتقال انرژی از پنل‌ها شـامل تجهیزات حفاظتی و کلیدهای قطع در سـمت DC، اینورترهای DC به AC، کلید قطع AC و تجهیزات اندازه‌گیری اولیه انرژی اسـت. پس از آن، تابلو برق اصـلی شـامل فیوزها، بریکرها و سـایر اجزای حفاظتی قرار دارد. در ادامه، کلید اصـلی قطع‌کننده، سـامانه حفاظت نهایی، و تجهیزات اندازه‌گیری ثانویه پیش از ترانسـفورماتور قدرت نصـب شـده‌اند. در نهایت، انرژی تولیدشـده از طریق ترانسفورماتور به خط انتقال ۶۳ کیلوولت متصل می‌گردد. این ساختار، نه‌تنها ایمنی و پایداری عملکرد سامانه را تضمین می‌کند، بلکه قابلیت پایش، قطع اضطراری و حفاظت در برابر اضافه ولتاژ را در تمام سطوح فراهم می‌آورد.



شکل۵. شماتیک کلی نصب نیروگاه خورشیدی شناور

۲.۵. ارزیابی اقتصادی

در ادامه تحلیل عملکرد فنی، ارزیابی اقتصادی پروژه به‌منظور سنجش توجیه‌پذیری مالی و بازده سرمایه‌گذاری انجام‌گرفته است. این ارزیابی باهدف بررسی هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه، سرمایه در گردش، هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری سالانه، و نیز تحلیل شاخص‌های مالی نظیر نرخ بازده داخلی و ارزش فعلی خالص صـورت‌گرفته اسـت. اطلاعات ارائه‌شـده در جداول و نمودارهای این بخش، مبنای تصـمیم‌گیری برای سـرمایه‌گذاران و سیاست‌گذاران در زمینه اجرای پروژه‌های مشابه را فراهم می‌کند.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۵، مؤلفه‌های مرتبط با سرمایه در گردش پروژه را شامل می‌شود که از جمله آن‌ها می‌توان به هزینه قطعات یدکی، حساب‌های دریافتنی، نرخ بهره سرمایه در گردش و هزینه‌های سالانه بهره‌برداری و نگهداری اشاره کرد. جدول ۶ نیز به تفکیک اجزای سرمایه‌گذاری اولیه پرداخته و هزینه‌های مرتبط با تجهیزات اصلی، سازه‌ها، عملیات عمرانی، سامانه‌های کنترلی و تجهیزات جانبی را ارائه می‌دهد. با فرض وجود نیروگاه برق‌آبی، امکان بهره‌برداری از ترانسفورماتور آن برای تأمین و توزیع توان الکتریکی فراهم شده و در نتیجه، هزینه احداث ترانسفورماتور جدید حذف می‌گردد. کل هزینه سرمایه‌گذاری اولیه معادل ۶۹۴،۴۲۵،۸۴۹،۰۰۰ تومان است. جدول ۶ هزینه‌هایی را نمایش می‌دهد که بر اساس خروجی‌های نرم‌افزار PVsyst محاسبه شده‌اند.

جدول۵. سرمایه در گردش

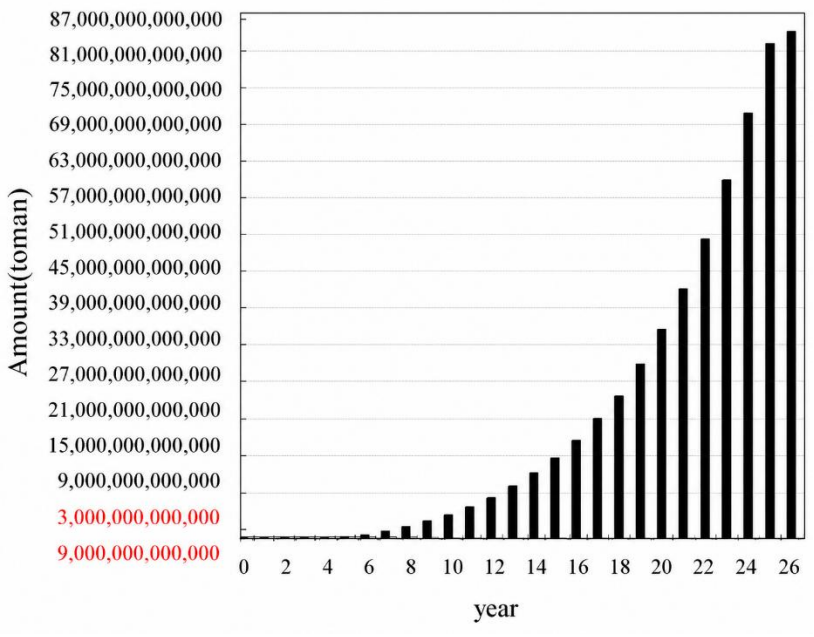
شرح	مقدار (تومان)
قطعات یدکی نگهداری (۱۵٪ افزایش سالانه)	۱،۸۶۲،۰۶۵،۰۰۰
نرخ بهره سرمایه در گردش	٪۱۳/۲۶
نرخ تنزیل	٪۲۵
هزینه‌های O&M سالانه (۱۲٪ افزایش سالانه)	۱۶،۷۴۷،۱۰۰،۰۰۰
درآمد فروش برق سالانه (۱۸٪ افزایش سالانه)	۱۰۶،۱۵۰،۲۲۲،۲۵۰

