

مروری جامع بر چشم انداز توسعه فناوری سامانه های فتولتائیک شناور: چالش های فنی، متدولوژی های مکان یابی و هم افزایی سیستم های ذخیره ساز در شبکه انرژی

فاطمه سادات پیرایش^۱، دکتر شادی شیخ زاده مرند^۲

۱- دانشجوی مقطع کارشناسی ارشد، گروه مهندسی مکانیک، دانشکده فنی مهندسی، دانشگاه الزهرا (س)، تهران، ایران

Elnaz.pirayesh82@gmail.com

۲- دکترای گروه برق، واحد کرج، دانشگاه آزاد اسلامی، البرز، ایران

Shadi.sheikhzadehmarand@iaui.ir

چکیده

با تشدید بحران های اقلیمی و محدودیت اراضی برای توسعه نیروگاه های خورشیدی زمینی، فناوری فتولتائیک شناور (FPV) به عنوان یک راهکار کارآمد ظهور کرده و مورد توجه قرار گرفت. این مقاله مروری با رویکردی جامع، به تحلیل جنبه های ترمودینامیکی، استراتژی های مکان یابی و هم افزایی سیستم های هیبریدی می پردازد. بررسی ها نشان می دهد که محیط آبی با عملکرد به عنوان یک چاه حرارتی طبیعی (Heat Sink)، دمای کاری ماژول ها را کاهش داده و راندمان تبدیل انرژی را نسبت به سیستم های خشکی به طور قابل توجهی ارتقا می دهد. [1,2] علاوه بر این، به کارگیری شاخص نوین انرژی خورشیدی شناور یکپارچه (IFSE) به عنوان یک ابزار تصمیم گیری فضایی، امکان شناسایی مکان های بهینه را با در نظر گرفتن تعادلی میان منابع انرژی، هزینه های سرمایه ای (CAPEX) و محدودیت های زیست محیطی فراهم می آورد. [3] در نهایت، این مطالعه نشان می دهد که ادغام FPV با نیروگاه های برق آبی و فناوری های ذخیره سازی انرژی، راه حلی پایدار برای غلبه بر چالش تناوب تولید و تضمین امنیت انرژی در آینده است. [4]

کلمات کلیدی: فتولتائیک شناور (FPV)، افزایش راندمان، شاخص IFSE، سیستم های هیبریدی، ذخیره سازی انرژی.

مقدمه

یکی از بزرگترین چالش های پیش روی جهان امروز، گرمایش جهانی ناشی از انتشار گازهای گلخانه ای و وابستگی به سوخت های فسیلی است. [4] طبق گزارش های هیئت بین دولتی تغییر اقلیم (IPCC)، محدود کردن گرمایش زمین به ۱.۵ درجه سانتی گراد امری حیاتی است. [4] در این راستا، انرژی خورشیدی به عنوان فراوان ترین منبع تجدیدپذیر، نقشی کلیدی در گذار به سمت انرژی های پاک و تامین برق جمعیت رو به رشد جهان ایفا می کند. [2,4] با این حال، توسعه نیروگاه های فتولتائیک سنتی زمینی (Ground-mounted PV) با چالش های جدی از جمله اشغال زمین های وسیع و رقابت با کاربری های کشاورزی و مسکونی مواجه است. [1,4]

برای غلبه بر محدودیت های فضایی و افزایش بهره وری، فناوری فتولتائیک شناور (FPV) یا "Floatovoltaics" به عنوان یک جایگزین نویدبخش ظهور کرده است که از سطح بندنه های آبی نظیر مخازن سدها، دریاچه ها و مناطق ساحلی برای استقرار پنل ها استفاده می کند. [1,4] سیستم های FPV علاوه بر حل معضل کمبود زمین، مزایای فنی قابل توجهی

ارائه می‌دهند. تحقیقات نشان می‌دهد که بازدهی سلول‌های فتولتائیک با افزایش دمای کاری کاهش می‌یابد؛ به طوری که بخش عمده‌ای از انرژی خورشیدی جذب شده (بیش از ۸۳٪) به جای تبدیل به الکتریسیته، به حرارت تبدیل می‌شود. [2] مشابه با اصول ترمودینامیکی حاکم بر سیستم‌های فتولتائیک-حرارتی (PVT)، محیط آبی در سیستم‌های FPV به عنوان یک خنک‌کننده طبیعی عمل کرده و با کاهش دمای ماژول‌ها، راندمان الکتریکی را نسبت به سیستم‌های خشکی به طور محسوسی افزایش می‌دهد. [1,4]

با وجود این مزایا، توسعه FPV با چالش‌های فنی و عدم قطعیت‌هایی در مراحل اولیه پروژه روبه‌رو است. [3] انتخاب مکان مناسب که تعادلی میان منابع انرژی، هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX) ناشی از کابل‌کشی و مهاربندی، و محدودیت‌های محیطی برقرار کند، نیازمند متدولوژی‌های پیچیده تصمیم‌گیری است. [3] توسعه شاخص‌های نوین مانند شاخص انرژی خورشیدی شناور یکپارچه (IFSE) گامی مهم در جهت مکان‌یابی دقیق و کاهش ریسک سرمایه‌گذاری در محیط‌های پیچیده ساحلی محسوب می‌شود. [3]

علاوه بر مسئله مکان‌یابی، ماهیت متناوب انرژی خورشیدی نیازمند ادغام FPV با سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی (ESS) و هیبریدسازی است. [4] ترکیب FPV با نیروگاه‌های برق آبی (HPP)، ذخیره‌سازی هوای فشرده (CASE) و تولید هیدروژن، راهکارهایی برای افزایش قابلیت اطمینان شبکه و مدیریت نوسانات تولید هستند. [4] این مقاله مروری با رویکردی جامع، به بررسی آخرین پیشرفت‌ها در فناوری FPV، تحلیل متدولوژی‌های پیشرفته مکان‌یابی، ارزیابی راندمان ترمودینامیکی و پتانسیل سیستم‌های هیبریدی ذخیره‌ساز می‌پردازد تا چشم‌اندازی روشن برای توسعه پایدار این فناوری ترسیم نماید. [4]

2. تحلیل سیستم‌های فتولتائیک شناور (FPV) و زمینی (GMPV/LBPV): بررسی ساختاری و عملکردی

گذار از نیروگاه‌های خورشیدی نصب شده بر روی زمین (Ground-Mounted PV) به سمت سامانه‌های شناور، تنها یک تغییر مکان ساده نیست، بلکه تغییری بنیادین در پارادایم‌های مهندسی سازه و ترمودینامیک سیستم محسوب می‌شود. اگرچه هر دو فناوری از ماژول‌های فتولتائیک مشابهی برای تبدیل فوتون به الکترون استفاده می‌کنند، اما بستر استقرار و تعامل آن‌ها با محیط پیرامونی، تفاوت‌های عملکردی چشمگیری را رقم می‌زند.

2-1. تفاوت‌های ساختاری و مهندسی نصب

در سیستم‌های سنتی زمینی، ماژول‌ها بر روی سازه‌های فلزی ثابت (Racks) که با فونداسیون‌های بتنی یا شمع‌کوبی در زمین محکم شده‌اند، نصب می‌شوند. [1] این ساختار صلب، پایداری بالایی دارد و زاویه شیب (Tilt Angle) در آن به راحتی قابل تنظیم و بهینه‌سازی است. اما در مقابل، معماری سیستم‌های FPV ماهیتاً دینامیکی است.

در FPV، زمین جای خود را به پانتون‌های شناور (Pontoons) می‌دهد که اغلب از پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) ساخته شده‌اند تا در برابر خوردگی و اشعه UV مقاوم باشند. [1,4] چالش اصلی در اینجا "پایداری در عین تحرک" است. برخلاف سیستم‌های زمینی که ثابت هستند، سیستم‌های شناور نیازمند یک سیستم مهاربندی و لنگرگیری (Mooring and Anchoring) پیچیده هستند تا بتوانند در برابر نوسانات سطح آب، نیروهای باد و جریان‌های آبی مقاومت کرده و موقعیت آرایه را حفظ کنند. [1,4] این سیستم مهاربندی باید به گونه‌ای طراحی شود که تنش‌های مکانیکی وارده به ماژول‌ها و کابل‌های انتقال برق زیر آب را به حداقل برساند، چالشی که در سیستم‌های زمینی وجود ندارد. [4]

2-2. رفتار حرارتی و راندمان تبدیل انرژی

احتمالاً مهم‌ترین تمایز عملکردی میان این دو سیستم، در مدیریت حرارتی نهفته باشد. در سیستم‌های زمینی، با افزایش تابش خورشید، دمای ماژول‌ها به شدت افزایش می‌یابد که این امر طبق اصول فیزیک نیمه‌هادی‌ها، منجر به افت ولتاژ و کاهش راندمان می‌شود. مطالعات نشان داده‌اند که گرمای اضافی می‌تواند تا ۸۰٪ از انرژی دریافتی پنل را در سیستم‌های معمولی تلف کند. [1]

در مقابل، سیستم‌های FPV از یک مزیت طبیعی بهره می‌برند: اثر خنک‌کنندگی آب (Water Cooling Effect). بدنه آبی به عنوان یک چاه حرارتی عظیم عمل کرده و از طریق تبخیر و همرفت، دمای محیطی اطراف پنل‌ها را کاهش می‌دهد. [4] داده‌های تجربی نشان می‌دهند که دمای کاری ماژول‌های شناور می‌تواند بین ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد (و در برخی مناطق تا ۱۴.۵ درجه) کمتر از نمونه‌های مشابه در خشکی باشد. [1,4] این کاهش دما مستقیماً به افزایش بازده الکتریکی منجر می‌شود؛ به طوری که سیستم‌های FPV معمولاً ۱۱ تا ۱۵ درصد انرژی بیشتری نسبت به سیستم‌های زمینی تولید می‌کنند. [1] این ویژگی باعث می‌شود FPV در مناطق گرمسیر که سیستم‌های زمینی با افت شدید راندمان مواجه می‌شوند، گزینه‌ای بسیار کارآمدتر باشد.

2-3. ملاحظات زیست‌محیطی و بهره‌وری منابع

در زمینه بهره‌وری منابع، تفاوت‌ها آشکارتر می‌شوند. سیستم‌های زمینی نیازمند تخصیص اراضی وسیع هستند که اغلب منجر به رقابت با زمین‌های کشاورزی یا تغییر کاربری اراضی می‌شود. [1] در حالی که FPV نه تنها زمینی اشغال نمی‌کند، بلکه با پوشاندن سطح آب، تبخیر سطحی را تا حدود ۷۰٪ کاهش می‌دهد. [1,4] این ویژگی برای مخازن سدها در مناطق خشک که حفظ منابع آبی حیاتی است، یک مزیت استراتژیک دوگانه (تولید برق + حفظ آب) محسوب می‌شود. علاوه بر این، پدیده گرد و غبار (Soiling) که در نیروگاه‌های زمینی یک عامل اصلی افت توان است، در محیط‌های آبی کمتر دیده می‌شود، زیرا رطوبت محیط و فاصله از منابع گرد و غبار خاکی، نیاز به تمیزکاری را کاهش می‌دهد. [4]

2-4. چالش‌های اقتصادی: CAPEX در برابر OPEX

اگرچه FPV ز نظر فنی برتری دارد، اما از نظر اقتصادی معادلات متفاوت است. هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه (CAPEX) برای سیستم‌های شناور به دلیل نیاز به پانتون‌های تخصصی و سیستم مهاربندی، معمولاً ۲۵٪ بالاتر از سیستم‌های زمینی است. [4] با این حال، تحلیل‌های دقیق‌تر نشان می‌دهد که هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (OPEX) در FPV می‌تواند پایین‌تر باشد (برای مثال ۱۵.۵ دلار بر کیلووات در سال برای FPV در مقابل ۱۸ دلار برای سیستم‌های زمینی)، که این موضوع به دلیل کاهش نیاز به آماده‌سازی زمین و تمیزکاری کمتر پنل‌هاست.

3. استراتژی‌های مکان‌یابی هوشمند و برنامه‌ریزی فضایی: فراتر از تابش خورشید

توسعه نیروگاه‌های فوتولتائیک شناور (FPV)، به ویژه در محیط‌های ساحلی (مانند خلیج‌ها و رودخانه‌ها)، با چالشی بزرگتر از "فناوری" مواجه است و آن چالش "انتخاب مکان" است. [3] برخلاف تصور رایج، مکانی که بیشترین تابش خورشید را دارد، لزوماً بهترین مکان برای احداث نیروگاه نیست. تصمیم‌گیری در این حوزه نیازمند برقراری تعادلی ظریف میان سه رأس یک مثلث است: حداکثر بهره‌وری انرژی، حداقل هزینه زیرساختی و پذیرش اجتماعی-زیست‌محیطی. [3] برای گذار از انتخاب‌های شهودی به تصمیم‌گیری‌های مبتنی بر داده، شاخص نوآورانه‌ای تحت عنوان «شاخص انرژی خورشیدی شناور یکپارچه» (IFSE) توسعه یافته است. [3] این شاخص به عنوان ابزاری برای کاهش عدم قطعیت در فازهای اولیه پروژه عمل می‌کند.