جدول۶. هزینه‌های پروژه

دسته‌بندی	شرح	مقدار (تومان)	دسته‌بندی	شرح	مقدار (تومان)
کارهای عمرانی	سازه‌های شناور اتاق‌های کنترل و پست حصارکشی سامانه زهکشی کابل تجهیزات شست‌وشوی ماژول	۲۸۸،۱۳۶،۸۸۵،۰۰۰	ماژول‌های خورشیدی	ماژول‌های بالای ۳۲۰ وات	۲۹۳،۲۹۹،۲۰۰،۰۰۰
			اینورتر	۱ مگاواتی	۳۸،۰۲۹،۵۰۵،۰۰۰
سازه های نصب و فونداسیون	فونداسیون نصب ماژول		تجهیزات کنترلی	پایش جعبه اتصال کابل‌ها و هادی‌ها تجهیزات کلیدزنی فشارضعیف (LT) سامانه ارتینگ	۶۲،۱۱۴،۸۵۹،۰۰۰
تجهیزات متفرقه	جعبه‌ابزار و ابزار اندازه‌گیری و ...	۱۲،۸۴۵،۴۰۰،۰۰۰			
جمع کل سرمایه‌گذاری اولیه	۶۹۴،۴۲۵،۸۴۹،۰۰۰				

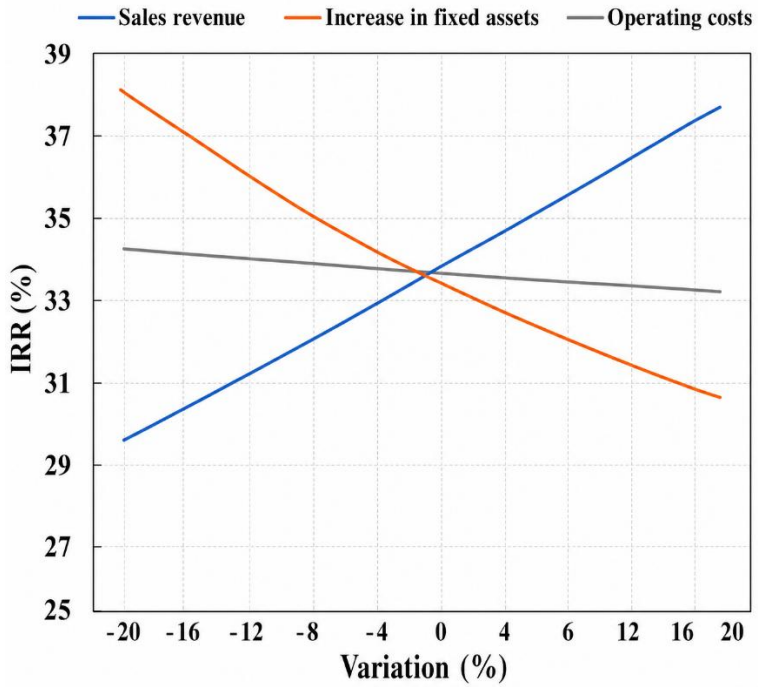
در این تحلیل، سال صفر هم به‌عنوان سال ساخت پروژه در نظر گرفته شده و سال ۲۶ام نیز به‌عنوان سال پایان دوره بهره‌برداری و زمان اسقاط پروژه تعیین گردیده است. مطابق شکل ۶، پروژه تا سال پنجم در مرحله جبران هزینه‌ها قرار دارد و از سال پنجم به بعد وارد مرحله سوددهی می‌شود. از این نقطه، بازگشت سرمایه به‌صورت تصاعدی افزایش‌یافته و تا سال بیست و پنجم به مقدار قابل‌توجهی می‌رسد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۶. سود تجمعی حاصل از حل مسئله برنامه‌ریزی پیشنهادی