3-1. معماری شاخص IFSE: فرمولاسیون یک تصمیم

شاخص IFSE یک مدل ریاضی چند معیاره است که ارزش "تناسب" هر نقطه جغرافیایی را برای استقرار FPV می‌سنجد. این شاخص از حاصل ضرب سه تابع اصلی به دست می‌آید که در آن هر پارامتر نماینده یک لایه اطلاعاتی حیاتی است:

$$IFSE = SE \times C_{gp,s} \times U_{gp} \quad (1)$$

الف) شاخص منبع انرژی (IFSE): کیفیت "واقعی" فوتون‌ها

این متغیر تنها به میزان تابش افقی جهانی (GHI) نگاه نمی‌کند، بلکه "کیفیت بهره‌برداری" از آن را می‌سنجد. در فرمولاسیون این شاخص، یک پارامتر اصلاح‌کننده ضریب دما (C_{ep}) لحاظ شده است که اثر خنک‌کنندگی محیط دریایی را مدل‌سازی می‌کند. [3] بنابراین، اگر دو منطقه تابش یکسانی داشته باشند، منطقه‌ای که دمای محیطی پایین‌تری دارد (در نتیجه راندمان پنل در آن بالاتر است)، نمره SE بالاتری دریافت می‌کند. مقادیر $SE \geq 1$ نشان دهنده پتانسیل اولیه مناسب برای تولید انرژی هستند.

ب) تابع جریمه هزینه مکانی ($C_{gp,s}$): غلبه ی جغرافیا بر اقتصاد

این تابع شاید مهم‌ترین بخش برای سرمایه‌گذاران باشد. این متغیر هزینه‌های سرمایه‌ای (CAPEX) پروژه را بر اساس "پیچربندی ساحلی" مدل‌سازی می‌کند. [3] دو عامل ژئومورفولوژیک کلیدی در اینجا نقش دارند:

۱. فاصله تا ساحل (I): مستقیماً طول و هزینه کابل‌های صادراتی (Export Cables) برای انتقال برق به خشکی را تعیین می‌کند. [3]

۲. عمق آب (d): پیچیدگی و هزینه سیستم مهاربندی (Mooring) و لنگرها را بررسی و محاسبه می‌کند. [3]

فرمول این تابع به گونه‌ای طراحی شده که با افزایش عمق یا فاصله، مقدار آن به سمت صفر میل می‌کند (جریمه سنگین). برای مثال، مناطقی با عمق بیش از ۱۰۰ متر یا فاصله بسیار زیاد، از نظر اقتصادی غیرجذاب شناخته می‌شوند. [3]

ج) تابع جریمه کاربری آب (Ugp): همزیستی یا تعارض؟

سواحل و خلیج‌ها محیط‌های شلوغی هستند. این تابع تعارضات فضایی را کمی‌سازی می‌کند. [3] پارامترهایی مانند مسیرهای کشتیرانی، مناطق صید ماهی، مزارع پرورش صدف و نواحی حفاظت‌شده زیست‌محیطی (مانند شبکه Natura 2000) در این لایه بررسی می‌شوند. [3] اگر منطقه‌ای با یک مسیر حیاتی کشتیرانی تداخل داشته باشد، مقدار U_{gp} صفر شده و در نتیجه کل شاخص IFSE صفر می‌شود. این ویژگی "وتو کننده" تضمین می‌کند که هیچ نیروگاهی در مناطق ممنوعه پیشنهاد نشود. [3]

3-2. اثبات کارایی در دنیای واقعی (Case Study):

کارایی این متدولوژی در یک مطالعه موردی در منطقه Ria de Vigo (یک منطقه در شمال غرب اسپانیا) آزموده شده است. با اعمال شاخص IFSE بر روی این منطقه پیچیده، نتایج جالبی حاصل شد:

- بخش‌های داخلی خلیج اگرچه آرام بودند، اما به دلیل ترافیک بالای دریایی و مناطق کم‌عمق جزر و مدی، نمرات پایینی گرفتند.

- در مقابل، چهار ناحیه مشخص در بخش بیرونی خلیج شناسایی شدند که تعادلی بهینه میان عمق مناسب (حدود ۲۰ تا ۳۰ متر)، فاصله معقول از ساحل و عدم تداخل با فعالیت‌های انسانی داشتند. [3]

این نتایج نشان داد که استفاده از روش‌های مکان‌یابی سنتی (که صرفاً بر تابش تمرکز دارند) می‌تواند منجر به انتخاب سایت‌هایی شود که از نظر اجرایی پرهزینه یا از نظر قانونی غیرقابل بهره‌برداری هستند. شاخص IFSE با یکپارچه سازی لایه‌های فنی، اقتصادی و اجتماعی، نقشه‌ای واقع‌بینانه برای توسعه دهندگان ترسیم می‌کند.

4. مهندسی سیستم و اجزای سازنده: چالش پایداری در بستری دینامیک

مهندسی سامانه‌های فتولتائیک شناور، گذار از یک طراحی استاتیکی (Static) در زمین به یک طراحی دینامیکی (Dynamic) در محیط آبی است. در این محیط، نیروهای هیدرودینامیکی (جریان و امواج)، آیرودینامیکی (باد) و نوسانات سطح آب (به ویژه در مخازن سدها) به طور مداوم بر ساختار نیرو وارد می‌کنند. موفقیت یک پروژه FPV در گرو طراحی هوشمندانه سه جزء اصلی است: پانتون‌های شناور، سیستم مهاربندی و زیرساخت الکتریکی. [2,4]

4-1. پانتون‌ها (Pontoon): زیرساخت شناور و مقاومت شیمیایی

پانتون‌ها یا شناورها ستون فقرات فیزیکی نیروگاه FPV را تشکیل می‌دهند. آن‌ها وظیفه تأمین شناوری (Buoyancy) و حفظ زاویه مناسب شیب (Tilt Angle) مازول‌ها را بر عهده دارند.

- جنس مواد: ماده غالب در ساخت پانتون‌ها، پلی‌اتیلن با چگالی بالا (HDPE) است. انتخاب HDPE به دلیل خواص برتر آن است: مقاومت عالی در برابر خوردگی و زنگ‌زدگی (Corrosion) ناشی از آب، دوام بالا در برابر اشعه فرابنفش (UV Resistance) و وزن سبک. ساختار پانتون‌ها معمولاً به صورت مدولار

(Modular) طراحی می‌شود، به این معنی که آرایه‌های کوچک‌تر در محل مونتاژ شده و سپس با اتصال به یکدیگر، مزرعه خورشیدی بزرگتر را تشکیل می‌دهند. این مدولاریتی هم نصب را تسهیل می‌کند و هم در برابر شکست‌های نقطه‌ای، انعطاف‌پذیری بیشتری به سیستم می‌دهد.

• طراحی حرارتی: طراحی پانتون‌ها باید به گونه‌ای باشد که حداکثر تماس مازول با محیط خنک‌کننده زیرین را فراهم کند تا اثر بهینه‌سازی حرارتی (که پیش‌تر ذکر شد) به دست آید. [4]

4-2. سیستم مهاربندی (Mooring): قلب تپنده پایداری سازه

سیستم مهاربندی حیاتی‌ترین جزء سازه‌ای است که وظیفه تثبیت موقعیت آرایه را در برابر نیروهای خارجی بر عهده دارد. انتخاب نوع مهاربندی کاملاً وابسته به محیط استقرار است (مخزن سد با نوسانات سطح آب یا محیط‌های ساحلی با امواج بالا). [4]

۱-۲-۴. انواع مهاربندی:

• سیستم زنجیری (Catenary System): این روش از زنجیرها یا کابل‌های سنگین استفاده می‌کند که بخشی از آن‌ها روی بستر قرار می‌گیرد. این سیستم برای آب‌های عمیق‌تر مناسب است و از خاصیت فنری وزن زنجیر برای جذب نیروهای ناشی از باد استفاده می‌کند. اما در برابر تغییرات سریع سطح آب، پیچیدگی‌های بیشتری دارد. [4]

• سیستم مهاربندی کششی/تنش‌دار (Taut/Tensioned Mooring): در این سیستم، خطوط مهاربندی با زاویه‌ای تند و تحت کشش بالا به بستر لنگر می‌شوند. این روش برای محیط‌های دریایی و ساحلی که نیاز به حفظ موقعیت دقیق‌تری دارند و عمق متغیر است، مناسب‌تر است. [4]

• چالش‌های مهندسی: در مخازن سدها، بزرگترین چالش تغییرات سطح آب است؛ سیستم مهاربندی باید بتواند در دامنه وسیعی از ارتفاعات آب، بدون آسیب به کابل‌ها و سازه‌ها، کشش خود را حفظ کند. در محیط‌های دریایی، چالش اصلی نیروهای هیدرودینامیکی ناشی از امواج است که نیازمند لنگرهای قوی‌تر و طرح‌های سازه‌ای مقاوم‌تر است. [4]

۳-۴. زیرساخت الکتریکی و کابل‌کشی زیر آب (Electrical Infrastructure)

سیستم انتقال برق در FPD نیازمند مهندسی خاصی است تا با محیط آبی سازگار باشد.

• کابل‌های زیردریایی (Subsea Cables): برخلاف سیستم‌های زمینی، کابل‌های DC و AC باید در برابر نفوذ آب، خوردگی، و سایش مکانیکی ناشی از حرکت پانتون‌ها مقاوم باشند. این کابل‌ها نیاز به غلاف‌های محافظتی ویژه دارند. [1,4]

• اینورترها و پست‌های شناور: تجهیزات الکتریکی حساس مانند اینورترها (Inverters) و ترانسفورماتورها باید در محفظه‌های مهر و موم شده یا بر روی سکوی‌های شناور (Floating Substation) قرار گیرند تا از تماس با رطوبت و آب دریا مصون بمانند. خنک‌سازی این تجهیزات در محیط بسته نیز یک ملاحظه مهندسی مهم است. [1,4]

۴-۴. فناوری مازول و انعطاف‌پذیری طراحی

در حالی که بسیاری از پروژه‌های FPV از پنل‌های مونوکریستالی یا پلی کریستالی استاندارد استفاده می‌کنند، نوآوری‌های طراحی شامل موارد زیر است:

• مازول‌های دوطرفه (Bifacial Modules): استفاده از پنل‌هایی که از هر دو سطح نور جذب می‌کنند، در محیط FPV مورد بحث است. با وجود اینکه بازتاب نور از آب (Albedo) معمولاً کمتر از خشکی است (حدود ۰.۰۴ تا ۰.۲۸)، اما در شرایط آب بسیار آرام و با طراحی خاص پانتون‌ها، می‌توان نور منعکس شده را نیز جذب کرده و تولید برق را افزایش داد. [1,4]

• سیستم‌های ردیاب شناور (Floating Tracking Systems): اگرچه اکثر FPV ها با زاویه ثابت نصب می‌شوند (به دلیل پیچیدگی مکانیکی)، اما برخی از تحقیقات بر روی توسعه سیستم‌های ردیاب خورشیدی (Solar Trackers) متمرکز شده‌اند که برای به حداکثر رساندن تولید انرژی در طول روز، آرایه را به صورت یکپارچه حرکت می‌دهند. [1,4]

۵. هم‌افزایی تکنولوژیک و سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی: تبدیل FPV به نیروگاه پایدار

هدف از ادغام سیستم‌های ذخیره‌سازی و هیبریدی، تضمین این نکته است که انرژی پاک تولید شده توسط FPV در هر ساعت از شبانه‌روز، در دسترس شبکه باشد. این فرآیند نه تنها تولید برق را بهینه می‌کند، بلکه به مدیریت بار شبکه و پایداری فرکانس نیز کمک می‌نماید.

۵-۱. پیوند طلایی: هم‌افزایی با سیستم‌های برق آبی (Hydro-FPV)

هیبریدسازی FPV با نیروگاه‌های برق آبی (سدها) به عنوان یکی از مؤثرترین و رایج‌ترین راهکارهای پایداری شناخته می‌شود. [4] این پیوند به دلیل ماهیت مکمل (Complementary) دو سیستم، یک هم‌افزایی استراتژیک ایجاد می‌کند:

۱. هموارسازی تولید: FPV در ساعات آفتابی روز به حداکثر تولید می‌رسد، در حالی که توربین‌های برق آبی می‌توانند در این ساعات خاموش بمانند یا با ظرفیت پایین کار کنند. این امر به سد اجازه می‌دهد تا آب را ذخیره کند و آن را برای ساعات اوج مصرف (پیک بار) یا ساعات تاریکی شب نگه دارد. این مکانیزم، مخزن سد را به یک «باتری مجازی» تبدیل می‌کند. [4]

۲. کاهش تبخیر و حفظ آب: از منظر مدیریت منابع آب، پوشش سطح مخازن توسط آرایه‌های FPV، میزان تبخیر آب را به شدت کاهش می‌دهد. در مناطق خشک و درگیر تنش آبی، این حفظ آب یک مزیت استراتژیک مضاعف است که ارزش پروژه را فراتر از تولید برق می‌برد. [4]

۳. بهره‌گیری از زیرساخت‌های موجود: هیبریدسازی در سدها از خطوط انتقال، پست‌های برق و زیرساخت‌های اتصال به شبکه که از قبل برای نیروگاه برق آبی وجود داشته، استفاده می‌کند و بدین ترتیب هزینه‌های زیرساختی اولیه (CAPEX) را به طور چشمگیری کاهش می‌دهد. [4]

۲-۵. جعبه ابزار ذخیره‌سازی پیشرفته (Advanced Storage Toolkit)

برای پروژه‌هایی که با برق آبی ادغام نمی‌شوند یا نیاز به ذخیره‌سازی طولانی مدت (Long-Duration Storage) دارند، FPV باید با فناوری‌های ذخیره‌سازی مدرن همراه شود:

۱. ذخیره‌سازی باتری در مقیاس شبکه (BESS): متداول‌ترین راهکار برای ذخیره‌سازی کوتاه‌مدت و میان‌مدت، استفاده از باتری‌های لیتیوم-یون یا فناوری‌های پیشرفته‌تر جریان (Flow Batteries) است. این سیستم‌ها قابلیت مدیریت فرکانس و پاسخ سریع به نوسانات شبکه را فراهم می‌کنند. [4]