در شکل ۷ تحلیل حساسیت IRR را نسبت به سه عامل کلیدی: درآمد فروش[۱۲]، سرمایه‌گذاری ثابت[۱۳] و هزینه‌های عملیاتی[۱۴] نشان می‌دهد. همان‌طور که مشخص است، IRR بیشترین حساسیت را نسبت به تغییرات درآمد فروش دارد (شیب تندتر)، درحالی‌که تغییرات هزینه‌های عملیاتی و سرمایه‌گذاری ثابت اثر کمتری دارند.



شکل۷. حساسیت IRR

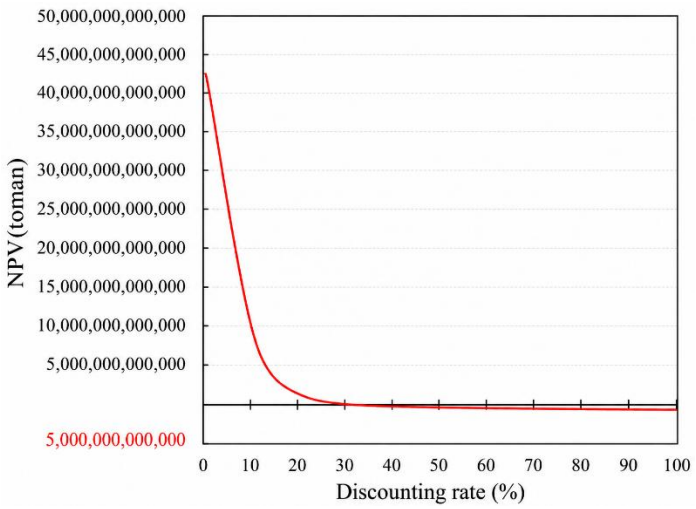
بر اساس نتایج تحلیل اقتصادی، ارزش فعلی خالص سرمایه‌گذاری کل در نرخ تنزیل ۲۵ در صد برابر با ۵۸۵،۳۲۸،۰۳۰،۱۰۰ تومان به‌دست‌آمده که نشان‌دهنده سودآوری مثبت پروژه است. در شکل ۸ رابطه بین نرخ تنزیل و ارزش فعلی خالص را نشان می‌دهد. با افزایش نرخ تنزیل از ۰ به ۱۰۰

[۱۲] Sales revenue
[۱۳] Increase in fixed assets
[۱۴] Operating costs

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

در صد، NPV به طور پیو سته کاهش می‌یابد. همچنین نرخ بازده داخلی سرمایه‌گذاری معادل ۳۳/۷۵ در صد و بالاتر از نرخ تنزیل در نظر گرفته شده ا ست که این مو ضوع بیانگر بازدهی بالاتر پروژه نسبت به حداقل بازده موردانتظار سرمایه‌گذاران ا ست. تحقق هم‌زمان NPV مثبت و بزرگ‌تر بودن IRR از نرخ تنزیل، دو شرط اصلی لازم برای توجیه‌پذیری اقتصادی پروژه را فراهم کرده و نشان می‌دهد این طرح از منظر مالی برای سرمایه‌گذاری مناسب است.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]



شکل۸. رابطه بین نرخ تنزیل و ارزش فعلی خالص

۳.۵. ارزیابی زیست‌محیطی

نتایج حاصل از تحلیل عملکرد یک نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت ۱۰ مگاوات نشان می‌دهد که این سامانه در طول دورهٔ بهره‌برداری ۲۵ساله خود قادر خواهد بود از انتشار ۱۷/۹۴۳ تن دی‌اکسیدکربن جلوگیری کند.

از دیدگاه فیزیکی، راه‌اندازی این نیروگاه نیازمند اشغال فضایی حدود ۱۹۵٬۰۰۰ مترمربع از سطح آب است. قرارگیری پنل‌های خورشیدی بر روی این فضا، علاوه بر تأمین انرژی پاک، با خود آثار جانبی مفیدی به همراه دارد. یکی از اثرات مثبت زیست‌محیطی این طرح، کاهش تبخیر آب از سطح مخزن سد است؛ به‌گونه‌ای که حضور این پنل‌ها می‌تواند سالانه از تبخیر حدود ۳۴۱٬۰۰۰ کیلو لیتر آب جلوگیری کند که این موضوع از منظر حفاظت از منابع آبی بسیار حائز اهمیت است و همچنین منجر به صرفه جویی سوخت ۴ میلیون ۸۶۹ هزار مترمکعب سالانه شود [۱۹].