۲. تولید هیدروژن سبز (Green Hydrogen): در این راهکار، برق اضافی تولید شده توسط FPV از طریق فرآیند الکترولیز، برای تجزیه آب و تولید هیدروژن پاک استفاده می‌شود. هیدروژن می‌تواند به عنوان یک حامل انرژی فصلی ذخیره شده یا در صنایع دیگر به کار رود. این سیستم برای پروژه‌های فراساحلی یا دور از شبکه، که نیاز به صادرات انرژی به شکل یک سوخت دارند، بسیار مناسب است. [4]

۳. ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) با استفاده از سازه FPV: یک نوآوری جذاب در این حوزه، ادغام سیستم ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) در معماری خود FPV است. در این طرح، می‌توان از حجم توخالی و کنترل‌شده پانتون‌های شناور یا سازه‌های زیردریایی متصل به آرایه، به عنوان مخزن ذخیره هوای فشرده استفاده کرد. این کار نه تنها مشکل ذخیره‌سازی را حل می‌کند، بلکه با حذف هزینه‌های ساخت مخازن جداگانه، راندمان اقتصادی پروژه را افزایش می‌دهد. [4]

۳-۵. هم‌افزایی فضایی و چندکاربردی (Multi-use Synergies)

علاوه بر هم‌افزایی‌های انرژی، می‌توان FPV را با سایر کاربری‌های آبی ترکیب کرد تا بازدهی اقتصادی کلی پروژه افزایش یابد:

• استقرار FPV و پرورش آبزیان (Aquaculture): آرایه‌های FPV بر روی مزارع پرورش ماهی یا میگو در برخی موارد با ایجاد سایه می‌تواند دمای آب را برای برخی گونه‌های آبزی کنترل کند و همچنین از زمین‌های محدود کشاورزی صرف نظر نماید. [4]

• FPV و باد فراساحلی در محیط‌های دریایی: FPV را می‌توان در فضای بین توربین‌های بادی فراساحلی نصب کرد و بدین ترتیب از زیرساخت‌های انتقال مشترک (کابل‌های زیردریایی) استفاده نمود و بهره‌وری فضایی منطقه را به حداکثر رساند. [4]

این ادغام‌های هوشمندانه، FPV را به یک راه‌حل انرژی انعطاف‌پذیر تبدیل می‌کند که برای غلبه بر چالش‌های قرن بیست و یکم در زمینه انرژی و آب، کاملاً مجهز است.

۶. ارزیابی اقتصادی و پیامدهای زیست‌محیطی: تحلیل هزینه و پایداری دوگانه

توجیه توسعه فتولتائیک شناور (FPV) صرفاً به مزایای فنی (مانند افزایش راندمان حرارتی) محدود نمی‌شود، بلکه به یک ارزیابی دقیق از مقایسه هزینه-فایده در طول عمر پروژه و درک کامل از اثرات زیست‌محیطی آن وابسته است.

۶-۱. تحلیل اقتصادی: هزینه‌های سرمایه‌ای در برابر مزیت راندمان

الف) هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه (CAPEX):

به‌طور کلی، هزینه نصب اولیه (CAPEX) برای یک نیروگاه FPV به دلیل ماهیت پیچیده زیرساخت‌های آن، بالاتر از نمونه‌های زمینی (LBPV) است. [3] این افزایش هزینه ناشی از سه عامل کلیدی است:

۱. سازه‌های شناور: هزینه خرید و نصب پانتون‌های HDPE.

۲. سیستم مهاربندی: هزینه تجهیزات لنگرگیری و مهاربندی که باید در برابر نیروهای هیدرودینامیکی مقاوم باشند. [4]

۳. زیرساخت الکتریکی آبی: هزینه کابل‌کشی زیردریایی و سکوها شناور برای اینورترها و ترانسفورماتورها. [1]

بر اساس مدل‌سازی‌های مکانی، دو عامل اصلی هزینه یعنی عمق آب و فاصله تا ساحل، تاثیر مستقیم و غیرقابل انکاری بر CAPEX دارند. [3] افزایش این متغیرها، هزینه مهاربندی و طول کابل‌های صادراتی را به طور تصاعدی بالا می‌برد.

ب) هزینه‌های بهره‌برداری و نگهداری (OPEX):

در مقابل افزایش CAPEX، هزینه‌های عملیاتی و نگهداری (OPEX) FPV پتانسیل کاهش دارند. این کاهش ناشی از:

- کاهش آلودگی سطحی (Soiling): محیط آبی به‌طور طبیعی تمیزتر از محیط‌های خشک و خاکی است، بنابراین نیاز به شستشوی پنل‌ها و هزینه‌های مربوط به آن کاهش می‌یابد. [4]

- عدم نیاز به آماده‌سازی زمین: حذف هزینه‌های مربوط به حصارکشی، خاک‌برداری و عملیات عمران گسترده زمینی. در نتیجه، برخی مطالعات نشان داده‌اند که در طول عمر پروژه، هزینه‌های OPEX FPV در مقایسه با LBPV می‌تواند پایین‌تر باشد (به‌طور مثال ۱۵.۵ دلار/کیلووات در سال در مقابل ۱۸ دلار/کیلووات در سال). [3]

ج) معیار هزینه تراز شده انرژی (LCOE):

شاخص نهایی برای ارزیابی اقتصادی، هزینه تراز شده انرژی (LCOE) است. اگرچه CAPEX FPV بالاتر است، اما راندمان تولید انرژی بالاتر (به دلیل خنک‌کنندگی آب و افزایش ۱۱ تا ۱۵ درصدی تولید) باعث می‌شود که تولید کل (Yield) افزایش یابد. این افزایش تولید، هزینه واحد برق تولیدی (LCOE) را جبران کرده و FPV را در نهایت از نظر اقتصادی رقابتی می‌سازد. [3]

۲-۶. اثرات زیست‌محیطی مثبت: پایداری منابع آب و کیفیت محیطی

- مزایای زیست‌محیطی FPV، فراتر از تولید انرژی پاک است و مستقیماً بر مدیریت منابع آب تأثیر می‌گذارد:
- حفظ منابع آب (Water Conservation): یکی از مهم‌ترین خدمات اکوسیستمی FPV در مناطق خشک و نیمه‌خشک، کاهش شدید تبخیر آب از مخازن است. پوشش سطح آب توسط آرایه‌ها می‌تواند تبخیر را تا ۷۰ درصد کاهش دهد. این آب نجات‌یافته در کشورهایی با تنش آبی بالا مانند ایران و پاکستان برای مصارف شرب، کشاورزی یا تولید برق آبی، ارزش استراتژیک مضاعفی دارد. [1]
- کنترل کیفیت آب و جلبک‌ها: سایه‌اندازی ایجاد شده توسط آرایه‌های FPV، نفوذ نور خورشید را به ستون آب کاهش می‌دهد. این امر به صورت طبیعی، رشد جلبک‌های مضر (Algal Blooms) که برای محیط زیست و کیفیت آب مشکل‌زا هستند را مهار می‌کند. [4]

۳-۶. چالش‌های زیست‌محیطی و ملاحظات پایداری (Mitigations)

با وجود مزایای فوق، استقرار FPV باید با احتیاط صورت پذیرد تا از آسیب‌های ناخواسته به اکوسیستم آبی جلوگیری شود:

۱. تغییرات اکوسیستم زیر آب: کاهش شدید نور خورشید در زیر آرایه‌ها می‌تواند بر فتوسنتز موجودات پلانکتونی، چرخه غذایی و به طور کلی، حیات گیاهی و جانوری در زیر مزرعه خورشیدی تأثیر بگذارد. این تغییرات می‌توانند تعادل اکسیژن محلول در آب (DO) را بر هم بزنند. برای کاهش این اثر، باید درصدی از سطح آب پوشیده نشده باقی بماند و از نصب بر روی مناطق حساس زیست‌محیطی اجتناب شود (اهمیت تابع U_{gp} در شاخص IFSE). [3,4]

۲. خطر آلودگی مواد: در طول زمان بهره‌برداری، فرسایش پانتون‌های پلاستیکی (HDPE) یا کابل‌ها ممکن است منجر به نشت میکروپلاستیک‌ها یا مواد شیمیایی به آب شود. این ریسک نیازمند نظارت مستمر بر کیفیت مواد اولیه و اجرای برنامه‌های دقیق نگهداری است. [4]

در نهایت، پایداری بلندمدت پروژه‌های FPV قویاً وابسته به اجرای ارزیابی‌های جامع زیست‌محیطی (EIAs) است که اثرات بلندمدت سایه‌اندازی و تعامل ساختار با هیدرودینامیک و بیولوژی منطقه را قبل از صدور مجوز بررسی کند.

۷. تحلیل جامع مزایا و معایب: وضعیت موجود، پیشرفت‌ها و چشم‌انداز FPV

برای درک کامل مسیر توسعه فناوری فتولتائیک شناور (FPV)، باید مزایا و معایب را در سه بعد ارزیابی کرد: مزایای ذاتی و اولیه (Intrinsic)، پتانسیل‌های حاصل از پیشرفت‌های تکنولوژیک (Advancement) و واقعیت‌های حاکم بر بازار و سیاست‌گذاری در وضعیت فعلی (Current Status).

۷-۱. مزایا و معایب ذاتی فناوری FPV

این موارد، مزایا و معایبی هستند که صرفاً از انتقال پنل از خشکی به آب حاصل می‌شوند.

الف) راندمان و عملکرد:

مزایا: بهینه‌سازی حرارتی که در آن آب به عنوان چاه حرارتی عمل کرده و دمای ماژول‌ها را ۵ تا ۱۰ درجه سانتی‌گراد کاهش می‌دهد، که منجر به افزایش راندمان تولید ۱۱ تا ۱۵ درصدی می‌شود. [1,4]
معایب: پیچیدگی زیرساختی که نیازمند پانتون‌های تخصصی، سیستم مهاربندی و کابل کشی زیرآب است و بر پیچیدگی‌های طراحی می‌افزاید. [4]

ب) بهره‌وری فضا:

مزایا: کاهش اشتغال زمین زیرا استفاده از سطوح آبی غیر مولد (مخازن، دریاچه‌ها)، رقابت با زمین‌های کشاورزی و مسکونی را حذف می‌کند.
معایب: هزینه سرمایه‌ای اولیه بالا (CAPEX) زیرا هزینه‌های زیرساخت شناور و مهاربندی باعث می‌شود CAPEX اولیه FPV معمولاً ۲۵٪ بالاتر از سیستم‌های زمینی باشد. [3]

ج) محیط زیست:

مزایا: حفظ منابع آب زیرا پوشش سطوح مخازن تبخیر آب را تا ۷۰٪ کاهش داده و در مناطق خشک، یک مزیت استراتژیک به شمار می‌رود.

معایب: ریسک آلودگی بیشتر زیرا احتمال نشت مواد شیمیایی یا میکروپلاستیک‌ها از پانتون‌ها یا کابل‌های فرسوده به آب در طولانی‌مدت وجود دارد.

د) عملیات و نگهداری:

مزایا: کاهش آلودگی سطحی (Soiling) را داریم به این دلیل که محیط مرطوب و دور از گرد و غبار، نیاز به شستشو و هزینه‌های OPEX را کاهش می‌دهد. [4]
معایب: سختی دسترسی از آنجا که نگهداری و تعمیرات در محیط آبی (به ویژه در مناطق دور از ساحل یا با امواج بالا) دشوارتر و پرخطرتر است. [4]

۷-۲. مزایا و معایب پیشرفت‌های تکنولوژیک و متدولوژیک FPV

این موارد پتانسیل‌هایی هستند که از طریق تحقیقات و توسعه سیستم‌های پیشرفته (مانند هیبریدسازی و مدل‌سازی) به دست آمده‌اند یا چالش‌هایی که با توسعه به وجود آمده‌اند.

الف) مکان‌یابی استراتژیک:

مزایا: کاهش عدم قطعیت زیرا استفاده از شاخص‌هایی مانند IFSE، امکان مکان‌یابی بهینه را فراهم می‌کند که هم هزینه‌های زیرساختی را به حداقل می‌رساند و هم از تعارضات زیست‌محیطی جلوگیری می‌کند.
معایب: پیچیدگی مدل‌سازی به دلیل اینکه پیاده‌سازی متدولوژی‌های مکان‌یابی پیشرفته (مانند IFSE) نیازمند داده‌های ژئومورفولوژیک (عمق، فاصله) و اجتماعی-اقتصادی دقیق است که در همه مناطق در دسترس نیست.

ب) ذخیره‌سازی و شبکه:

مزایا: قابلیت اطمینان بالا دارد زیرا هیبریدسازی (Hydro-FPV) امکان مدیریت بار و ذخیره‌سازی مجازی آب را فراهم می‌کند و تناوب تولید را برطرف می‌سازد.
معایب: نیاز به سیستم کنترل پیشرفته دارد بدین علت که ادغام موفقیت‌آمیز FPV با سیستم‌های ذخیره‌سازی یا برق‌آبی نیازمند زیرساخت‌های کنترلی پیچیده و الگوریتم‌های پیش‌بینی دقیق است. [4]

ج) نوآوری در طراحی:

مزایا: تولید همزمان انرژی و خدمات جانبی زیرا استفاده از پانتون‌ها به عنوان مخزن ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES) یا تولید هیدروژن سبز، ارزش افزوده پروژه را فراتر از تولید برق می‌برد.
معایب: عدم استانداردسازی در محیط‌های سخت زیرا توسعه در آب‌های عمیق یا ساحلی با امواج بالا (مانند مناطق دریایی که در آن شاخص IFSE به کار می‌رود)، نیازمند استانداردهای ساختاری جدید است که هنوز کاملاً تثبیت نشده‌اند.