در مجموع، نیروگاه خورشیدی شناور موردنظر نه‌تنها به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای کمک می‌کند، بلکه با تأثیرات مثبت خود بر منابع آبی و بهره‌برداری بهینه از سطوح بلااستفاده آبی، به‌عنوان راهکاری کارآمد و پایدار در گذار به سمت انرژی‌های پاک و مدیریت منابع طبیعی شناخته می‌شود.

٤,٥. مقایسه بین نیروگاه خورشیدی زمینی و شناور در پروژه‌ی مورد مطالعه

در جدول ۷، مقایسه‌ی جامعی بین نیروگاه خورشیدی زمینی و نیروگاه خورشیدی شناور در پروژه‌ی موردمطالعه ارائه شده است که نشان می‌دهد، علی‌رغم چالش‌های فنی و هزینه‌ی اولیه‌ی ساخت بالاتر در حالت شناور، مزایای اقتصادی، زیست‌محیطی و عملکردی آن قابل‌توجه است. حذف کامل هزینه‌ی خرید زمین، بهره‌برداری از زیر ساخت‌های موجود نیروگاه برق‌آبی برای اتصال به شبکه و بازده بالاتر پنل‌ها به دلیل خنک‌سازی طبیعی توسط آب، از مهم‌ترین مزایای این روش محسوب می‌شوند. علاوه بر این، کاهش قابل ملاحظه‌ی تبخیر آب سد و صرفه‌جویی مالی سالانه ناشی از آن، نیروگاه خورشیدی شناور را به گزینه‌ای پایدار و کارآمد برای مناطق دارای منابع آبی و سدهای موجود تبدیل می‌کند. این عوامل، همراه با کاهش نیاز به تملک زمین و اثرات مثبت زیست‌محیطی، تمایل به انتخاب و اجرای نیروگاه‌های خورشیدی شناور را نسبت به نمونه‌های زمینی به طور چشمگیری افزایش می‌دهد.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

جدول ۷. مقایسه بین نیروگاه خورشیدی شناور و زمینی در پروژه‌ی موردمطالعه

شاخص	نیروگاه خورشیدی زمینی	نیروگاه خورشیدی شناور
هزینه خرید زمین	با احتساب ۲۰۰،۰۰۰ مترمربع معادل ۳۰۰ میلیارد تومان هزینه خرید زمین است.	هزینه‌ای ندارد (با فرض اینکه سرمایه‌گذار سد باشد)
هزینه احداث خط	در صورت نیاز	به دلیل وجود خط ۶۳ کیلوولت نیاز به هزینه مضاف ندارد (به دلیل وجود نیروگاه برق‌آبی)
هزینه تعمیر و نگهداری	۱۵٪ ارزان‌تر نسبت به حالت شناور	۱۶،۷۴۷،۱۰۰،۰۰۰ تومان با رشد سالانه
بازده پنل‌ها	کمتر به دلیل گرمایش ۳۴/۳۵°C [۲۰]	بیشتر به دلیل خنک‌سازی طبیعی توسط آب گرمایش ۲۹/۳۵°C
کاهش تبخیر آب	ندارد	جلوگیری از تبخیر سالانه ۳۴۱،۰۰۰ مترمکعب آب ≈ ۵،۱۱۵،۰۰۰،۰۰۰ تومان صرفه‌جویی سالانه
چالش‌ها	نیاز به تملک زمین، دمای بالاتر، گردوغبار بیشتر	هزینه ساخت بالاتر، نیاز به زیرساخت شناور و کابل‌کشی مخصوص

٦-نتیجه‌گیری

نتایج این پژوهش نشان می‌دهد که احداث نیروگاه خورشیدی شناور با ظرفیت ۱۰ مگاوات بر روی مخزن سد طالقان، از نظر فنی، اقتصادی و زیست‌محیطی کاملاً توجیه‌پذیر است. سامانه طراحی‌شده با استفاده از ۳۲،۷۳۶ ماژول خورشیدی (۳۲۰ واتی) و ۱۰ اینورتر یک مگاواتی، با نسبت ظرفیت DC به AC برابر با ۱/۰۵، قادر به تولید سالانه ۱۹/۴۷۷ میلیون کیلووات‌ساعت انرژی خالص با تولید ویژه ۱۸۵۹ کیلووات‌ساعت به‌ازای هر کیلووات پیک و نسبت عملکرد ۸۵/۶ درصد است. سطح دسترسی سامانه نیز حدود ۹۹ درصد برآورد شده است.