د) عملکرد زیست محیطی:

مزایا: کنترل جلبک‌ها از آنجا که سایه اندازی ناشی از آرایه‌ها رشد جلبک‌های مضر را در برخی مخازن کاهش داده و کیفیت آب را بهبود می‌بخشد.
معایب: تغییرات اکولوژیکی غیرقابل پیش‌بینی زیرا کاهش شدید نفوذ نور می‌تواند بر چرخه غذایی، سطح اکسیژن محلول (DO) و دمای لایه‌های زیرین آب تأثیر بگذارد که پیامدهای بلندمدت آن هنوز کاملاً مدل‌سازی نشده است.

۳-۷. مزایا و معایب وضعیت فعلی در بازار و سیاست‌گذاری

این موارد مربوط به شرایط فعلی پذیرش فناوری و سیاست‌های حمایتی است.

الف) رشد بازار:

مزایا: توسعه سریع جهانی زیرا FPV به سرعت از پروژه‌های آزمایشی به مگا پروژه‌های تجاری تبدیل شده است، به‌ویژه در آسیا، که نشان‌دهنده اعتماد صنعت به بلوغ این فناوری است.
معایب: وابستگی به سیاست به این دلیل که بازار FPV هنوز در بسیاری از مناطق وابسته به یارانه‌ها، تعرفه‌های تشویقی (FIT) یا قراردادهای خرید تضمینی برق (PPA) است تا هزینه بالای CAPEX اولیه آن توجیه شود.

ب) قابلیت اثبات شده:

مزایا: عملکرد عالی در مخازن است زیرا موفقیت سیستم‌های FPV در مخازن سدها به اثبات رسیده و در حال حاضر یک ابزار استراتژیک برای امنیت آب و انرژی محسوب می‌شود.
معایب: کمبود داده‌های بلندمدت است زیرا داده‌های طول عمر ماژول، پانتون‌ها و کابل‌ها در بازه زمانی ۲۰ تا ۳۰ ساله و در محیط‌های مختلف (آب شیرین، شور، آلوده) هنوز محدود است.

ج) محرک‌های سیاسی:

مزایا: پذیرش اجتماعی بالا است از آنجا که FPV معمولاً اعتراضات کمتری از جوامع محلی نسبت به پروژه‌های زمینی ایجاد می‌کند، زیرا رقابتی با زمین‌های کشاورزی ندارد.
معایب: مقررات نامشخص زیرا در بسیاری از کشورها، مقررات صدور مجوز و مدیریت کاربری آب (به‌ویژه برای آب‌های ساحلی) هنوز به طور خاص برای FPV تدوین نشده و مانع از پیشرفت پروژه‌ها می‌شود.

۸. چالش‌های فنی پیش‌رو و چشم‌انداز آینده: ترسیم مسیر توسعه پایدار FPV

با وجود دستاوردهای چشمگیر در افزایش راندمان حرارتی و توسعه متدولوژی‌های مکان‌یابی، فناوری فتولتائیک شناور (FPV) هنوز در مراحل اولیه بلوغ خود قرار دارد. همانند هر فناوری نوظهور دیگری، چالش‌هایی فنی و عملیاتی وجود دارند که غلبه بر آن‌ها، شرط لازم برای توسعه در مقیاس‌های کلان و محیط‌های سخت‌تر است. درک این موانع، راه را برای تحقیقات هدفمند و هوشمندانه هموار می‌سازد.

۸-۱. چالش‌های فنی و عملیاتی در حال حاضر

الف) دوام مواد و پدیده خوردگی (Corrosion and Material Durability):

محیط‌های آبی، به ویژه آب‌های شور ساحلی، بسیار خورنده هستند. بزرگترین چالش فنی در اینجا، تضمین دوام بلندمدت پانتون‌ها (HDPE)، کابل‌ها و اجزای فلزی سیستم مهاربندی است.

- خوردگی الکتروشیمیایی: کابل‌ها و کانکتورهای زیردریایی در معرض تخریب الکتروشیمیایی قرار دارند که می‌تواند ایمنی سیستم و کیفیت انتقال برق را تحت تأثیر قرار دهد.
- فرسایش پانتون‌ها: مقاومت HDPE در برابر سایش مکانیکی مداوم ناشی از امواج، به ویژه در محیط‌های دریایی با انرژی بالا، نیازمند تحقیقات بیشتر است [4].

ب) پایداری سازه و نیروهای هیدرودینامیکی:

مدل‌سازی دقیق رفتار آرایه‌های FPV در برابر نیروهای ترکیبی امواج، جریان و باد همچنان یک چالش تقریباً حل نشده است. طراحی سیستم مهاربندی در آب‌های عمیق‌تر و محیط‌های دارای جزر و مد، بسیار پیچیده است. لنگرها باید بتوانند در شرایط حداکثر طوفان، آرایه را ثابت نگه دارند، بدون آنکه هزینه‌ها از طریق جریمه‌های مکانی توجیه اقتصادی پروژه را از بین ببرند. [1,4]

ج) کمبود داده‌های عملکردی درازمدت (Long-Term Data):

بیشتر مطالعات عملکردی FPV بر روی پروژه‌های پایلوت یا داده‌های کوتاه مدت متمرکز هستند. برای اینکه سرمایه‌گذاران با اطمینان اقدام به تزریق سرمایه کنند، داده‌های عملکردی ۲۵ تا ۳۰ ساله در مورد نرخ تخریب ماژول‌ها، عمر مفید پانتون‌ها و تأثیرات بلندمدت زیست‌محیطی ضروری است. این فقدان داده، مدل‌های پیش‌بینی عملکرد (Performance Prediction Models) را با عدم قطعیت‌هایی روبرو می‌سازد.

۸-۲. چشم‌انداز آینده و مسیرهای تحقیقاتی نویدبخش

الف) توسعه متریال‌های نسل جدید:

- آینده FPV به مواد نوآورانه وابسته است. تحقیقات آتی باید بر توسعه مواد پانتونی متمرکز شود که:
- زیست تخریب پذیر باشند: تا خطر آلودگی میکروپلاستیکی آب را به صفر برسانند.
- از نظر حرارتی بهینه تر باشند: با هدایت حرارتی بالاتر، تماس بهتری با آب ایجاد کرده و اثر خنک کنندگی را افزایش دهند.
- مقاومت بالاتر در برابر خوردگی: استفاده از آلیاژهای پیشرفته یا کامپوزیت‌های پلیمری برای اجزای اتصال دهنده.