از نظر اقتصادی، هزینه کل سرمایه‌گذاری اولیه پروژه بالغ بر ۶۹۴ میلیارد تومان برآورد شده و تحلیل مالی پروژه (با فرض فروش برق در بازار سبز بورس انرژی ایران) نرخ بازده داخلی معادل ۳۳/۷۵ درصد و دوره بازگشت سرمایه حدود ۵ سال را نشان می‌دهد. از منظر زیست‌محیطی، پوشش ۱۹۵،۰۰۰ مترمربع از سطح مخزن، علاوه بر جلوگیری از انتشار ۱۷/۹۴۳ تُن دی‌اکسیدکربن در طول ۲۵ سال، مانع تبخیر سالانه حدود ۳۴۱،۰۰۰ کیلو لیتر آب می‌شود که باتوجه‌به شرایط کم‌آبی کشور، مزیتی راهبردی محسوب می‌گردد.

مقایسه کلی عامل‌های کلیدی بین نیروگاه خورشیدی روی زمین و نیروگاه خورشیدی شناور نشان داد که نوع شناور به دلیل حذف هزینه خرید زمین، کاهش نیاز به زیرساخت انتقال، افزایش بازده پنل‌ها به واسطه خنک‌سازی طبیعی و صرفه‌جویی قابل‌توجه در منابع آبی، مزیت‌های اقتصادی و زیست‌محیطی بیشتری نسبت به همتای زمینی دارد. اگرچه هزینه ساخت اولیه آن اندکی بالاتر و نیازمند فناوری‌های تخصصی‌تر است، اما مجموع مزایای عملیاتی و صرفه‌جویی در هزینه‌ها، توجیه‌پذیری آن را تقویت می‌کند.

بنابراین، باتوجه‌به مزایای چندوجهی این طرح، می‌توان آن را به‌عنوان الگویی قابل‌تعمیم برای سایر مخازن و پهنه‌های آبی کشور در نظر گرفت. توسعه چنین پروژه‌هایی می‌تواند گامی مؤثر در جهت تحقق سیاست‌های کلان انرژی، کاهش وابستگی به منابع فسیلی و حرکت به‌سوی توسعه پایدار باشد. همچنین پیشنهاد می‌شود مطالعات مشابه در مقیاس‌های متفاوت و در مناطق جغرافیایی گوناگون انجام گیرد تا امکان بهینه‌سازی بیشتر و تعمیم‌پذیری بهتر فراهم شود.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]

منابع

[۱] Y. Wei, D. Khojasteh, C. Windt, and L. Huang, "An interdisciplinary literature review of floating solar power plants," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. ۲۰۹, p. ۱۱۵۰۹٤, ۲۰۲٥.

[۲] D. Razeghi Jahromi, A. Minoofar, G. Ghorbani, A. Gholami, M. Ameri, and M. Zandi, "Harnessing sunlight on water: a comprehensive analysis of floating photovoltaic systems and their implications compared to terrestrial," *Journal of Renewable Energy and Environment*, vol. ۱۱, no. ۱, pp. ۸۹-۹۹, ۲۰۲٤.

[۳] H. M. Pouran, M. P. C. Lopes, T. Nogueira, D. A. C. Branco, and Y. Sheng, "Environmental and technical impacts of floating photovoltaic plants as an emerging clean energy technology," *IScience*, vol. ۲٥, no. ۱۱, ۲۰۲۲.

[٤] M. Sikora and D. Kochanowski, "Potentials of green hydrogen production in P۲G systems based on FPV installations deployed on pit lakes in former mining sites by ۲۰٥۰ in Poland," *Energies*, vol. ۱۷, no. ۱۸, p. ٤٦٦۰, ۲۰۲٤.

[٥] R. Cazzaniga and M. Rosa-Clot, "The booming of floating PV," *Solar Energy*, vol. ۲۱۹, pp. ۳-۱۰, ۲۰۲۱.

[٦] G. Huang, Y. Tang, X. Chen, M. Chen, and Y. Jiang, "A comprehensive review of floating solar plants and potentials for offshore applications," *Journal of Marine Science and Engineering*, vol. ۱۱, no. ۱۱, p. ۲۰٦٤, ۲۰۲۳.

[۷] S. Delacroix, S. Bourdier, T. Soulard, H. Elzaabalawy, and P. Vasilenko, "Experimental Modelling of a Floating Solar Power Plant Array under Wave Forcing. Energies ۲۰۲۳, ۱٦, ٥۱۹۸," ed, ۲۰۲۳.

[۸] V. Olkkonen, K. Haaskjold, Ø. S. Klyve, and R. Skartlien, "Techno-economic feasibility of hybrid hydro-FPV systems in Sub-Saharan Africa under different market conditions," *Renewable Energy*, vol. ۲۱٥, p. ۱۱۸۹۸۱, ۲۰۲۳.

[۹] L. Micheli, D. L. Talavera, G. M. Tina, F. Almonacid, and E. F. Fernandez, "Techno-economic potential and perspectives of floating photovoltaics in Europe," *Solar Energy*, vol. ۲٤۳, pp. ۲۰۳-۲۱٤, ۲۰۲۲.

[۱۰] A. Goswami and J. I. Aizpurua, "Reliability-aware techno-economic assessment of floating solar power systems," *Sustainable Energy, Grids and Networks*, vol. ٤۰, p. ۱۰۱٥۳٦, ۲۰۲٤.

[۱۱] M. B. Ulum, H. Satria, R. Pramudito, and E. Rizaldi, "Techno-Economic Comparison of ۹ MW Floating PV (FPV) Solar Farms in Indonesia and the UK," in *2024 7th International Conference on Renewable Energy and Power Engineering (REPE)*, ۲۰۲٤: IEEE, pp. ۳۲۸-۳۳۳.

[۱۲] M. O. Alhassan, R. Opoku, F. Uba, G. Y. Obeng, C. K. Sekyere, and P. Nyanor, "Techno-economic and environmental estimation assessment of floating solar PV power generation on Akosombo dam reservoir in Ghana," *Energy Reports*, vol. ۱۰, pp. ۲۷٤۰-۲۷٥٥, ۲۰۲۳.

[۱۳] K. K. Agrawal, S. K. Jha, R. K. Mittal, and S. Vashishtha, "Assessment of floating solar PV (FSPV) potential and water conservation: Case study on Rajghat Dam in Uttar Pradesh, India," *Energy for Sustainable Development*, vol. ٦٦, pp. ۲۸۷-۲۹٥, ۲۰۲۲.

[۱٤] S. Gorjian, H. Sharon, H. Ebadi, K. Kant, F. B. Scavo, and G. M. Tina, "Recent technical advancements, economics and environmental impacts of floating photovoltaic solar energy conversion systems," *Journal of Cleaner Production*, vol. ۲۷۸, p. ۱۲٤۲۸٥, ۲۰۲۱.

[۱٥] J. Haas, J. Khalighi, A. De La Fuente, S. Gerbersdorf, W. Nowak, and P.-J. Chen, "Floating photovoltaic plants: Ecological impacts versus hydropower operation flexibility," *Energy Conversion and Management*, vol. ۲۰٦, p. ۱۱۲٤۱٤, ۲۰۲۰.

[۱٦] H. Yousuf *et al.*, "A review on floating photovoltaic technology (FPVT)," *Current Photovoltaic Research*, vol. ۸, no. ۳, pp. ٦۷-۷۸, ۲۰۲۰.

[۱۷] World Bank Group, ESMAP, and Solar Energy Research Institute of Singapore (SERIS), "Where Sun Meets Water: Floating Solar Handbook for Practitioners," Washington, DC, Technical report ۲۰۱۹.

[۱۸] https://topomap.ir (accessed ۲٥ july, ۲۰۲٥).

[۱۹] A. Goswami, P. Sadhu, U. Goswami, and P. K. Sadhu, "Floating solar power plant for sustainable development: A techno-economic analysis," *Environmental Progress & Sustainable Energy*, vol. ۳۸, no. ٦, p. e۱۳۲٦۸, ۲۰۱۹.

[۲۰] D. Mittal, B. K. Saxena, and K. Rao, "Comparison of floating photovoltaic plant with solar photovoltaic plant for energy generation at Jodhpur in India," in *2017 international conference on technological advancements in power and energy (TAP energy)*, ۲۰۱۷: IEEE, pp. ۱-٦.

[Downloaded from necjournals.ir on 2026-11-24]