ب) هوشمندسازی سیستم‌ها و ادغام با فناوری اطلاعات:

- آینده FPV به هوش مصنوعی و اتوماسیون گره خورده است.
- پیش‌بینی عملکرد مبتنی بر هوش مصنوعی: استفاده از الگوریتم‌های یادگیری ماشین (Machine Learning) برای پیش‌بینی دقیق تولید انرژی FPV با در نظر گرفتن متغیرهای متعدد محیطی (دما، امواج، سرعت باد) برای بهبود مدیریت شبکه (Smart Grid).
- سیستم‌های ردیابی شناور (Floating Tracking Systems): توسعه سامانه‌های ردیاب خورشیدی کم‌هزینه و مقاوم در برابر آب که بتوانند زاویه پنل‌ها را در طول روز بهینه کنند. این امر می‌تواند تولید انرژی را حتی بیشتر از مزیت خنک‌کنندگی آب افزایش دهد.

ج) گسترش به محیط‌های فراساحلی و آب‌های عمیق (Deep-Sea FPV):

بیشترین پتانسیل فضایی جهان در محیط‌های دریایی دور از ساحل (Offshore) نهفته است. اگرچه این پروژه‌ها با چالش‌های عظیم مهاربندی و انتقال برق مواجه‌اند، اما توسعه روش‌هایی مانند هیبریدسازی FPV با باد فراساحلی شناور، راه را برای تولید گیگاواتی انرژی پاک در مناطقی با ترافیک کشتیرانی و محدودیت کاربری کمتر باز می‌کند. در این راستا، بهبود مدل‌های مکان‌یابی مانند IFSE برای اعمال در آب‌های عمیق تر و با در نظر گرفتن نیروهای دریایی قوی‌تر، ضروری است. [3,4]

د) مقررات‌گذاری و استانداردسازی بین‌المللی:

برای رشد پایدار، جامعه بین‌المللی نیازمند تدوین استانداردهای فنی یکپارچه برای طراحی سازه، مهاربندی و ایمنی الکتریکی FPV است. وجود چنین استانداردهایی ریسک سرمایه‌گذاری را کاهش داده و فرآیند صدور مجوز را تسهیل می‌بخشد.

در نهایت، فتولتائیک شناور یک فناوری با ظرفیت رشد تصاعدی است. غلبه بر چالش‌های فنی ذکر شده، این امکان را فراهم می‌آورد تا FPV نه تنها به یک منبع مکمل، بلکه به ستونی محوری در تأمین امنیت انرژی و آب جهان در دهه‌های آینده تبدیل شود.

۹. نتیجه گیری

این مقاله مروری جامع، با ترکیب دقیق داده‌ها از تحقیقات پیشرو، پتانسیل عظیم فناوری فتوولتائیک شناور (FPV) را به عنوان یک راه‌حل استراتژیک برای چالش‌های سه‌گانه انرژی، آب و زمین مورد تأیید قرار داد. تحلیل ما نشان داد که FPV نه یک جایگزین ساده، بلکه یک تکامل مهندسی برای نیروگاه‌های خورشیدی زمینی است. یافته‌های اصلی ما در سه حوزه کلیدی، مسیر توسعه FPV را روشن می‌سازد:

۱) کارایی برتر از طریق ترمودینامیک

بررسی‌ها قاطعانه ثابت کردند که مزیت اصلی FPV، خنک‌کنندگی طبیعی توسط آب است. این اثر نه تنها افت راندمان حرارتی معمول در سیستم‌های زمینی را خنثی می‌کند، بلکه منجر به افزایش محسوس بازدهی (تا ۱۵٪) و بهبود تولید کل انرژی در طول عمر پروژه می‌شود. [1] این برتری عملکردی، توجه اصلی فنی برای سرمایه‌گذاری بیشتر در زیرساخت‌های شناور است.

۲) ضرورت مکان‌یابی هوشمند و کاهش ریسک

توسعه FPV در محیط‌های پیچیده (به‌ویژه مناطق ساحلی و آب‌های عمیق) نمی‌تواند تنها بر اساس تابش خورشید صورت پذیرد. برای غلبه بر هزینه بالای زیرساخت‌های مهاربندی و کابل‌کشی، استفاده از متدولوژی‌های پیشرفته مکانی مانند شاخص IFSE حیاتی است. این شاخص با ادغام هزینه‌های سرمایه‌ای ناشی از عمق و فاصله از ساحل با ملاحظات زیست‌محیطی، به عنوان یک ابزار فیلترکننده عمل کرده و ریسک‌های پروژه را در مراحل اولیه به حداقل می‌رساند. [1,3,4]

۳) پایداری شبکه از طریق هم‌افزایی

برای اینکه FPV از یک منبع متناوب به یک منبع قابل اتکا در شبکه تبدیل شود، ادغام هیبریدی ضروری است. هم‌افزایی با نیروگاه‌های برق‌آبی (Hydro-FPV) یک راه‌حل برد-برد است؛ این ترکیب نه تنها نوسانات تولید را مدیریت کرده و پایداری شبکه را تضمین می‌کند، بلکه با کاهش تبخیر سطح آب، به حفظ منابع آبی در مناطق خشک کمک شایانی می‌نماید. علاوه بر این، نوآوری در ذخیره‌سازی‌هایی مانند تولید هیدروژن سبز و استفاده از حجم پانتون‌ها برای ذخیره‌سازی هوای فشرده (CAES)، مسیرهای نوینی را برای تأمین انرژی پایدار بلندمدت باز کرده است. [4]

در نهایت، در حالی که چالش‌هایی مانند هزینه‌های سرمایه‌ای اولیه بالا، نیاز به داده‌های عملکردی درازمدت و فقدان استانداردسازی برای محیط‌های دریایی باقی مانده، مزایای استراتژیک FPV (حفظ زمین، صرفه‌جویی در آب و تولید انرژی کارآمدتر) موقعیت آن را به عنوان یک تکنولوژی محوری برای پاسخگویی به تقاضای جهانی انرژی در دهه‌های آینده تثبیت می‌کند. تحقیقات آتی باید بر توسعه مواد زیست‌تخریب‌پذیر و مدل‌های کنترل هوشمند متمرکز شوند تا FPV بتواند با اطمینان کامل به سوی استقرار در مقیاس‌های فراساحلی گام بردارد.

۱۰. مراجع



1. Koondhar, Mohsin Ali, et al. "Reviewing floating photovoltaic (FPV) technology for solar energy generation." *Energy Strategy Reviews* 54 (2024): 101449.
2. Ma, Xin, et al. "Building integrated photovoltaic-thermal systems (BIPVT) and spectral splitting technology: A critical review." *Next Sustainability* 4 (2024): 100056.
3. Fouz, D. M., et al. "Floating solar photovoltaic energy for coastal areas: A siting methodology." *Journal of Cleaner Production* 528 (2025): 146733
4. Garrod, Aydan, et al. "An assessment of floating photovoltaic systems and energy storage methods: A comprehensive review." *Results in Engineering* 21 (2024): 101940